

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NUMUNE ALMA SIRASINDA ZEMİNİN FİZİKSEL
ÖZELLİKLERİNİ BELİRLEMeye YÖNELİK
PENETROMETRE TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Osman KARA

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zeki GÜNDÜZ

Ocak 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


NUMUNE ALMA SIRASINDA ZEMİNİN FİZİKSEL
ÖZELLİKLERİNİ BELİRLEMeye YÖNELİK
PENETROMETRE TASARIMI

DOKTORA TEZİ


İnş. Yük. Müh. Osman KARA

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

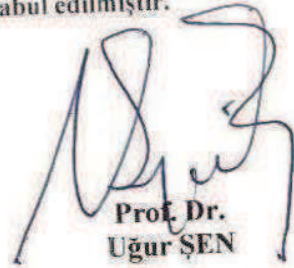
Bu tez 26/01/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Zeki GÜNDÜZ


Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Kemalettin YILMAZ

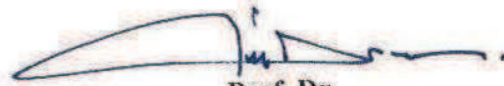
Üye


Prof. Dr.
Uğur ŞEN

Üye


Prof. Dr.
Hasan ARMAN

Üye


Prof. Dr.
Sami ARSOY

Üye

ÖNSÖZ

Zemin inceleme çalışmalarında numune alınması ve arazi deneylerinin (SPT, CPT v.b.) yapılması Türkiye’de olduğu gibi Dünyanın birçok bölgesinde yönetmeliklerin zorunlu kıldığı işlemlerdir. Numune alınması, tasarımlarda güvenle kullanılacak zemin parametreleri sağlayan laboratuvar deneylerinin yapılması için gerekli olmakta ve/veya yönetmelikler, şartnameler veya müşteriler (tasarımcılar) tarafından zorunlu tutulmaktadır. Numune örselenmeleri nedeniyle laboratuvar deneylerinin yapılmasının anlamsız ya da imkânsız olacağı durumlarda zemin parametrelerinin verilere dayalı belirlenmesini sağlayabilecek yerinde (arazi) deneylerinin yapılması, yönetmeliklerin düzenlediği veya şartların gerektirdiği zorunluluk olmanın yanında ekonomik ve pratik olması nedeniyle tercih edilen yöntemler olabilmektedir.

Günümüzde, penetrasyon deneylerinin yaygınlaşması, uygulama maliyetlerinin düşmesi, uygulamanın giderek kolaylaşması, arazi çalışması sürelerinin azalması, giderek daha kaliteli ve güvenilir verilerin elde edilmesi ve bütün bu gelişmelere bağlı olarak müşteri memnuniyetinin arttırılabilmesi gibi konularda gerçekleşen çok olumlu gelişmeler yapılan araştırmaların penetrometrelere yönelmesini sağlamıştır.

Bu çalışmada, Türkiye’nin uygulama ve yönetmelik şartları da dikkate alınarak, deney sırasında numune alabilen ve zeminin özelliklerini belirlemeye yarayacak verileri sağlayabilen yeni bir penetrometre tasarlanmıştır.

Çalışmada, tasarlanan penetrometrenin kumlarda bazı fiziksel parametreleri başarıyla ölçtüğü bir dizi deneylerle gösterilmiştir. Deneylerde penetrometre uç direnci ve genişletme direncinin, kumların sıklığından (D_r) ve boşluk oranından (e) etkilendiği gösterilmiştir. Parametreler arası ilişkinin anlamlı ve literatürde yer alan verilerle uyumlu olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Öncelikle, yoğun geçen doktora çalışmalarımın dolayısıyla yeterli zaman ayıramadığım ve bana sabırla destek olan eşime, oğlum Mehmet Ali Berr ve kızım Betül Rana Nur'a teşekkür ederim. Ayrıca tüm hayatımı borçlu olduğum annem ve babama minnetlerimi arz ederim. Bana manevi desteklerini esirgemeyen kardeşlerim ve dostlarıma teşekkür ederim.

Bilgi ve tecrübeleriyle doktora çalışmalarımın önemli katkıları bulunan, Tez Danışmanım Prof. Dr. Zeki GÜNDÜZ, Tez İzleme Jüri Üyeleri Prof. Dr. Hasan ARMAN, Prof. Dr. Uğur ŞEN ve diğer tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Farklı disiplinleri ilgilendirdiğinden dolayı uzun süren ve çok sayıda kurum ve kuruluştan destek aldığım tez çalışmalarımın bana bilgi, emek, fiziki imkan, alet ve manevi desteği bulunan, Sakarya Üniversitesi personellerine, başta Jeoloji Mühendisi Yavuz Selim UZUNLAR ve Metalurji Mühendisi Halil ÖZDEMİR olmak üzere Kahramanmaraş, Sakarya ve Kayseri Bayındırlık ve İskan Müdürlükleri personellerine, başta Öğretim Görevlisi Dr. Cemal ACAR olmak üzere emeği geçen Kayseri Meslek Yüksek Okulu personellerine, Karayolları 6. Bölge Müdürlüğü personellerine, DSİ 12. Bölge Müdürlüğü personellerine, Bayraktar ve SU-MA Zemin Etüt Şirketlerinin sahipleri ve personellerine teşekkür ederim.

Bu tezi hazırlarken bana doğrudan ya da dolaylı olarak, maddi ya da manevi destek veren ve kaynak olarak eserlerinden faydalandığım herkese teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
ABSTRACT.....	xx
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırmanın Amacı.....	3
1.2. Zemin Araştırmalarının Önemi ve Yöntemleri.....	8
1.2.1. Araştırma Çukurları.....	14
1.2.2. Sondajlar.....	15
1.3. Numune Alma.....	16
1.3.1. Zemin örselenmesi.....	19
1.3.2. Numune örselenmesinin etkileri.....	33
1.4. Laboratuvar DeneYleri.....	35
BÖLÜM 2.	
ARAZİ DENEYLERİ.....	37
2.1. Penetrometreler.....	40
2.1.1. Penetrometrenin geçmişi.....	41
2.1.2. Penetrometrelerde yeni gelişmeler.....	64
2.2. Günümüzde Yaygın Kullanılan Penetrometreler.....	83

2.2.1. Standart penetrasyon deneyi (SPT)	84
2.2.1.1. SPT-N değerlerinin dzltilmesi ve kullanımı.....	92
2.2.2. Konik penetrasyon deneyi (CPT)	96
2.2.3. Presiyometre (basınçmetre) deneyi (PMT).....	109
2.2.3.1. Kuyu presiyometreleri (MPT)	111
2.2.3.2. Kendinden delgili presiyometre (SBP)	112
2.2.3.3. Yerdeğiştirme presiyometreleri.....	113
2.2.4. Dilatometre deneyi (DMT)	114
BÖLÜM 3.	
PENETROMETRENİN İMALİ.....	117
3.1. Paslanmaz elik.....	118
3.1.1. Paslanmaz eliklerin stnlkleri.....	119
3.1.2. Paslanmaz elik türleri.....	120
3.1.2.1. Ferritik paslanmaz elikler.....	121
3.1.2.2. Martenzitik paslanmaz çelikler.....	122
3.1.2.3. Östenitik paslanmaz çelikler.....	123
3.1.2.4. Östenitik-ferritik (dubleks) paslanmaz çelikler.....	125
3.1.2.5. Çökelme sertleşmesi uygulanabilir paslanmaz elikler.....	125
3.1.3. Paslanmaz eliklerle imalat.....	125
3.1.4. Kullanılan elik sınıfı ve özellikleri.....	128
3.1.5. 304 (1.4031) eliğinin zellikleri.....	133
3.1.6. Kullanılan elik profiller.....	137
3.2. Strain Gauge (Gerinim Pulu)	138
3.2.1. Strain gauge uygulamada kullanılmam alet ve malzemeler.....	143
3.2.2. Bağlantı terminalleri.....	143
3.2.3. Bağlantı kabloları.....	143
3.3. Veri Toplama Sistemi.....	144
3.3.1. TESTBOX1001 veri toplama sistemi.....	144
3.3.1.1. TESTBOX1001 veri toplama sistemi teknik zellikleri.....	145
3.3.1.2. TESTBOX1001 veri toplama sisteminin bölümleri.....	147
3.3.2. TESTBOX-BRIDGE aygıt geçidi.....	150

3.3.3. TESTBOX-QCABLE devre tamamlama kablosu.....	150	
3.4. TESTLAB Basic Yazılımı.....	151	
3.5. Penetrometrenin Tasarımı.....	153	
3.5.1. Tasarımın teorik alt yapısı.....	154	
3.5.2. Zemin-metal arasındaki etkileşim.....	155	
3.5.3. Penetrometrenin tasarım aşamaları.....	158	
3.6. Penetrometrenin Ölçüm Düzeneklerinin Oluşturulması.....	167	
3.6.1. Ön hazırlık.....	167	
3.6.2. Strain gaugeleri yapıştırma.....	168	
3.6.3. Strain gauge kontrolleri.....	170	
3.6.4. Kablo bağlantıları ve köprü tamamlama.....	172	
3.7. TESTBOX1001Veri Toplama Sistemi Kurulumu.....	173	
3.7.1. Analog dijital çevirim özellikleri.....	173	
3.7.2. Veri toplama sisteminin kurulması.....	175	
3.7.3. TestLAB Basic programının kurulması ve çalıştırılması.....	176	
3.8. Kalibrasyonlar.....	176	
3.9. Montaj.....	180	
3.10. Deney Düzenleme.....	180	
BÖLÜM 4.		
PENETROMETRE TEST ORTAMI.....		182
4.1. Sondaj Ekipmanı.....	182	
4.2. Yükleme Çerçevesi.....	183	
4.3. Model Zemin Ortamı Hazırlamada Kullanılan Malzemeler.....	185	
4.4. Model Ortamlarda Kullanılan Zemin Malzemesi Özellikleri.....	186	
4.4.1. Birim hacim ağırlıklar ve boşluk oranları.....	186	
4.4.2. Elek analizi ve zemin sınıfı.....	187	
4.4.3. Kesme kutusu deneyi.....	190	
4.5. Model Zemin Ortamının Hazırlanması.....	192	
4.5.1. Hazırlanan model zemin ortamının özellikleri.....	198	
4.6. Deney ve Veri Kaydı.....	198	

BÖLÜM 5.	
BULGULAR ve TARTIŞMA.....	203
5.1. Deney Sonuçları.....	203
5.1.1. Direnç ve gerilme değerleri.....	203
5.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	205
5.2.1. Uç direnci değerleri ile zemin özellikleri ilişkileri.....	205
5.2.1.1. Uç direnci – sıklık ilişkisi.....	205
5.2.1.2. Uç direnci - boşluk oranı ilişkisi.....	208
5.2.2. Genişletme direnci değerleri ile zemin özellikleri ilişkileri.....	211
5.2.2.1. Genişletme direnci – sıklık ilişkisi.....	211
5.2.2.2. Genişletme direnci - boşluk oranı ilişkisi.....	214
5.2.3. Çevre basıncı ve sürtünme gerilmesi değerleri-zemin özellikleri ilişkileri.....	216
BÖLÜM 6.	
SONUÇ ve ÖNERİLER.....	223
KAYNAKLAR.....	226
EKLER.....	240
ÖZGEÇMİŞ.....	451

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Numune kesit alanı
A ₀	: Başlangıç numune kesit alanı
c	: Kohezyon
ASCE	: Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneği
ASTM	: Amerikan Standardı
BS	: İngiliz Standardı
CPT	: Konik Penetrasyon Deneyi
c _u	: Drenajsız kohezyon
c _v	: Yatay konsolidasyon katsayısı
e	: Boşluk oranı
D	: Kuyu çapı, numune çapı
D ₁₀	: Danelerin %10 unun geçtiği dane çapı
D ₃₀	: Danelerin %30 unun geçtiği dane çapı
D ₅₀	: Danelerin %50 sinin geçtiği dane çapı (ortalama dane çapı)
D ₆₀	: Danelerin %60 ının geçtiği dane çapı
D _r	: Göreli (rölatif) sıklık
D _i	: Numune alıcının kesici kenarının iç çapı
D _e	: Numune alıcının kesici kenarının dış çapı,
DMT	: Dilatometre deneyi
D _s	: Numune alıcının iç çapı
E	: Elastisite modülü
e	: Boşluk oranı
F	: Kuvvet
f _s	: Çevre sürtünmesi kuvveti
ISSMFE	: Uluslararası Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Derneği
w _L	: Likit limit

OCR	: Aşırı konsolidasyon oranı
u	: Boşluk suyu basıncı
q _c	: Uç direnci
K	: Gauge faktörü
K _d	: Düşey basınç indisiyle
K ₀	: Sukunetteki zemin basıncı katsayısı
L	: Boy
ΔL	: Boy uzaması
m _v	: Sıkışabilirlik katsayısı
N	: Normal kuvvet
N (SPT-N)	: SPT vuruş sayısı
N _{arazi}	: Arazide ölçülen SPT vuruş sayısı
N ₆₀	: Tokmak enerjisinin %60'ına göre düzeltilmiş SPT vuruş sayısı
N _{1,60}	: Efektif düşey basınca göre düzeltilmiş SPT vuruş sayısı
PMT	: Presiyometre (basınçmetre) deneyi
R	: Elektriksel direnç
ΔR	: Elektriksel direnç değişimi
R _f	: Çevre sürtünmesinin uç direncine oranı (q _f /q _c)
R ²	: Korelasyon katsayısı
S	: Kesit alanı
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
t	: Zeminin yaşı (çökmeden sonra geçen zaman) (yıl)
T	: Kesme kuvveti
TS	: Türk Standardı
T _{max}	: En büyük kesme kuvveti
UV	: Ultraviyole
V _i	: Uyarma gerilimi
V _ö	: Ölçülen gerilim
q _c	: Uç direnci
q _f	: Çevre sürtünmesi
q _u	: Serbest basma dayanımı
z	: Kuyu yüzeyinden derinlik

σ	: Gerilme
σ'	: Efektif gerilme
σ_v	: Düşey gerilme
σ_h	: Yatay gerilme
σ_v'	: Standart düşey basınç
τ	: Kayma gerilmesi
τ_{max}	: En büyük kayma gerilmesi
σ_n	: Normal gerilme
ϕ	: Kayma direnci açısı
ε	: Birim boy kısalması

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Zemin araştırmaları kapsamı ile maliyet artış ilişkisi.....	9
Şekil 1.2.	Zemin ve numune alma için gerilme izleri.....	21
Şekil 1.3.	Bir sondaj kuyusu tabanı altındaki zeminde gerilme değişimleri.....	22
Şekil 1.4.	Numune alma tütünün altındaki zeminde yer değiştirme.....	23
Şekil 1.5.	Basit numune alıcının orta çizgisindeki eksenel birim deformasyon tarihçesi.....	24
Şekil 1.6.	Normal ve az aşırı konsolide killerde tüt ile numune almadan kaynaklanan gerilme izleri.....	25
Şekil 1.7.	Alan oranı ve rahatlama payı tanımlamaları.....	26
Şekil 1.8.	Değişik numune yalıtım yöntemlerinde karşılaşılan nem kayıpları.....	31
Şekil 1.9.	Tokyo kilinde değişik numune alma yöntemlerinin serbest basınç dayanımına etkisi.....	34
Şekil 2.1.	Danimarka cep penetrometresi.....	42
Şekil 2.2.	Orjinal Dutch konisi ve geliştirilmiş mekanik Delft konisi.....	43
Şekil 2.3.	Mekanik Delft Konisi ve Mekanik Begemann Konisi.....	44
Şekil 2.4.	Begeman konisi.....	45
Şekil 2.5.	Heerema penetrometresi ucu.....	46
Şekil 2.6.	Sol-Essais penetrometresi.....	47
Şekil 2.7.	Degebo penetrometresi.....	48
Şekil 2.8.	Elektrikli strain gauge konisi.....	50
Şekil 2.9.	CEBTP penetrometresinin ucu.....	51
Şekil 2.10.	Ponts et Chaussees Laboratuvarının elektrikli penetrometresi.....	52
Şekil 2.11.	BMEE hafif penetrometre.....	53
Şekil 2.12.	Amerikan statik penetrometresi.....	54
Şekil 2.13.	Rus Lunar penetrometresi.....	56

Şekil 2.14. Fondasol dinamik penetrometresinin ucu.....	57
Şekil 2.15. İsviçre penetrometresinin ucu.....	58
Şekil 2.16. Jonell ve Nilson penetrometresi ucu.....	59
Şekil 2.17. Haefeli Fehlmann statik-dinamik penetrometresi.....	60
Şekil 2.18. Jangot-Bonneton statik-dinamik penetrometresi ucu.....	61
Şekil 2.19. Meurisse statik-dinamik penetrometresi ucu.....	62
Şekil 2.20. Andina statik-dinamik penetrometresi ucu.....	63
Şekil 2.21. Begemann Mekanik sürtünme konileri (penetrometreleri).....	64
Şekil 2.22. Elektrikli sürtünme penetrometreleri.....	65
Şekil 2.23. Penetrometrenin zamanla gelişimi.....	67
Şekil 2.24. Piyezokonilerin gözenekli uçlarının pozisyonları.....	68
Şekil 2.25. Vertek görüntü sondası.....	70
Şekil 2.26. Görüntü sondası sensöründen alınmış görüntüler.....	71
Şekil 2.27. Görüntü sondası görüntüleri.....	71
Şekil 2.28. Elektrik iletkenlik sondaları.....	72
Şekil 2.29. Çevresel değerleri ölçüm sondası.....	73
Şekil 2.30. Gama ışını sondası.....	74
Şekil 2.31. Gama ışını sondası veri çıktısı.....	74
Şekil 2.32. Hidrokarbon sondası.....	75
Şekil 2.33. Hidrokarbon sondası örnek veri çıktıları.....	76
Şekil 2.34. Manyetometre sondaları.....	77
Şekil 2.35. Sismik sonda deneyi.....	78
Şekil 2.36. Nem sondası.....	79
Şekil 2.37. Nem sondası deneyi veri çıktısı.....	79
Şekil 2.38. Kanatlı sonda.....	80
Şekil 2.39. İtilen kanatlı sonda.....	81
Şekil 2.40. Çekilen kanatlı sonda.....	81
Şekil 2.41. T-çubuğu sondası.....	82
Şekil 2.42. Konik penetrometre ve sürekli itilen problemler.....	83
Şekil 2.43. SPT numune alıcı kesit ve boyutları.....	86
Şekil 2.44. SPT şahmerdan (çekiç) çeşitleri.....	87
Şekil 2.45. Elektrikli sürtünme konisi.....	98

Şekil 2.46. Sürtünmeli koni etki kuvvetleri.....	100
Şekil 2.47. CPTU deneyine ait tipik sonuçlar.....	101
Şekil 2.48. Zemin türü, konik uç direnci ve çeper sürtünmesi ilişkisi.....	103
Şekil 2.49. Elektrikli sürtünme konisi için sadeleştirilmiş zemin teşhis abağı.....	103
Şekil 2.50. Standart elektrikli koni için zemin sınıflandırma abağı.....	104
Şekil 2.51. CPT deney sonuçlarına göre zemin sınıflaması.....	105
Şekil 2.52. Çimentolanmamış normal kuvars kumları için CPT sonuçları, örtü basıncı ve efektif sürtünme açısı arasındaki ilişki.....	106
Şekil 2.53. Farklı kumlar için CPT uç direnci ile sıklık ilişkisi.....	107
Şekil 2.54. Çimentolanmamış ve yeni oluşmuş kuvars kökenli kum zeminlerde rölatif sıklığın uç direnciyle ilişkisi.....	107
Şekil 2.55. Presiyometrenin ana bileşenleri.....	110
Şekil 2.56. Menard presiyometresinin şematik diyagramı.....	111
Şekil 2.57. Cambridge kendinden delgili presiyometresi.....	112
Şekil 2.58. Sürmeli tip presiyometre.....	114
Şekil 2.59. Marchetti Dilatometresi.....	116
Şekil 3.1. Paslanmaz çelik türleri için Schaeffler Diyagramı.....	120
Şekil 3.2. Paslanmaz çelikten imal edilmiş bazı boru ve kütük profiller.....	129
Şekil 3.3. Temel 304 çeliğiyle diğerlerinin özellik değerlendirmesi.....	131
Şekil 3.4. Eksenel çekmeye maruz çubukta boy uzaması.....	138
Şekil 3.5. Wheatstone köprüsü devresi.....	140
Şekil 3.6. TESTBOX1001 veri toplama sistemi.....	145
Şekil 3.7. RS-485 haberleşme konektörü bağlantı şeması.....	148
Şekil 3.8. Sensör kablosu konektörü bağlantı şeması.....	149
Şekil 3.9. Kanal kazanç ve ikaz ayarları şeması.....	149
Şekil 3.10. TESTBOX-BRIDGE aygıt geçidi.....	150
Şekil 3.11. TESTBOX-QCABLE devre tamamlama kablosu.....	151
Şekil 3.12. Tasarlanan penetrometre deney verilerinden c ve Ø'nin grafik yolla belirlenmesi için düşünülen yöntem grafiği.....	158
Şekil 3.13. Tasarlanan penetrometre.....	160
Şekil 3.14. Uç bölümü.....	161
Şekil 3.15 Penetrometrenin taşıyıcı iç bölümü.....	161

Şekil 3.16. 50mm çapında alt sürtünme bölümü (strain gauge bağlanmış).....	162
Şekil 3.17. 70mm çapında üst sürtünme bölümü.....	162
Şekil 3.18. Tij konnektörü bölümü.....	163
Şekil 3.19. Penetrometrenin son tasarım şekli.....	166
Şekil 3.20. Penetrometre ve veri toplama sistemi.....	166
Şekil 3.21. Strain gauge yapıştırmak için bantlanarak sabitlenmiş borular.....	168
Şekil 3.22. Yerine konumlandırılmış, yapıştırılmaya hazır strain gauge.....	169
Şekil 3.23. İç boru dışına yapıştırılmış strain gauge.....	169
Şekil 3.24. Boru içine yapıştırılmış strain gauge.....	170
Şekil 3.25. Strain gauge bağlantılarının kontrolünde kullanılan avometre.....	171
Şekil 3.26. Elektronik devreyle Wheatstone Köprüsü tamamlama.....	172
Şekil 3.27. TESTBOX1001'in transfer fonksiyonu.....	173
Şekil 3.28. İç taşıyıcı boruların (uç ve genişletme direnci) kalibrasyonu.....	178
Şekil 3.29. Sürtünme ceketinde sürtünme kuvveti kalibrasyonu.....	179
Şekil 3.30. Sürtünme ceketinde basınç kuvveti kalibrasyonu.....	179
Şekil 3.31. TestLAB Basic programı deney düzenleme ara yüzü.....	181
Şekil 4.1. Sondaj ekipmanı.....	183
Şekil 4.2. Yükleme çerçevesi düzeneği ön, üst ve yan görünüşü.....	184
Şekil 4.3. 0-1 mm dane çapına sahip kumda dane dağılımı grafiği.....	188
Şekil 4.4. 0-5 mm dane çapına sahip kumda dane dağılımı grafiği.....	189
Şekil 4.5. 0-15 mm dane çapına sahip kumda dane dağılımı grafiği.....	190
Şekil 4.6. 0-1 mm dane çapına sahip kumda kesme kutusu deneyi grafiği.....	191
Şekil 4.7. 0-5 mm dane çapına sahip kumda kesme kutusu deneyi grafiği.....	191
Şekil 4.8. 0-15 mm dane çapına sahip kumda kesme kutusu deneyi grafiği.....	192
Şekil 4.9. Bir tabaka için hesaplanan malzemenin tartılması.....	194
Şekil 4.10. Bir tabaka için gevşek halde ön tesviye kontrolü.....	194
Şekil 4.11. Tamamlanan tabaka için tesviye kontrolü.....	195
Şekil 4.12. Tamamlanan tabaka için kot kontrolü.....	195
Şekil 4.13. Çerçeve üst kirişinin teraziye alınması.....	196
Şekil 4.14. Kontrolleri yapılmış başlatılmaya hazır bir deney.....	197
Şekil 4.15. Penetrometrenin zemine itilmesi.....	200
Şekil 4.16. Penetrometre ilk bölümünün zemine itilmesi.....	201

Şekil 4.17. Penetrometrenin tamamının zemine itilmiş görüntüsü.....	202
Şekil 4.18. Penetrometrenin, çevresi boşaltılarak çıkarılması.....	202
Şekil 5.1. D=0-1 mm zemin modelinde sıklık-uç direnci ilişkisi grafiği.....	206
Şekil 5.2. D=0-5 mm zemin modelinde sıklık-uç direnci ilişkisi grafiği.....	207
Şekil 5.3. D=0-15 mm zemin modelinde sıklık-uç direnci ilişkisi grafiği.....	207
Şekil 5.4. Kumlu zeminlerde SPT batma direnci-görelî sıklık ilişkisi.....	208
Şekil 5.5. D=0-1 mm zemin modelinde boşluk oranı-uç direnci ilişkisi grafiği.....	209
Şekil 5.6. D=0-5 mm zemin modelinde boşluk oranı-uç direnci ilişkisi grafiği.....	210
Şekil 5.7. D=0-15mm zemin modelinde boşluk oranı-uç direnci ilişkisi grafiği.....	210
Şekil 5.8. D=0-1 mm zemin modelinde sıklık-geişletme direnci ilişkisi grafiği.....	212
Şekil 5.9. D=0-5 mm zemin modelinde sıklık- genişletme direnci ilişkisi grafiği.....	213
Şekil 5.10. D=0-15 mm zemin modelinde sıklık-geişletme direnci ilişkisi grafiği.....	213
Şekil 5.11. D=0-1 mm zemin modelinde boşluk oranı-geişletme direnci ilişkisi grafiği.....	215
Şekil 5.12. D=0-5 mm zemin modelinde boşluk oranı-geişletme direnci ilişkisi grafiği.....	215
Şekil 5.13. D=0-15 mm zemin modelinde boşluk oranı-geişletme direnci ilişkisi grafiği.....	216
Şekil 5.14. D=0-1 mm zemin modelinde alt sürtünme ceketî çevre basıncı-sürtünme gerilmesi ilişkisi grafiği.....	218
Şekil 5.15. D=0-1 mm zemin modelinde üst sürtünme ceketî çevre basıncı-sürtünme gerilmesi ilişkisi grafiği.....	218
Şekil 5.16. D=0-5 mm zemin modelinde alt sürtünme ceketî çevre basıncı-sürtünme gerilmesi ilişkisi grafiği.....	219
Şekil 5.17. D=0-5 mm zemin modelinde üst sürtünme ceketî çevre basıncı-sürtünme gerilmesi ilişkisi grafiği.....	219

Şekil 5.18. D=0-15 mm zemin modelinde alt sürtünme ceketı çevre basıncı- sürtünme gerilmesi ilişkisi grafiği.....	220
Şekil 5.19. D=0-15 mm zemin modelinde üst sürtünme ceketı çevre basıncı- sürtünme gerilmesi ilişkisi grafiği.....	220

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	Zemin örselenmesinin ana nedenleri.....	19
Tablo 1.2	Doygun kilde ortaya çıkan gerilme değışimleri.....	21
Tablo 1.3.	Alan oranları ile kesici uç daralmasının kombinasyonları.....	27
Tablo 1.4.	Zemin türüne bağı izin verilebilir uzunluğun çapa oranları.....	29
Tablo 1.5.	Numune alıcı sürme yöntemleri.....	30
Tablo 2.1.	Zemin şartlarına göre mevcut arazi deneylerinden elde edilen parametreler.....	39
Tablo 2.2.	Standart numune alma kaşıklarının boyutları.....	87
Tablo 2.3.	CPT'nin genel tipleri.....	97
Tablo 2.4.	Zemin türü için teşhis özellikleri.....	104
Tablo 3.1.	Bazı paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri.....	122
Tablo 3.2.	Paslanmaz çeliklerin imalat özellikleri.....	126
Tablo 3.3.	Paslanmaz çeliklerin fiziksel özellikleri.....	130
Tablo 3.4.	Oda sıcaklığında 304 çeliklerinin mekanik özellikleri.....	134
Tablo 3.5.	Tipik kısa süreli yüksek ısı çekme mukavemeti.....	134
Tablo 3.6.	Tavsiye olunan azami hizmet sıcaklığı.....	135
Tablo 3.7.	Sıfır altı sıcaklıklarda 304 çeliğinin tipik özellikleri.....	135
Tablo 3.8.	304 çeliğinin bazı çözeltilere karşı korozyon dayanımı.....	136
Tablo 3.9.	Wheatstone Köprüsü devre çeşitleri.....	142
Tablo 3.10.	Kum-metal arasında oluşan sürtünme açısı.....	157
Tablo 4.1.	Model zemin ortamlarında kullanılan kum malzemelerin birim hacim ağırlık ve boşluk oranları değerleri.....	187
Tablo 4.2.	D=0-1 mm dane çapına sahip kum için yüzde geçen tablosu.....	187
Tablo 4.3.	D=0-5 mm dane çapına sahip kum için yüzde geçen tablosu.....	188
Tablo 4.4.	D=0-15 mm dane çapına sahip kum için yüzde geçen tablosu.....	189

Tablo 4.5.	Öngörülen sıklıklar için hesaplanarak kullanılan malzeme ağırlıkları.....	193
Tablo 4.6.	Deneylerde gerçekleşen su muhtevası, sıklık ve boşluk oranı değerleri.....	198
Tablo 5.1.	Farklı sıklıklarda ve derinliklerde ölçülen uç direnci değerleri.....	206
Tablo 5.2.	Farklı boşluk oranlarında ve derinliklerde ölçülen uç direnci değerleri.....	209
Tablo 5.3.	Farklı sıklıklarda ve derinliklerde ölçülen genişletme direnci değerleri.....	212
Tablo 5.4.	Farklı boşluk oranları ve derinliklerde ölçülen genişletme direnci değerleri.....	214
Tablo 5.5.	Sürtünme ceketlerinde ölçülen çevre basıncı ve sürtünme gerilmesi ortalamaları.....	217

ÖZET

Anahtar kelimeler: Penetrometre, Numune Alma, Zemin Fiziksel Özellikleri

Penetrometrelerin kolay kullanımları, arazide deney yapanlar için tercih edilmelerine etken olmaktadır. Çok sayıda zemin parametresi hakkında hesaplama ya da tahminde bulunmayı sağlayabilecek daha güvenilir veriler vermesi, tasarımcılar tarafından da tercih edilmesini sağlamaktadır. Saha araştırma maliyetlerini düşürmesi ise nihai yararlanıcılar olan iş sahipleri tarafında giderek daha fazla tercih edilmesinde etkili olmaktadır.

Arazi deneylerinin yaygınlaşması, araştırma geliştirme çalışmalarına giderek daha fazla önem verilmesini ve kaynak ayrılmasını sağlamaktadır. Dünyada çalışmalar, daha hızlı gerçekleştirilebilen ve daha güvenilir veriler sağlayan arazi deneylerinin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır.

Bu çalışmada, hem numune alabilen aynı zamanda zeminin bazı fiziksel özelliklerini belirlemeye yarayacak veriler elde edilebilen yeni bir penetrometre (numune alıcı) tasarlanmıştır. Türkiye’de hem numune alma, hem de en az bir arazi deneyi yapma zorunluluğu ve iki işlemin birlikte yapılmasının zorluğu bu geliştirme çalışmasında dikkate alınmıştır.

İçte, uç direnci ve genişletme direncini ölçmeye yarayan kalın bir cidardan, dışta ise sürtünme direncini ölçmeye yarayan ince cidarlı iki farklı çapta iki sürtünme ceketinden oluşan penetrometre çift cidarlı olarak tasarlanmıştır. Ölçümler gerinim pulu teknolojisiyle yapılmıştır.

Çalışmada tasarlanan penetrometreyle kum zeminlerin önemli parametreleri olan, rölatif sıkılığın (D_r) ve boşluk oranının (e) belirlenebildiği gösterilmiştir.

A PENETROMETER DESIGN FOR DETERMIN THE PHYSICAL PROPERTIES OF SOIL DURING SAMPLING

ABSTRACT

Key Words: Penetrometer, Soil Sampling, Physical Characteristics of Soils

Easy usage of penetrometers has an effect on those who experiment in the field. As penetrometers provide more reliable data that can be used for the calculation of large number of field parameters or for predictions they are also preferred by designers. The customers also gain advantage when they use penetrometers due to their effect on lowering the costs.

Proliferation of soil experiments also attached importance to the research and development works in this field. All over the world, these works are focused on advancing in-situ testing that can provide data in a faster and more accurate way.

In this study a new penetrometre (soil sampler) that can have a sample and also obtain some data regarding the psysical structure of the soil is developed. During the development process the necessity of having at least one in-situ test and taking sample and hardship of doing both of these two in Türkiye, have been taken into consideration.

The penetrometer is designed with double walls. Inside a thick wall, used to measure tip resistance and resistance to expansion and outside two thin walls in different diametres with two different friction mantles used to measure the resistance of friction. Measurements are carried out in strain gauge technology.

In this research it has been shown that, by using designed penetrometer the important parametres of sandy soils that are relativ density (D_r) and void ratio (e) can be established.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İhtiyaçların artmasının ve çeşitlenmesinin yansımaları, yapı alanında da yaşanmaktadır. Şartların ihtiyaçlara ve isteklere yeterli olmaması, şartların zorlanmasını gerektirmektedir. Artan insanlık nüfusuna ve beklentilere bağlı olarak ihtiyaçların arttığı, imkânların daraldığı ve şartların zorlaştığı günümüz dünyasında, imkân ve şartların ihtiyaçlara yeterli olup olmadığına bakılması yerine; imkân ve şartların ne kadar ihtiyacı karşılayabileceğinin, hatta imkân ve şartların nasıl en fazla ihtiyacı karşılamasının sağlana bileceğinin araştırılmasına başlanmıştır.

Yapı alanında yaşanan bu şartların, zemin araştırmalarına da yansması kaçınılmaz olmaktadır. Sınırlı imkân ve şartlara karşın ihtiyaçların, istek ve beklentilerin artması yapı alanındaki tüm alanlarda olduğu gibi yapının üzerinde bulunduğu zemin araştırmaları alanında da yaşanmaktadır. Örneğin; yapı konusunda sağlanan bilgi ve teknolojik gelişmeler zeminin daha derinlerini etkileyen yüksek, geniş ve ağır yapıların inşasını mümkün hale getirmiştir. Zeminlerin daha derinlerini etkileyen yapılar, daha derin zemin araştırmalarını zorunlu kılmaktadır. Derin zemin araştırmaları bir yandan fazla zaman gerektirirken diğer yandan zemin araştırma maliyetlerini artırmaktadır. Bu durum daha hızlı ve ekonomik araştırma yöntem ve aletlerinin keşfini teşvik etmektedir.

Bir yandan şehir nüfuslarının artması sonucu zayıf zeminlere yerleşme ihtiyacı, diğer yandan depremlerin yıkıcı etkilerinin zemin parametrelerine bağlı olması, bina zeminlerinin daha iyi araştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bina dışındaki yapılarda da ihtiyaç ve beklentiler artmakta ve şartları zorlamaktadır. Daha zor şartlarda ya da daha iyisi inşa edilmesi gereken yollar, tüneller, platformlar, su yapıları, su ortamlarında yapılan yapılar v.b. zemin inceleme konusunda detaylı araştırmaları zorunlu kılmaktadır.

Bir yandan ağırlaşan şartlar ve yeni gelişmeler, diğer yandan bu gelişmelere dayalı olarak yapılan yasal düzenlemeler; yeni şartları, zorunlulukları veya gerekleri beraberinde getirmektedir. Dünyanın değişik bölgelerinde, değişik coğrafi, ekonomik ya da kültürel şartlar, değişik imkânlar, başka bölgelerden çok farklı şartlar, zorluklar, zorunluluklar veya gerekleri beraberinde getirebilmektedir. Bölgenin zemin şartları, deprem risk düzeyi, bölge halkının ve ilgili teknik personellerin sosyal, ekonomik ve psikolojik durumu, bölgenin sahip olduğu teknik ve ekonomik imkânlar ve bu şartlardan etkilenen yasal düzenlemeler zemin inceleme yöntem ve araç-gereçlerini etkilemektedir.

Dünyanın daha gelişmiş ülkelerinde, vasıfsız işgücünü az gerektiren ya da hiç gerektirmeyen buna karşın çok az vasıflı işgücü gerektiren pahalı ve gelişmiş alet ve yöntemler kullanılırken; az gelişmiş ülkelerde, vasıflı işgücünü az gerektiren daha fazla vasıfsız işgücü yeterli olan, daha ucuz ve basit alet ve yöntemlerin kullanılması tercih edilmektedir. Bazı zemin inceleme faaliyetleri, yasal gerekleri yerine getirmek için detaya girilmeden yapılırken bazı zemin inceleme faaliyetleri yasal gereklerin çok üzerinde titiz çalışmalarla yapılmaktadır.

Ülkeler arası değişen şartlar ve bu şartlar gereği değişen prosedürler, ülke içinde de; (bölgeler, şehirler hatta mahalleler arası) değişebilmektedir. Aynı şehrin zemin problemleri yaşanmayan mahallelerinde zemin inceleme işini yasal prosedürlerle sınırlayarak gerçekleştiren şirketler, problemlili zemin şartlarına sahip parsellerde daha titiz davranmakta ve zaman zaman prosedürün gerektirdiği işlemlerden daha fazla test yaparak incelemeyi detaylandırmaktadır. Diğer yandan kurumlar da kendi şartları ve işgal konusuna göre kendilerine uygun şartnameler hazırlamakta ve özgün uygulamalar yapmaktadır.

Türkiye’de 1999 yılında meydana gelen yıkıcı Marmara Depremi (Richter ölçeği ile 7,4 şiddetinde) sonucunda oluşan büyük yıkım sonrasında Yapı Yönetmeliği değiştirilmiştir. Bu depremde özellikle Adapazarı Şehir Merkezinde zemin kaynaklı çok sayıda yapı hasarı oluşmuştur. Bu depremin yalnız bölgeyi değil tüm ülkeyi etkileyen sosyal, ekonomik, siyasal ve hukuki etkileri olmuştur (Dağdeviren vd., 2007). Bunun üzerine Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, özellikle zayıf zeminlerde

zemin inceleme işinin önemini fark etmiş ve yasal düzenleme ile bir istisna olarak Adapazarı Şehir Merkezinde zemin etütlerinin kontrolünü yerel yönetimlere bırakmayarak bizzat kendisi üstlenmiştir. Zemin inceleme faaliyetlerinin kontrol işini, 10 yıl süreyle kurduğu komisyon marifetiyle bakanlık olarak kendisi sürdürmüş, piyasada zemin inceleme faaliyeti yürüten şirketlerin ve yerel yönetimlerin yeterli düzeye geldiğinin anlaşılmasından sonra şehir merkezinde kontrolü yerel yönetimlere devretmiştir.

Değişen şartlar ve yasal düzenlemeler; bu şartlara bağlı olarak değişen zemin inceleme yöntemlerini ve düzeylerini gerekli veya zorunlu kılabilmektedir. Geçmişte olduğu gibi günümüzde de değişen şartlar yeni yöntem ve yeni araç-gereç araştırmalarını beraberinde getirmektedir. Özellikle Hollanda, İsveç ve Norveç gibi problemlili zeminlere sahip ülkelerde, Japonya, Türkiye ve Yeni Zelanda gibi deprem riski altında olan ülkelerde ve Hong Kong ve İngiltere gibi büyüyen şehirlerin zayıf zeminlere yerleşmeyi zorunlu kıldığı ülkelerde, özellikle kendi özel şartlarına uygun yöntemler geliştirmek için enstitüler ya da araştırma birimleri kurulmaktadır.

Günümüzde zemin inceleme faaliyetlerini daha ekonomik, daha hızlı, daha kolay ve tasarımda kullanılacak verileri daha doğru belirleyebilen faaliyetler haline getirmek için araştırmalar yapılmaktadır. Bu doğrultuda araştırmalar arazi deneylerinde yoğunlaşmaktadır. Yerinde deneylerin kolay icra edildiği, zayıf zemin koşullarına sahip Hollanda, İsveç, Norveç ve Danimarka gibi ülkelerde, yerinde deney araştırmalarına şirketler ve enstitüler gibi kuruluşlar büyük kaynaklar ayırmaktadır.

1.1. Araştırmanın Amacı

(Coduto, 2001) tarafından, eski temel tasarımlarının sadece geçmişteki örneklere, önsezi ve yaygın kanıya dayandırıldığı bildirilmiştir. Yapı inşa edenler, temellerin boyutlandırılması ve inşası için deneme yanılma yoluyla kurallar geliştirmiştir. Bu deneye dayalı kuralların, geçmişte karşılaşılan zemin koşullarına ve yapılara uygulandığında genellikle kabul edilebilir sonuçlar ortaya koyduğu bildirilmiştir.

20. yüzyıl öncesi endüstriyel dönem sırasında, şu anda zeminlerin iyileştirilmesi için kullanılan kazık çakma, önyükleme, kompaksiyon ve drenaj yöntemleri gibi birçok geoteknik yöntemin kullanıldığı görülmektedir (Jensen, 1969). Bu tekniklerin tamamen deneye dayalı deneyimler olarak uygulandığı bildirilmiştir (Clayton vd., 1995).

Bununla birlikte, inşaatçılar bu kuralları yeni koşullara uyguladığında, sonuçlar genellikle yıkıcı olmuştur. Bu problem özellikle XIX. yüzyılın sonlarında yeni bina inşaat yöntemlerinin ortaya çıkmaya başlamasıyla daha da sıkıntı verici olmuştur. Yeni materyaller binaların öncekilerden daha yüksek ve ağır olmasına da izin vermiştir. Ayrıca, daha yeni sahalar yerleşime açıldıkça, yapı inşa edenler, kötü zemin koşullu sahaları göz önünde bulundurmaya zorlanmış ve bu sahaların temel tasarımı ve inşası daha çok güçleşmiştir. Böylece temel tasarımı için eski kurallar daha fazla uygulanmamıştır. Yapılar giderek daha geniş ve daha ağır olarak inşa edilirken, mühendislerin temel tasarım ve yapımı hakkındaki bilgileri de gelişmiştir. Mühendisler basit kurallar geliştirmek yerine zemin ve temellerin davranışını araştırmaya ve daha rasyonel tasarım metotları geliştirmeye başlamışlardır (Coduto, 2001).

Dünyada, zemin mekaniği konusunda çalışmaların M.Ö. X. yüzyıla kadar uzandığı kaynaklardan anlaşılmaktadır. Zemin mekaniğinde analitik incelemeler, büyük koruma yapılarına ihtiyaç duyulduğu XIX. yüzyılda başlamıştır fakat bu konuda yoğun sistematik çalışmaların XX. yüzyılda başladığı bilinmektedir (Önalp, 2002). XX. yüzyılda zemin inceleme yöntemlerinde büyük gelişmeler sağlanmakla birlikte, yöntemlerin başarısı kullanılan araçların özelliklerine bağlı olduğundan, tasarımda kullanılacak sonuç veriler, istenilen kalite düzeyine ulaşamamıştır (Kramer, 2003).

Geoteknik mühendisliğinde, yapılan çalışmalar ve araştırmalar sonucunda elde edilen, bilgi ve teknoloji birikiminin ortaya çıkardığı büyük gelişmelere rağmen, çok sayıda belirsizlik hakkında varsayımlar yapılmakta ve hesaplarda büyük güvenlik katsayıları kullanılmaktadır. Bu belirsizlikler zemin koşulları ve yapısı hakkında elde edebildiğimiz bilgilerin sınırlı olmasından ve doğruluğunun kesin olmamasından kaynaklanmaktadır. Tüm zemin araştırmalarında küçük bir numune ya da küçük alan

(nokta) ele alınarak inceleme yapılmaktadır. Titiz çalışmalar yapılırsa dahi, sadece uygun zeminlerde, alındığı sınırlı alanı temsil edebilen sonuçların, daha geniş alanlara uyarlanarak kullanılması uygun olmaktadır.

(Coduto, 2001) ya göre; bu deneyler ve analizler, emsal, sağduyu ve mühendislik yargısı ile değişkenmelidir. Temel mühendisliği, halen bir sanat ve bilimdir. Temel mühendisliğini veya herhangi bir mühendislik dalını tasarım için birkaç reçete kullanarak basitçe izlenecek bir formüller ve abaklar koleksiyonu olarak görmek tehlikelidir.

Zeminlerden elde edilen verilerin niteliği, zeminlerin yapısından kaynaklandığı gibi kullanılan inceleme yöntem ve araçlarından da etkilenmektedir. Zemin inceleme araçlarının da çok etkilediği belirsizlikler yüzünden, geoteknik mühendisliğinin, hala sanat olarak icra edilmesi gereken bir bilim olarak görülmesi, bu alanda elde edilen verileri belirlemede kullanılan yöntem ve deneylerin, geliştirmeye ihtiyacı olduğunu düşündürmektedir.

Kullanılan yöntem ve araçların zemin şartlarına uygun olması, elde edilen verilerin istenildiği gibi kaliteli olmasını sağlayabilmektedir. Fakat, gerekli tüm verilerin, tek araçla ya da yöntemle istenilen kalitede elde edilemediği zemin şartlarında, birden fazla araç ve/veya yöntemin kullanılması zorunlu olabilmektedir. Bu durumun bir sonucu olarak, Türkiye, yönetmeliklerle çoğu zeminin, sondaj beraberinde en az bir yerinde deneyle araştırılmasını kurala bağlamıştır. Zemin incelemelerinin ekonomiyi göz ardı edemeyen faaliyetler oluşu, çok uzun ve detaylı araştırma yapmanın hem maliyeti yükseltmesi hemde zaman gerektirmesi birden fazla deneyi aynı anda yapabilen araçların geliştirilmesini teşvik etmektedir.

Zemin araştırmalarının, yeteri kadar ve güvenilir verileri vermeyecek biçimde yetersiz araçlar ve yöntemlerle icra edilmesi, ya güvenlik sorunu oluşturmakta ya da tasarımcılar tarafından büyük güvenlik sayıları kullanılarak ekonomiden uzaklaşılmasına neden olmaktadır. Özellikle bina zeminlerinde, can güvenliğini ilgilendirdiğinden zemin incelemenin, en uygun aletlerle ve yöntemlerle olabildiğince titiz yapılmasını gerektirmektedir. Zemin incelemelerinde elde edilen

verilerin kalitesi zemin cinsine, kullanılan araç ve yönteme bağlıdır. Bazı durumlarda tek araç ve tek yöntemle elde edilen veriler yeteri kadar güvenilir olmamakta ve verilerin birkaç yoldan elde edilerek sağlaması yapılmaktadır.

Zemin araştırma faaliyetlerinden elde edilen veriler, kullanılan araçlara ve yöntemlere bağlı olarak istenilen düzeyde güvenilir olmayabilir. Mevcut zemin araştırma aletleri, bazı zemin özelliklerini belirlemede yeterli olurken bazı zemin özelliklerini belirleyememekte ya da yetersiz kalmaktadır. Bu durum birçok özelliği aynı anda belirleyebilen aletlerin tasarımına ihtiyaç olduğunu düşündürmektedir. Yerinde deneylerin, alınan numunelere uygulanan laboratuvar deneylerinden bağımsız deneyler olarak icra edilmesi, numune alma sırasında zemin özelliklerini belirleyebilen yeni bir yerinde deney aletinin kullanışlı olacağını düşündürmüştür.

Günümüzde en yaygın kullanılan arazi deney aletleri penetrometrelerdir. Kullanımlarının avantajı nedeniyle dünyanın tüm bölgelerinde değişik tipte penetrometreler kullanılmaktadır. Penetrometreler zemin özelliklerini yerinde hızlı bir şekilde belirleyebilen aletlerdir. Penetrometreler, tasarımlarının durumuna göre zeminin özelliklerini belirlemeye yönelik veriler sağlamaktadır.

Günümüzde zemin araştırmalarında çoğu tasarımcı tarafından güvenilen en temel yöntem, araziden tüplerle alınan numunelerin laboratuvarında deneye tabi tutularak zemin parametrelerinin belirlenmesi yöntemidir.

Birçok avantajları nedeniyle yaygın kullanılan penetrometrelerin, laboratuvar deneylerinde kullanmak üzere numune alacak şekilde tasarlanması amacıyla bu çalışma yapılmıştır. Çalışmada tasarlanacak aletin hem numune alıcıların, hem de penetrometrelerin görevini aynı anda yapabilmesi hedeflenmiştir.

Tasarlanan penetrometrenin mevcut alet ve yöntemlere uygun ve uyumlu olması hedeflendiği için bir bölümü Standart Penetrasyon Deneyinde (SPT) kullanılan kaşığa benzer boyutlarda tasarlanmıştır. Böylece, SPT deneyi için yüzyıla yakın sürede elde edilen bilgi ve tecrübelerin, tasarlanan penetrometreden elde edilecek veriler içinde kullanılabilir ya da uyarlanabilir olabileceği düşünülmüştür. Tasarlanan

penetrometre zemine statik itilecek şekilde tasarlandığından elde edilen numunelerin, SPT deneyinden elde edilen numunelerden daha kaliteli olacağı düşünülmüştür. Ayrıca ölçümler penetrometre ucunda yapılabileceğinden SPT deneyinde yapılacak düzeltmelere de gerek kalmayacağı ve dolayısıyla verilerinde daha güvenilir olacağı düşünülmüştür.

Mevcut penetrometrelerde, uç direnci yanında sürtünme gerilmesi ölçülmekte ve bu iki değer birlikte kullanılarak zemin cinsi belirlenebilmektedir. Yeni penetrometre, sürtünme ceketli tasarlanarak, Konik Penetrasyon Deneyinden (CPT) elde edilen tüm verilerin deney sırasında toplanması, yani; tasarlanan penetrometrenin, CPT deneyinin görevini de görmesi hedeflenmiştir.

Presiyometreler, zeminin basınç gerilmelerine verdiği tepkiyi belirlemede başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Sürtünme ceketleri, basınç gerilmelerinde ölçecek şekilde tasarlandığında, zeminin gerilme durumu hakkında bilgi edinileceği düşünülmüştür. Numune alabilen penetrometreye, çevre basıncını da ölçebilecek şekilde donatılan sürtünme ceketleri de eklenerek, hem sürtünme gerilmesinin hemde çevre basıncının ölçülmesi hedeflenmiştir.

Sürtünme ceketleri, farklı çaplarda iki adet tasarlanarak basınca karşı zeminin davranışının belirlenebileceği düşünülmüştür. SPT kaşığı boyutlarındaki ilk sürtünme ceketinden sonra daha geniş bir sürtünme ceketleri daha eklenerek, zemin genişletilirken oluşan farklı basınçlara karşı zeminin davranışının belirlenmesi hedeflenmiştir.

Ceketlerde oluşacak sürtünme kuvvetleri, sürtünme ceketlerinin yüzeyinde oluşan gerilmelerin toplamı olmaktadır. Sürtünme kuvvetlerinin, yüzeye gelen basınçların büyüklüğünden etkileneceği düşüncesi ile farklı basınçlarda, farklı sürtünme gerilmeleri oluşacağı ve bu iki değer oranının, zeminin içsel sürtünme açısıyla orantılı olacağı düşünülmüştür. Sürtünme ceketlerine etki eden basınç gerilmesine karşılık oluşan sürtünme kuvvetinin içsel sürtünme açısıyla ilintisi belirlenerek, içsel sürtünme açısının tasarlanan aletle belirlenebileceğinin gösterilmesi hedeflenmiştir.

Zemin inceleme faaliyetlerinde, hem arazi deneyleri, hemde numune alarak laboratuvar deneyleri yapmak zaman aldığı ve maliyetleri artırdığı için bu iki işi birlikte yapacak bir alet tasarlanması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, numune alma sırasında uç direnci, iki farklı çaptaki sürtünme ceketiyile sürtünme gerilmeleri ve çevre basıncının ölçülebildiği yeni bir penetrometre tasarlanması amaçlanmıştır.

1.2. Zemin Araştırmalarının Önemi ve Yöntemleri

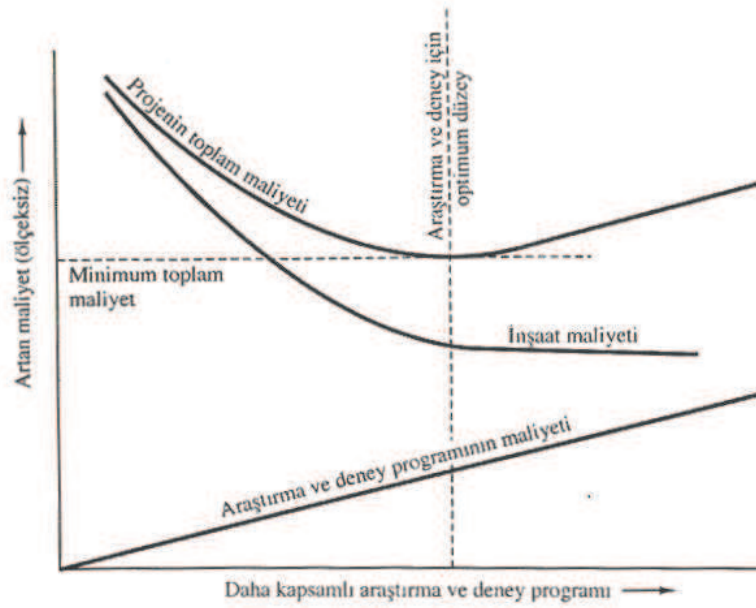
Saha incelemesinin, inşaat işinin zorunlu, gerekli ve faydalı bir parçası olduğunu, sadece ilgili uzmanlar ve yokluğundan zarar görmüş az sayıda insan bilir. Ne yazık ki bu iş; resmi prosedürü yerine getirmek için çok değerli para ve zaman harcanması gereken, çok az değer katan ve çekilmesi zorunlu çileli bir işlem olarak görülmektedir (Clayton vd., 1995).

Öncelikle bilinmesi gereken, saha inceleme işinin bilimsel bir iş olduğudur. Bu yüzden saha inceleme bilgili ve tecrübeli kişiler tarafından bir plan çerçevesinde yapılmalıdır. Yapılan bir çalışmanın değerinin olması ve amacına ulaşması için uzmanlar tarafından planlanması şarttır. Ülkemizde saha inceleme gereksiz masraf gerektiren bir işlem olarak görülmektedir. Ancak unutulmamalıdır ki; inşaatla ilgili önceden görülmeyen masrafların çoğu geoteknik kökenlidir. İnşaatla ilgili önceden görülmeyen masraf artışlarının çoğunun, saha incelemesi kökenli olduğunun Osmanlı İmparatorluğu tarafından da fark edilmesi üzerine, yapı maliyetlerinin planlananın üzerine çıkmaması için zeminin (toprak) iyi incelenerek ek fiyat artışına neden olunmaması yönünde padişah fermanı yayınlanmıştır.

Saha inceleme şu amaçlara yönelik yapılabilmektedir; yer seçimi, temel ve toprak işlerinin tasarımı, geçici işler tasarımı, önerilen projenin çevresine etkisi, mevcut yapı zemininin incelenmesi, çözüm çalışmalarının tasarımı ve güvenlik kontrolleri (Clayton vd., 1995).

Zemin araştırmalarının bir yandan tüm ticari faaliyetler gibi ekonomiyi göz ardı edemeyen faaliyetler oluşu, diğeryandan büyük yatırımlar gerektiren yapıların güvenliğini doğrudan etkilemesi, boyut ve hassaslık düzeyinin planlanarak çok iyi belirlenmesini zorunlu kılmaktadır. Heterojen, karmaşık ve diğerymalzemelerden farklı davranış özelliklerine sahip zemine yönelik ve yatırımların güvenliğini etkileyen ekonomik bir faaliyet oluşu her zemin araştırma faaliyetinin farklı plan ve yöntemle yapılmasını gerektirmektedir. (Coduto, 2001) tarafından zemin araştırmalarının kapsamı ile maliyet artışı ilişkileri Şekil 1.1’de verilmiştir.

Zemin araştırmalarının, kendi maliyetine göre çok daha büyük maliyetli yapılar ile can güvenliğini etkilemesi, yeteri kadar detaylı, olabildiğince doğru ve güvenilir olmasını zorunlu kılmaktadır. Bu yönüyle zemin araştırmalarının zorunlu olarak sağlaması gereken şartları, ilgili projede can ve mal güvenliği için gerekli ve/veya zorunlu şartlar öncelikle belirlemektedir. Bir zemin etüdü yapı güvenliğini tehlikeye atacak kadar basit ve proje için gerekli zemin parametrelerinin tümünü eksiksiz vermeyecek kadar sınırlı yapılamayacağı bilinmektedir. Diğeryyandan inceleme sırasında çalışanların, komşu yapıların ve halkın güvenliğini tehlikeye atacak şartlarda gerçekleştirilmesine genellikle yerel kanun ve kurallar izin vermemektedir.



Şekil 1.1. Zemin araştırmaları kapsamı ile maliyet artışı ilişkisi (Coduto, 2001)

Birçok yönden karmaşık olan zeminlerin araştırılması, ölçüm yapılması ve tanımlanması zor, pahalı ve karmaşık bir iştir. Standart, homojen ve kolay anlaşılabilir olmayan zeminlerde, ölçüm yapılması ve tanımlanması zor olduğundan derin teorik bilgi yanında uzun tecrübeye dayanan uygulama bilgisini zorunlu kılan zemin araştırmalarında olabildiğince çok, güvenilir ve tasarımcıların işine yarayacak veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Zemin incelemesiyle uğraşan teknik elemanların, teorik ve tecrübeye dayalı bilgilerini, doğru sonuçlara gitmede kullanabilmeleri için yeterli sayıda ve gerekli doğrulukta veriye ihtiyaçları bulunmaktadır. Fakat daha fazla bilgi ve veri elde edilmesi, daha fazla deney, daha fazla çalışma ve daha fazla kaynak gerektirmektedir. Zeminlerin karmaşık malzemeler olması, zemin incelemesi öncesi planlamada ihtiyaç olmadığı öngörülen bir veriye, inceleme ya da tasarım çalışmalarının bir aşamasında ihtiyaç duyulabilmesi yada tersine, planlama aşamasında ihtiyaç olduğu ya da olabileceği düşüncesiyle yapılmasına karar verilen bir çalışmanın gereksizliği, inceleme yada tasarımın herhangi bir aşamasında anlaşılması gibi zorlukları beraberinde getirmektedir. Bu zorluklar ve her zemin inceleme çalışmasında tüm deneylerin yapılmasının gereksizliği ve imkânsızlığı, iyi bir planlama ile sadece gerektiği kadar detaylı, uygun büyüklükte ve gerekli tüm verileri eksiksiz sağlayacak bir zemin incelemesinin yeterli ve gerekli olduğunu ortaya koymaktadır.

Oluşumları ve değişimleri düzensiz olduğundan zeminlerde istenmeyen bir biçimde düzensiz bir yapıya sahiptirler. Bunun sonucu olarak zeminle ilgili inceleme ve araştırma faaliyetleri zor ve sıkıcı işler olmaktadır. Bu alanda zorluklar, gelişmelerin yavaş olmasını beraberinde getirmektedir. Geoteknik bilimi henüz kavram ve kurallarını tam yerleştirmiş bir bilim dalı olamamıştır. Bunun en önemli nedenlerinden biri zeminin, aralarında moleküler bağlar bulunmayan üç fazın karışımından (katı, sıvı ve gaz) meydana gelen heterojen bir malzeme olmasından ve bünyesel yapısının bir sonucu olarak zeminin gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) grafiğinin zamandan önemli ölçüde etkilenmesinden kaynaklanmaktadır. Bunun bir sonucu olarak diğer birçok malzemeye uygulanabilen basit reolojik modeller zeminde tatmin edici sonuçlar vermemektedir.

Zeminler elastik olmadıkları gibi elasto-plastik modellerde pek uyum göstermeyen jeolojik malzemelerdir. Bir başka anlatımla; killer başta olmak üzere birçok zemin türünde yenilme gerilmesinin tanımlanması dahi zordur. Bunun sonucu da zeminler en karmaşık mekanik özellikler gösteren malzemeler olarak tanımlanırsa bu pekte abartılmış bir görüş olmaz. Zemin davranışının diğer tüm malzemelerden farklı kırılma teorileriyle ve formüllerle açıklanmaya çalışılması zeminin bu karmaşık ve diğer malzemelerden farklı davranış özelliklerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bazen çok karmaşık ve farklı olabilen bu davranış özelliği farklı zemin çeşidi ve şartlarında çok farklı araştırma ve inceleme yöntemleri kullanılmasını gerekli kılmaktadır (Önalp, 2002).

Tüm mühendislik hizmetlerinde geçerli olan, emniyetli-estetik-ekonomik olma kuralı zemin inceleme faaliyetleri için de geçerli olmaktadır. Bu kuralların hepsinin birlikte sağlana bilmesi için zemin inceleme faaliyetlerinin, bazı kurallar ve inceliklere uyularak bir plan dâhilinde gerçekleştirilmesi gerektirmektedir. Zemin etüdü işleri sonuçta ticari yönü olduğundan iyi planlanarak gereksiz maliyetlere girilmeden yürütülmesi gereken bir faaliyet olurken, mal ve can güvenliğini ilgilendirdiğinden dolayı da yeterli titizliğin gösterilmesi gereken bir faaliyettir.

Saha incelemelerinin nasıl yapılması gerektiği hakkında farklı görüş ve öneriler bulunmaktadır. Yapı önemi dikkate alınarak saha incelemelerinin çeşitli şekillerde yapılması gerekmektedir. Geoteknik araştırmalar, hesaplamalar ve yapı kontrol işlemlerinin nitelik ve kapsamı için en az şartları tesis etmek için can ve mal kaybı da dikkate alınarak, can ve fazla mal kaybının beklenmediği önemsiz yapılar ile diğer yapıları ayırt ederek yapılır.

Bu bakımdan yapılar üç sınıfa ayrılır;

Sınıf 1-Sadece küçük ve nispeten basit yapıları kapsar

Sınıf 2-Normal tehlike, alışılmış zemin şartları ve geleneksel yapı ve temelleri kapsar

Sınıf 3–Sınıf 1 ve 2 ye dahil olmayan işleri kapsar. Olağan üstü tehlike, alışılmış dışı veya az rastlanır zemin ve yükleme şartlarına sahip, çok büyük ve yüksek deprem tehlikesine sahip bölgelerdeki yapıları kapsar.

(Clayton vd., 1995) ne göre arazi inceleme değişik yaklaşımlarla yapılır;

1. Yaklaşım (Büro çalışması ve geoteknik danışmanlık): Tatmin edici bir inceleme için yapılması gereken minimum işlerdir. Arazi hakkında teknik sorumlu (statiker inşaat mühendisi) tarafından iyi bilgilendirilmiş bir geoteknik uzmanı tarafından arazinin gezilmesidir.

Bu yaklaşım rutin inşaat işlerinin yapılacağı, tekdüze zemin özelliklerinin bulunduğu işler için tatmin edici olacaktır. Özellikleri iyice belirlenmiş zeminde hafriyattan sonra bilgilerin doğruluğu ve anormalliklerin olup olmadığının kontrolü için yapılan inceleme de bu yaklaşımla yapılmaktadır.

2. Yaklaşım (Standart zemin incelemesi): Çoğu projeler için normal prosedürün izlendiği kapsamlı bir inceleme yapılması gerektiği yaklaşımdır.

Bu yaklaşımda yapılması gerekenler;

- Büro çalışması ve arazi gezisi yapılır
- Önerilen projenin şartları tam olarak öğrenilir
- Zeminle ilgili imalatlar belirlenir (kazı, yarma, istinat duvarı vb.)
- Karşılaşılması beklenen zeminler için literatür taraması yapılır
- Yapılacak işlemler ve deneyler belirlenir
- İş ve işlemler planı hazırlanır ve uygulanır
- Elde edilen verilerin tutarlılığı ve doğruluğu incelenir
- Uygulanan işlem ve yöntemlerde hata ya da eksiklik görülürse gereği yapılır.

3. Yaklaşım (Gözlem ile birlikte sınırlı inceleme): Bazı projelerde, maliyeti düşürmek için başlangıçta sınırlı inceleme yapılarak inşaat sırasında gerektiği kadar detaylı inceleme yapılması ve tasarım düzenlemesine gidilmesi mümkün olabilir. Zeminin doğal değişikliklere sahip olduğu durumlarda geoteknik mühendisleri tasarım hesaplarında tahminden kaçınarak daha tedbirli davranabilirler. Böyle bir durumda kazı sonrası daha gerçekçi değerlere göre tasarımın revize edilmesi daha doğru ve ekonomik olabilmektedir.

4. Yaklaşım (Peck tarafından geliştirilen dikkatlice planlanan bir yaklaşımdır): Peck, zemin ve kayaların doğal değişimlerinden kaynaklanan kaçınılmaz bilinmeyenlerle mücadelede kullanılacak yöntemleri üç grupta toplamıştır.

- Sınırlı inceleme yap ve tasarımda büyük güvenlik faktörü kullan
- Sınırlı inceleme yap ve tasarımda tecrübelerine uygun tahminlerde bulun
- Çok ayrıntılı inceleme yap

İlk iki yöntemin önemli projelerde kullanılamayacağı açıktır (Clayton vd., 1995).

Türkiye’de saha incelemelerinin; bina ve bina türü yapıların projelendirme safhasında gerekli olan zemin ve temel etütlerinin, uygun ve standart bir metotla yapılabilmesini sağlamak amacıyla Bayındırlık ve İskân Bakanlığı’nın 28.06.1993 tarihinde ve B09.0.YFK.0.00.00.00-6-5/373 sayı ile yayımladığı "Zemin ve Temel Etüdü Raporunun Hazırlanmasına İlişkin Esaslar" genelgesi doğrultusunda yapılması yasal zorunluluktur.

Bu genelgede şu ifadeler bulunmaktadır; "Zemin ve Temel Etüdü Raporunun Hazırlanmasına İlişkin Esaslar" genelgesinde bildirilen hükümler, Zemin ve Temel Etüdü Raporu içeriğine yönelik asgari kurallar olmakla birlikte, raporu hazırlayanlar tarafından gerekli mesleki bilgiler ile ilgili standartlar ve güncel bilimsel çalışmaların göz önünde bulundurulması zorunludur.

Amaca göre farklılıklar gösterebilecek inşaat projeleri, jeolojik koşulların değişken olması, Zemin ve Temel Etüdü Raporu içeriğinde bir takım farklılıkların oluşmasına neden olmakla birlikte, raporu hazırlayanlar tarafından burada belirtilen hükümlere uyulması gerekmektedir.

“Zemin ve Temel Etüdü Raporunun Hazırlanmasına İlişkin Esaslar” da belirtilen yapı ve zemin koşullarının etüt kategorilerinden; 1. kategori için “Gözlemsel Zemin Etüt Raporu”; 2. ve 3. kategoriler için “Sondaja Dayalı Zemin ve Temel Etüt Raporu” düzenlenmesi gerekmektedir.

Bayındırlık ve İskan Bakanlığının yayımladığı genelgede, zemin etüt raporlarının kategorilerine göre aşağıda verildiği şekilde yapılması belirtilmiştir;

A. Gözlemsel zemin etüdü raporu:

Bayındırlık ve İskan Bakanlığı'nın "Zemin ve Temel Etüdü Raporunun Hazırlanmasına İlişkin Esaslar" Kategori-1'de yer alan binalar için; imar planına esas jeolojik-jeoteknik rapordan inceleme alanı ve çevresine ilişkin jeolojik bilgiler alınıp yapı parselinde muayene çukuru açtırılarak, mevcut şev aynalarının ve çevre yapılarının incelenmesi sonucunda "Gözlemsel Zemin Etüdü Raporu" hazırlanacaktır.

B. Sondaja dayalı zemin ve temel etüdü raporu:

Bayındırlık ve İskan Bakanlığı'nın "Zemin ve Temel Etüdü Raporunun Hazırlanmasına İlişkin Esaslar" başlıklı 93/94 belgesinde; Kategori 2 ve 3 e giren binalarda "Zemin ve Temel Etüdü Raporu" nun; sondaj çalışmaları, arazi deneyleri ve alınan örselenmiş ve/veya örselenmemiş zemin ve karot örneklerinin laboratuvarında gerekli deneylere tabi tutulması sonucunda hazırlanması hükme bağlanmıştır.

Genelge gereği Türkiye'de çoğu projelerde gerekli olan normal zemin etütleri sondajlı ve numune olarak yapılmak zorundadır. Fakat az bir oranda zemin etüdünün basit olarak icra edilmesi yolu açık bulunmaktadır.

Zemin etütlerinde gerçekleştirilen işler standart olmayıp işin önem ve büyüklüğüne göre değişiklik göstermektedir.

1.2.1. Araştırma Çukurları

Yeraltının araştırma çukurları ile incelenmesi, tahmin edileceği gibi yüzyıllar öncesine dayanmakla birlikte, sınırlı bir araştırmanın yeterli görüldüğü durumda günümüzde de tercih edilen bir yöntemdir. Fakat yapı boyutlarının daha derin zemin tabakalarını etkileyecek düzeye çıkması daha derin noktalarda araştırma yapmayı mümkün kılan yöntemleri zorunlu hale getirmiştir. (Clayton vd., 1995).

Araştırma çukurları ile saha incelemede yapılan en yaygın işlemler şunlardır; Saha gezilerek gözlemsel olarak incelenir. Proje inceleme aşamasında edinilen bilgilerin ve sahanın araştırma çukurlarıyla incelenmesi fikrinin doğru olduğu teyit edilir. Sahanın şekil ve büyüklüğüne göre araştırma çukurlarının sayıları netleştirilir ve yerleri belirlenir.

Projeye uygun boyutlarda ve yeterli derinlikte araştırma çukuru kazılır ve zemin profili incelenir. Çukurun uygun derinliklerinden numune alınır. Numuneler incelenmek üzere laboratuvara gönderilerek gerekli deneyler yaptırılır.

Araştırma çukurları zemin dayanımı, tabakalanması ve süreksizlikler hakkında bilgi edinmek için en önemli yoldur. Çok kaliteli blok numuneler ancak araştırma çukurlarından elde edilebilirler (Clayton vd., 1995).

Araştırma çukurları 3-4 metreye kadar pratik ve ekonomik olmaktadır. Daha derin araştırma çukurları, ancak kendini tutabilen zeminlerde, yeterli güvenlik önlemlerinin alınmasıyla mümkündür. Araştırma çukurlarının derinlikleri artırılarak araştırmaya devam edilmesi bazı durumlarda uygun olabilir. Bu durumlarda geniş delinmiş shaftlar açılarak zemin incelenmektedir. Bu yöntem özel durumlarda veya iş gücünün çok ucuz olduğu, ekipman temini çok zor olan ülkelerde kullanılmaktadır.

1.2.2. Sondajlar

Yeraltının daha detaylı ve derin incelenmesi gerektiği durumlarda kuyu açılması gerekebilir. Derin kuyu açma işlemine sondaj denilmektedir. Yumuşak zeminlerde sondaj kuyusu açmada kullanılan ekipmanlarının uzun bir geçmişinin olduğu (Jensen, 1969) ve (Whyte, 1976) tarafından bildirilmiştir. Kuyu açılarak zeminin araştırılması, günümüzde başvurulan en yaygın yöntemdir. Yaygın olmasının birkaç nedeni bulunmaktadır. Zemin araştırma amaçlarına büyük ölçüde hizmet edebildiğinden, hızlı icra edilebildiğinden, ekipmanı ve icrası işlevine göre ucuz olduğundan (ekonomik) çok tercih edilmektedir. Diğer yandan çok vasıflı iş gücü gerektirmemesi nedeniyle de diğer alternatiflere karşı tercih edilmektedir.

Kuyu açma (kazma), normalde yüzeye yakın yerlerde bulunan yumuşak ve çimentosuz zeminlerde yapılır. Kullanılan teknikler dünya genelinde çok değişkendir. En çok kullanılan yöntemler burgu ile kuyu açma, yıkama ile kuyu açma ve İngiltere'de çok kullanılan hafif darbeli sondaj yöntemleridir (Clayton vd., 1995). Türkiye'de en yaygın kullanılan hafif darbeli sondaj yöntemidir.

Sondaj (delme) ise, geleneksel olarak, genelde derinlerde bulunan, daha sağlam ve çimentolu killer için kullanılır. Sondajda açılan delikler tipik olarak 75 ile 600 mm arasındadır (Clayton vd., 1995). Sondajlar 3m ile yaygın olarak 15m arasında yapılmaktadır ve bu derinlik incelemenin gereklerine göre artırılabilir.

Sondaj yapılarak zemin profili çıkarılır. Sondaj sırasında zeminden numune alınarak deneye tabii tutularak zeminin özellikleri belirlenir. Sert zeminlerden numune alma işlemi karotiyerlerle yapılır. Yumuşak zeminlerde ise çok değişik tipi ve boyutu olan tüplerle (numune alıcı) ile numune alınmaktadır. Sondaj deliğinde bazı deneyler yapılarak zeminin bazı özellikleri de yerinde belirlenebilmektedir.

Sondaj sırasında karşılaşılan şartlar, kuyu logu olarak anılan özel formatta düzenlenmiş form şeklinde hazırlanır. Bu loglarda derinlikler, geçilen birimler, yer altı su seviyesi, numune alınan noktalar ve uygulanan deneylerin sonuçları belirtilir.

1.3. Numune Alma

Zeminin fiziksel ve kayma dayanımı parametrelerinin laboratuvar ortamında belirlenebilmesi için zeminden malzeme alınmasına numune alma denilmektedir.

Laboratuvar deneyleri sonucunda belirlenen parametreler, fizibilite, değerlendirme, hesap ve projelere veri teşkil etmektedir. Bu nedenle zemin parametrelerinin olabildiğince doğru tespit edilmesi ve doğruluk düzeyinin bilinmesi gerekmektedir. Fakat çoğunlukla numunenin geçmişi ve mevcut olumsuzlukları bilinmediğinden elde edilen verilerin doğruluk düzeyi tam olarak tespit edilememektedir. Özellikle

kuyulardan numune alma işlemleri izlenemediğinden numunenin maruz kaldığı olumsuzluklar bilinmemektedir.

Laboratuvar deney sonuçları numunenin sahip olduğu özelliklerden büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu yüzden numunelerin mümkün olduğunca uygun özelliklerde alınması gerekmektedir. Fakat bazı durumlarda elde edilen numuneler istenen özelliklere sahip olmayabilmekte ya da daha sonra özellikleri bozulabilmektedir. Şartlardan dolayı numune, istenen özelliklerde (uygun yöntemle, uygun boyut ve şekilde) alınamayabilmektedir.

Laboratuvar deney sonuçları, numune özelliklerinden çok etkilenmektedir. Öyle ki laboratuvar deney sonuçları en fazla numune kalitesi kadar doğru ve güvenilir olabilmektedir. Numune kalitesi, numune alma sırasında ya da deney sırasında bozulabilmektedir. Numune kalitesini etkileyen faktörler şu şekilde sıralanabilmektedir.

Numune boyutu: Numune boyutlarının zeminin yapısını temsil edecek boyutlarda olması gerekmektedir. Özellikle dane boyutunu dikkate alarak yeteri kadar büyük boyutlarda numune alınması gerekmektedir. Numune küçük boyutunun en az, en büyük dane çapının 5-10 katı olması gerekmektedir. Numune boyutunun önemli bir etkisi, arazide ya da laboratuvarında ölçülen drenajsız kayma dayanımının değişmesidir. Numune boyutunun kayma dayanımı üzerine etkileri hakkında, (Bishop ve Little, 1967) ve (Agarwal, 1968) Londra kilinde yapılan çalışmalarını rapor etmiştir.

Zemin cinsi: Kohezyonlu zeminlerden bozulmamış numune alınabilirken, kohezyonsuz zeminlerden ya da süreksizlik içeren zeminlerden kaliteli numune elde etmek zor ya da imkânsız olmaktadır.

Büyük daneler içeren zeminlerden, zemin yapısını temsil edecek büyüklükte numune almak çok zor ve pahalı olduğundan bu tür zeminlerden alınan standart boyutlu numuneler zemin yapısını temsil etmekten uzak, standart laboratuvar deneylerine

uygun olmayan numuneler olmaktadır. Dolayısıyla alınan numunelerden doğru olmayan veriler elde edilmektedir.

Zemin numunelerin içerdikleri su, numune kalitesini etkilemektedir. Fazla boşluk oranı ya da içeriğindeki danelerden dolayı yüksek su muhtevası içeren zeminler numune alma sırasında ya da deney sırasında bozulabilmektedir. Likit limite yakın su muhtevası içeren kohezyonlu zeminler deneyden önce büyük deformasyonlara uğramaktadır hatta mekanik işlem gerektiren deneylerin yapılmayacağı kadar yumuşak olabilmektedir.

Zeminin yapısı: Zemin yapısı, numunenin birçoğu özelliğini etkilediği gibi geçirgenliğini de etkilemektedir. Geçirgenlik ve konsolidasyon hızını etkileyen zemin yapısının laboratuvar deney sonuçlarına etkisi (Rowe, 1968) tarafından incelenmiştir. Kum drenlerinin yerleştirilme gereğinin değerlendirilmesinde geleneksel 76 mm çaplı ve 19 mm yüksekliğindeki ödometre deneylerinden, 250 mm çaplı ve 125 mm yüksekliğindeki konsolidasyon deneylerinden, arazideki geçirgenlik deneylerinden ve arazi kayıtlarından elde edilen konsolidasyon katsayısı (c_v) değerlerini göz önünde bulundurmıştır. Araştırmada aşağıdaki sonuçları elde etmiştir:

- 76 mm'lik ödometre deneylerinin verdiği konsolidasyon katsayıları, tekdüze killer hariç, yanlıştır. Böyle malzemeler de çok ender bulunur.
- Laboratuvardaki deney yönünün arazidekine uygun olması koşuluyla, 250 mm çapında ve 125 mm kalınlığındaki numuneler çoğu yapıyı temsil etmek için yeterli büyüklüktedir.
- Sıkışabilirlik katsayısı (m_v) çoğu yumuşak zeminler için numune boyutuna çok bağlı olmadığından c_v , arazideki sabit seviyeli deneylerden bulunan geçirgenlik değerleri ile birleştirilen küçük laboratuvar deneylerinden (m_v için), makul bir doğruluk derecesinde hesaplanabilir.

1.3.1. Zemin örselenmesi

Zemin mekaniği tasarımlarında kullanılacak deney sonuçlarının güvenilirliği, numune kalitesi ve deney kalitesine bağlıdır. Numune kalitesi zeminin özelliklerinden etkilendiği gibi numune alma yöntem ve ekipmanından da büyük ölçüde etkilenmektedir. Numune kalitesini etkileyen en önemli faktör ise numune örselenmesi olmaktadır.

Zemin örselenmesi kazı veya sondaj, numune alma, muhafaza, taşıma ve deneye hazırlama sırasında gerçekleşebilmektedir. Numune alma sırasında gerilme şartları değiştiğinden, numune muhafaza, taşıma veya deneye hazırlama sırasında mekanik etkilere maruz kalarak örselenebilmektedir. Arazi şartlarında üç boyutlu gerilmelere maruz olan numune, tüpte tek doğrultuda serbest kalmakta, tüpten çıkarıldığında gerilmeler tamamen ortadan kalkmaktadır. Bu etkiler dışında numune, numune alma sırasında ya da uygun koşullarda muhafaza edilememesi nedeniyle, fiziksel ve kimyasal yapısında oluşan değişimlerle de örselenebilmektedir. Numune alma sırasında sondaj suyundan etkilenen numune, açık ortamlarda da su kaybederek örselenebilmektedir. (Clayton vd., 1995) zemin örselenmesinin ana nedenlerinin Tablo 1.1’de ki gibi olduğunu bildirmiştir.

Tablo 1.1. Zemin örselenmesinin ana nedenleri (Clayton vd., 1995)

Numune almadan önce	Numune alma sırasında	Numune almadan sonra
Gerilme rahatlaması	Gerilme rahatlaması	Gerilme rahatlaması
Şişme	Yoğrulma	Numune içinde su göçü
Kompaksiyon	Yer değiştirme	Nem kaybı
Yer değiştirme	Parçalanma	Donma
Taban kabarması	Kesici uçta taşlar	Aşırı ısınma
Borulanma	Karışma veya ayrılma	Titreşim
Yıkılma (caving)	Numune alamama	Kimyasal değişimler
		Çıkarma sırasında örselenme

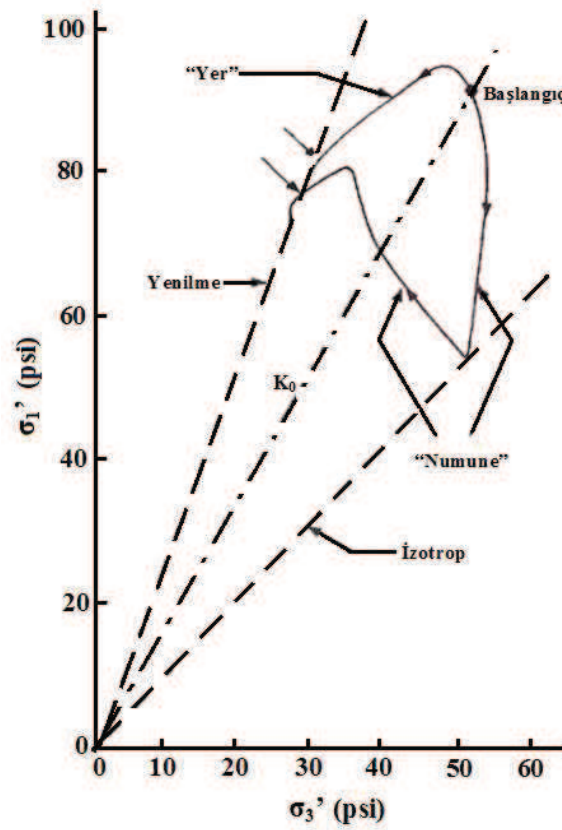
Gerilme rahatlaması: Numune almak için kazılan ya da sondaj açılan zeminde çukur ya da kuyu tabanında gerilme değerleri azalır. Bu azalma numuneyi de doğrudan etkiler ve numune üzerindeki çevre basıncı azalır. Numune almada, numune rahatlatma payı bulunan (uç girişi dar, gerisi daha geniş) tüpler kullanılıyorsa ya da blok numune için numunenin çevresi kazılıyorsa numuneye etkiyen yanal basınçlar sıfıra yaklaşır. Numunenin deneye hazırlanması sırasında, tüpten çıkarılması ile toplam gerilmeler sıfıra inmektedir. Toplam gerilme rahatlaması olarak adlandırılan bu sürecin iki bileşeni olabilmektedir; deviatör gerilmelerin ortadan kaldırılması (mükemmel numune alma olarak adlandırılır) ve ortalama normal gerilmenin sıfıra indirilmesi (blok numune alma olarak adlandırılır).

(Skempton ve Sowa, 1963) yaptıkları bir dizi deneyde mükemmel numune almanın, yoğrulmuş Weald kil numuneleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu deneylerde, örnek olarak bir temel tarafından yüklenen zemin (arazi) ve toplam gerilme rahatlamasına, izotrop gerilme artışına ve tek düze deviatör gerilme artışına maruz kalan bir zemin (numune) için basit bir arazi toplam gerilme izi takip edilmiştir. Şekil 1.2’de deneyin iki kısmı için gerilme izleri görülmektedir.

Gerilme izleri tamamen farklı olsa da, numunenin drenajsız kayma dayanımı tipik olarak zemininkinden sadece %1,5 oranında az bulunmuştur. Skempton ve Sowa'nın deneyleri orta plastisiteli ($w_L = \%46$) killer üzerinde yapılmış olup, toplam gerilmeler kaldırıldığında uygulanan efektif gerilmelerin çoğu K_0 konsolidasyonu şartlarında tutulmuştur.

Şişme: Zemin numunesinin maruz kaldığı basınçlarından kurtulması sonucu gelişmektedir. Bu sırada numunedeki boşluk basınçları azalmakta, daneli zeminler dağılmaktadır ve bazı kohezyonlu zeminlerde de çatlaklar oluşmaktadır.

(Skempton ve Sowa, 1963) doymuş killerde gerilme rahatlaması sonucunda oluşan gerilme değişimlerini incelemişlerdir. Bu gerilmeler özet olarak Tablo 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2. Zemin ve numune alma için gerilme izleri (Skempton ve Sowa, 1963)

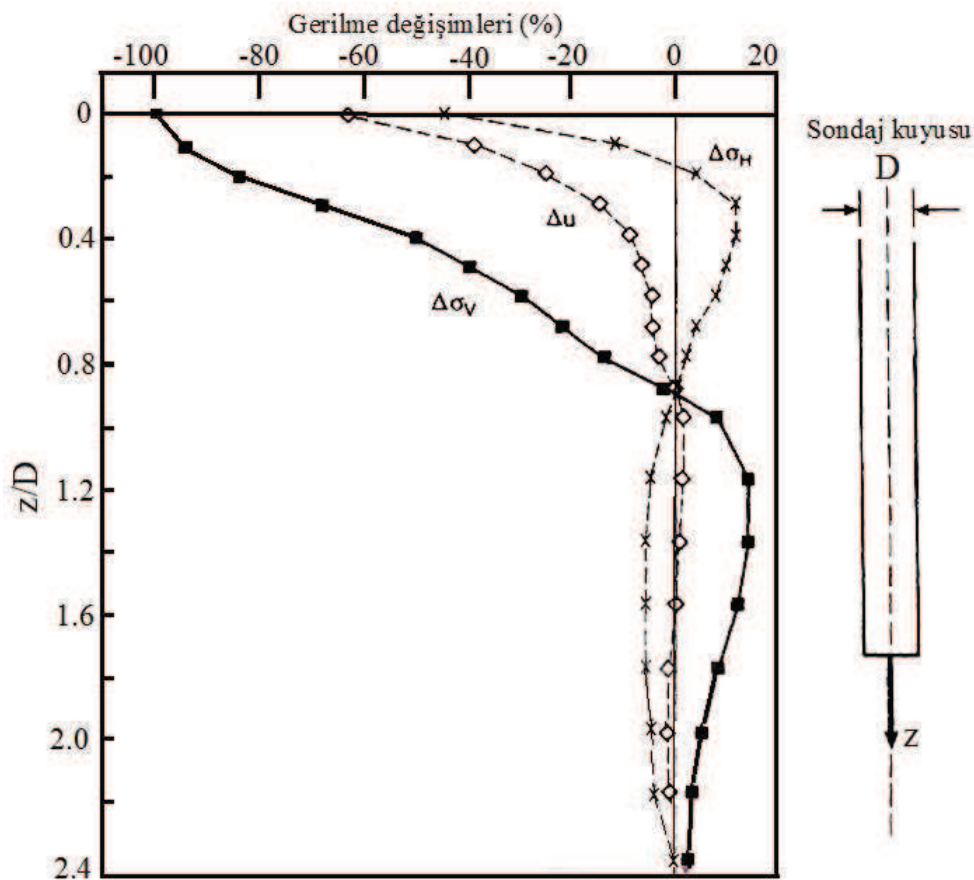
Sondaj veya kazı sırasında örselenme: Sondaj ya da araştırma çukurlarının açılması sırasında numuneye gelen gerilmeler azalmaktadır. Gerilme azalması zemin numunesinin şişmesine neden olmaktadır. Oluşan şişme, gerilmelerde oluşan azalmayla orantılı olarak artmaktadır.

Tablo 1.2. Doygun kilde ortaya çıkan gerilme değişimleri (Skempton ve Sowa, 1963)

Gerilmeler	Yerindeki zemin	Numune almadan sonra
Toplam gerilmeler	σ_v σ_h	0 0
Boşluk suyu basıncı	$+u_0$ $p' = \sigma_v - u$	$+u_k$ p'_k
Efektif gerilmeler	$K_0 p'$	p'_k $= -u_k$

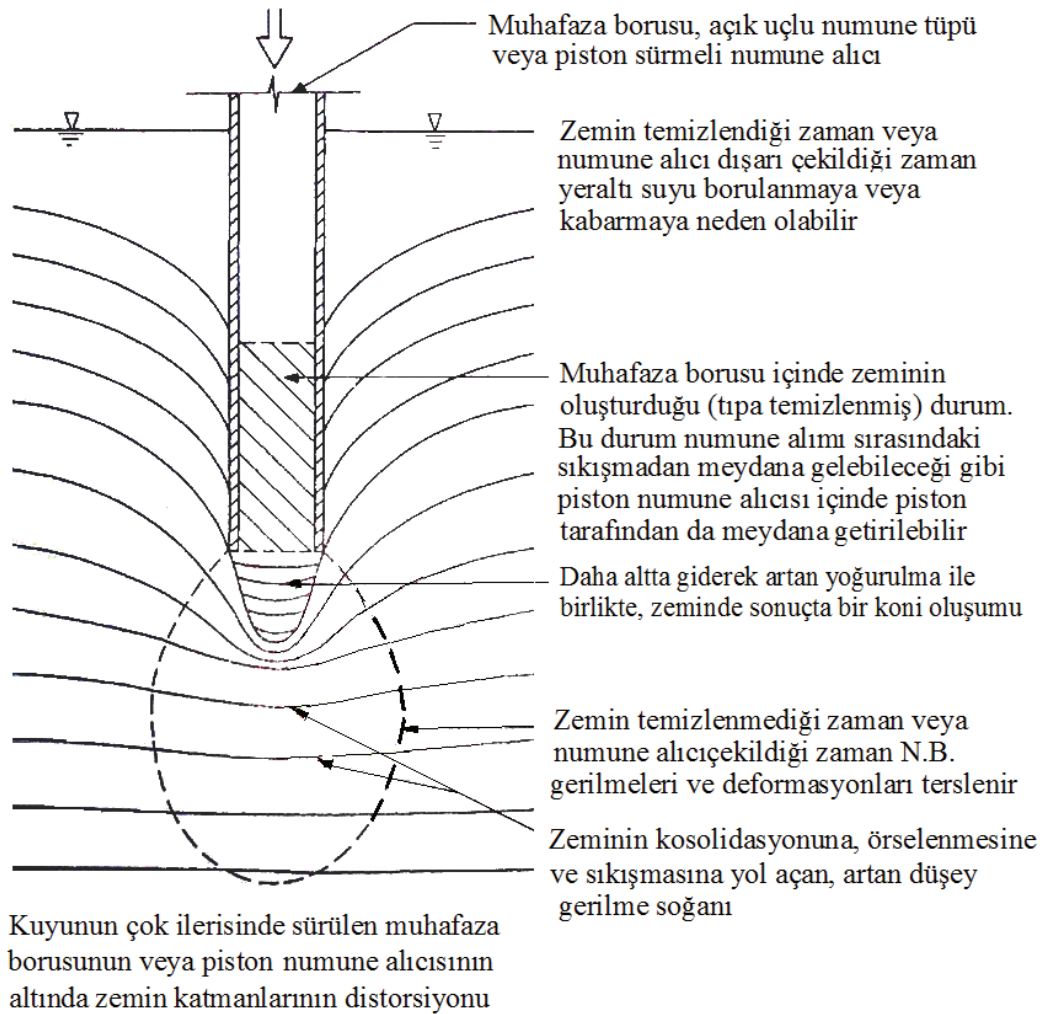
Şekil 1.3’de, kuyu açılmasından kaynaklanan ve kuyunun tabanından aşağıda meydana gelen gerilme rahatlamasının neden olduğu boşluk basıncı değişimini hesaplayan (elastik zemin varsayımında bulunan) analizlerin sonucu görülmektedir (Hopper, 1992). Büyük negatif boşluk basınçlarının oluştuğu ve bunların derinlikle değiştiği kolaylıkla görülebilir. Boşluk basıncı azalmasının düşey yöndeki yayılımı (ve dolayısıyla şişme) yaklaşık bir kuyu çapı kadar olacaktır (Clayton vd., 1995).

Sondaj işleminin muhafazalı yapılması durumunda muhafaza borusunun ilerlemesi sırasında da zemin örselenmektedir. Özellikle dikkatsiz sürülen muhafaza borusunun ucunda ve çevresinde zemin yoğrulmakta ve yer değiştirmeler gerçekleşebilmektedir. Muhafaza borusunun sürülmesi sırasında, boru ucunda sıkışan malzemenin zemini sıkıştırması, yoğurma ve zemin yenilmesine yol açabilir. Bu durumda, kil malzeme yoğrulurken, kumlu zeminler sıkışarak önemli derecede özelliklerini kaybeder.



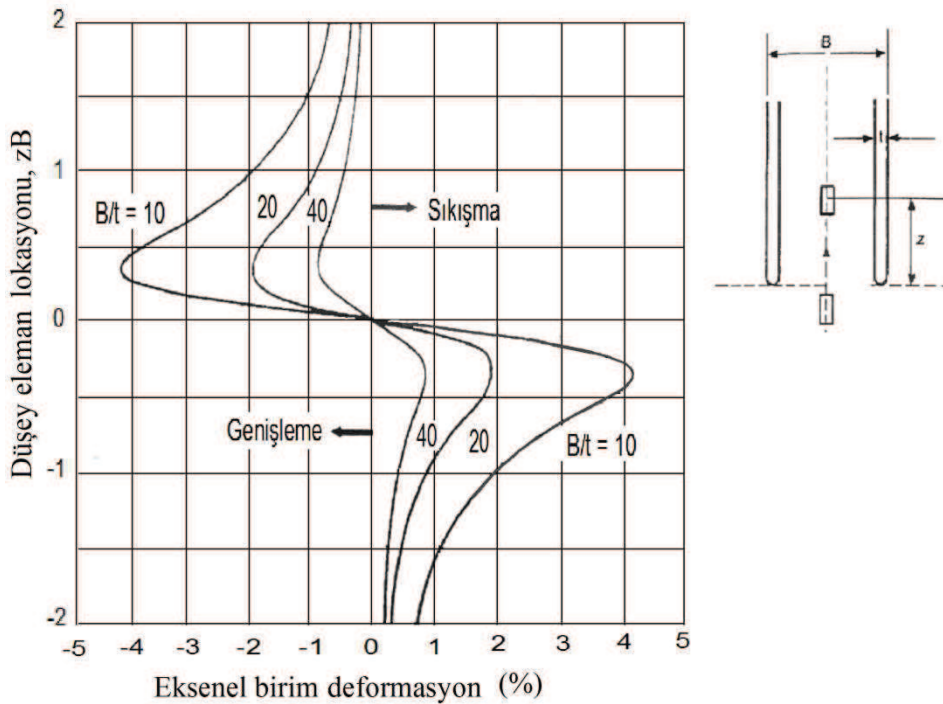
Şekil 1.3. Bir sondaj kuyusu tabanı altındaki zeminde gerilme değişimleri (Hopper, 1992)

Numune alma sırasında numune örselenmesi: Sondaj sırasında muhafaza borusunun dikkatsiz sürülmesi durumunda gerçekleşen örselenmeler numune alınması sırasında da gerçekleşebilir. Numune alıcı tüpün ilerleyebilmesi için, zeminle numune tüpü arasındaki kayma direncinin yenilmesi gerekmektedir. Bu direnç değerini yenebilecek düzeye gelene kadar, numune alıcının ağzındaki zeminin bu gerilme altında kalması gerekmektedir. Gerilme altında, zemin malzemesi sıkışmakta ve yer değiştirmektedir. (Hvorslev, 1949) bir muhafaza borusu veya numune alma tüpünün altındaki zeminde oluşan yer değiştirmeyi, Şekil 1.4'de verildiği gibi tanımlamaktadır.

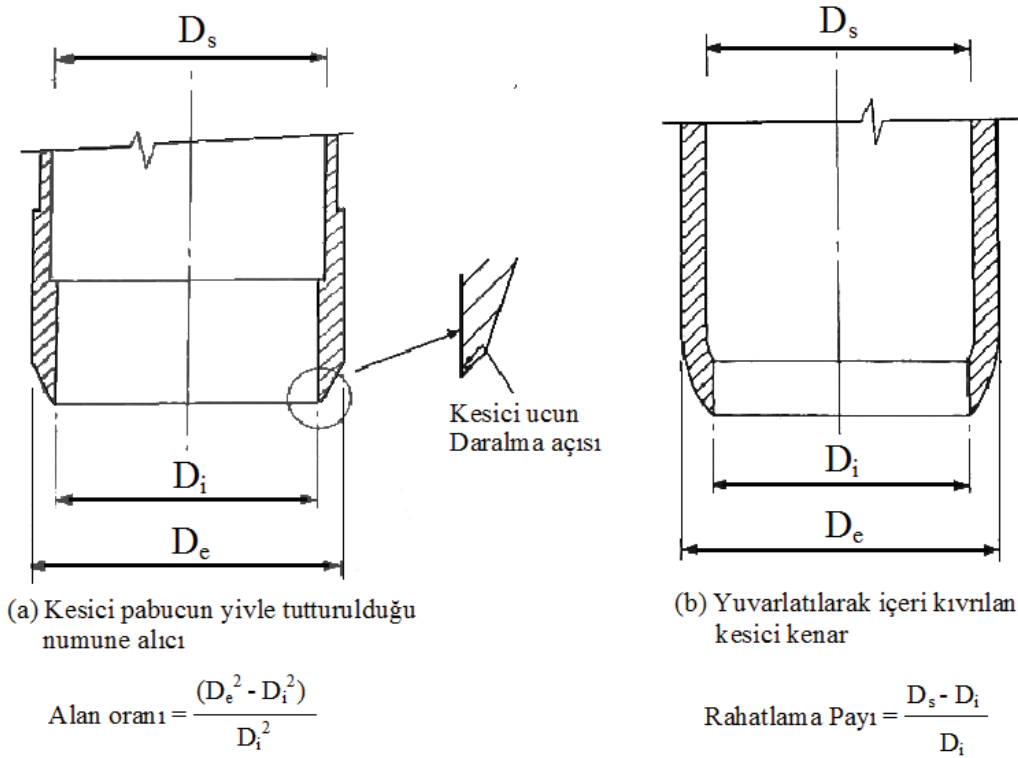


Şekil 1.4. Numune alma tüpünün altındaki zeminde yer değiştirme (çoğu Hvorslev, 1949'dan).

(Baligh, 1985), (Chin,1986), (Baligh vd., 1987), (Siddique, 1990), (Hajj, 1990) ve (Hopper, 1992) numune alıcıların zemine nüfuz etmesini sürekli bir akma problemi olarak incelemiştir. Baligh ve birlikte çalıştığı diğer araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar, tüp içine giren zeminin merkez hattında oluşan birim deformasyonların başlangıçta kısalma ve daha sonra uzama şeklinde olduğunu göstermiştir (Şekil 1.5). Benzeştirdikleri basit tüp geometrisi için (basit numune alıcı olarak adlandırılan) oluşan birim deformasyonların büyüklüğü, numune alıcının kalınlığının genişliğine oranına (B/t) bağlı kalmıştır. (La Rochelle vd., 1987) bu erken ve öncü çalışmalarda kullanılan tüp geometrisinin idealleştirilmesinin gerçekçi olmadığını düşünmüşler ve tüp numune alıcının kesici pabucunun alınan numunenin kalitesi üzerindeki etkisinin büyük olduğuna dair kuvvetli bulgular olduğunu belirtmişlerdir. Sonraları (Siddique, 1990) ve (Hopper, 1992) tarafından yapılan çalışmalar bunun doğru olduğunu göstermiştir. Düz uçlu numune alıcıların (Siddique, 1990) ve basit numune alıcıların (Baligh vd., 1987) kötü tasarımın uç örneklerini temsil ettiği bildirilmiştir. İyi tasarlanmış kesici uç ile, zemine uygulanan makaslama birim deformasyonlarını azaltılmak suretiyle, örselenme önemli ölçüde azaltılabilir.



Şekil 1.5. Basit numune alıcının orta çizgisindeki aksel birim deformasyon tarihçesi (Baligh, 1985)



Şekil 1.7. Alan oranı ve rahatlama payı tanımlamaları (Hvorslev, 1949)

Alan oranı ne kadar düşük olursa numune örselenmesi o derece düşük olmaktadır. Fakat alan oranının çok düşük tutulması, numune alıcının yük altında deforme olmasına yol açabileceğinden mümkün olmamaktadır. Bazı standartlar bu oranı sınırlamaktadır; BS 2001:1957 uygulama kodunda İngiliz Standart açık uçlu numune alıcının maksimum alan oranını %25 olarak tanımlanmıştır. Saha incelemeleri için gözden geçirilmiş Uygulama Kodu'nda (BS 5930) tipik bir açık uçlu numune alıcının alan oranının yaklaşık %30 olması tanımlanmıştır.

Kesici kenarın daralma açısı da zemin örselenmesine neden olmaktadır. Büyük daralama açıları yoğrulmaya ve numune alıcıya daha fazla numunenin dolmaya çalışmasına neden olabilmektedir. Bu açının çok küçük olması ise numune alıcı ucunun bozulmasına neden olmaktadır. Uluslararası Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Topluluğu (International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering- ISSMEFE), (Zemin Numunesi Alma Uygulamaları ve Problemleri Alt

Komitesi, 1965) yaklaşık 75 mm çapındaki numune alıcılar için Tablo 1.3’de verilen alan oranı ve kesici kenar daralma açılarını önermiştir.

Killer için uç daralma açısının 0,3 mm kalınlığa erişene kadar 60^0 olabileceği ve granüllü zeminlerde bu kalınlığın maksimum dane çapının %10 una kadar olabileceği belirtilmiştir.

Rahatlama payı ve L/D oranı: Rahatlama payı; zemin numunesinin tüpe girişte oluşan sıkışmadan kaynaklanan gerilme artışlarının azaltılması ve tüpe giren zeminin çepere sürütünerek ek gerilmelere neden olmasını önlemek için oluşturulan boşluğa denilmektedir. Zemin ile numune tüpü arasındaki etkileşimin oluşturduğu örselenmelere göre, tüpe giren numunenin rahatlatılmasının örselenme etkileri daha azdır. Rahatlama payı, oluşan fazla gerilmeleri azaltacak düzeyde büyük olmalıdır. Fakat numuneyi aşırı derecede serbest bırakarak, aşırı şişmeye ya da dağılmaya neden olmayacak kadar düşük olmalıdır.

Numune alıcı tüpün iç tarafında, zeminin adezyonu ve sürütünmesi, orta boy numune uzunluklarında bile daha fazla zeminin tüp içine girmesini engelleyebilir. Çeper sürütünmesi küçük olduğu zaman, numunelerin kenarındaki zemin katmanlarının birlikte aşağı sürüklenmesiyle zeminde hafif bir kompaksiyon veya sıkışma meydana gelebilir. Önemli derecedeki distorsiyonlar zemin katmanlarında parabolik şekillere neden olabilir. Yumuşak zeminlerdeki gerilme rahatlamasından dolayı, bu distorsiyonları kuyu tabanındaki plastik akmalardan ayırmak zordur.

Tablo 1.3. Alan oranları ile kesici uç daralmasının kombinasyonları

Alan oranı (%)	Kesici uç daralması (derece)
5	15
10	12
20	9
40	5
80	4

Duvar sürtünmesinden ileri gelen büyük etkiler, numune alıcının tabanının altında uzanan zemine aktarılır. En sonunda ise; sürtünme, zeminin tüp içine daha fazla girmesine engel olacak kadar büyük olduğu zaman, numune alıcının tabanının altında uzanan zeminde, taşıma gücü yenilmesi meydana gelir. Zemin önemli derecede yoğrulur ve tüp içine giren herhangi bir malzeme görsel analiz için bile artık bir işe yaramaz hale gelir. Numunelerin devamlı olarak alındığı durumlarda bir sonraki numunenin tepesi de işe yaramaz hale geldiği (Clayton vd., 1995) tarafından bildirilmiştir.

(Hvorslev, 1949) uzun numune alıcılar için %0,75-1,5 arasında ve çok kısa numune alıcılar için de %1,5 yani ortalama şartlar altında %0,75-1,5 oranında bir rahatlama payı önermiştir.

(ISSMEFE'nin Zemin Numunesi Alma Uygulamaları ve Problemleri Alt Komitesi, 1965) raporunda numune alma tüplerinin iç yüzeylerinin pürüzsüz, temiz ve sürtünme açısının düşük olması durumunda, şişmeyen zeminlerde 20 m'ye kadar derinliklerde yapılan numune alma işlemlerinde %0,5-1,0'lik rahatlama payının uygun olacağı önermektedir. Alt komite büyük (>%1-3) rahatlama paylarının numunelerde şekil değişikliğine, fissürlerin açılmasına ve gaz içeren zeminlerin şişmesine neden olduğunu öne sürmüştür; rahatlama payının aşırı büyük olması, numune alıcının dolayısıyla aldığı numunenin kötü olduğunu göstermektedir.

Numune alıcı tüpler içinde kayıcı astar kullanımı rahatlama payına göre tercih edilen bir durum gibi görünmektedir. (Kjellman vd., 1950) ve (Begemann, 1961) tarafından tanımlanan numune alıcılar sırayla folyo ve örme kullanmakta olup, büyük uzunluklarda neredeyse devamlı numuneler verebilmektedirler. Bu tür numune alıcıların en büyük dezavantajları maliyetleridir.

Numune yığılmasını kontrol eden ana etmenlerden biri, numune alıcının boy/çap oranıdır. (ISSMEFE'nin Zemin Numunesi Alma Uygulamaları ve Problemleri Alt Komitesi, 1965) raporunda izin verilebilir boy/çap oranını Tablo 1.4'de zemin türüne bağlı olarak tanımlamıştır.

Tablo 1.4. Zemin türüne bağlı izin verilebilir uzunluğun çapa oranları (ISSMEFE, 1965)

Zemin türü	En büyük uzunluğun çapa oranı
Kil (hassasiyet > 30)	20
Kil (hassasiyet 5-30)	12
Kil (hassasiyet < 5)	10
Gevşek, sürtünmeli zemin	12
Orta gevşek (?) sürtünmeli zemin	6

Numune alıcının zemine itilmesi: Numune alıcının zemine itilmesi işleminin uygun yöntem ve ekipmanla yapılmaması numune örselenmesine neden olabileceği gibi numune alıcı üzerinde de önemli tahribatlara neden olabilmektedir.

Yanlış numune alma yöntemi, numunenin işe yaramayacak düzeyde örselenmesine neden olabilir. İyi tasarlanmamış ve bakımsız bir numune alıcının özellikle sert zeminlere çakılarak itilmesi numunenin örselenmiş numune olarak değerlendirilmesine yol açabileceği gibi bazı örselenmiş numunelere yapılabilen deneylerin dahi yanlış sonuç vermesine yol açabilmektedir.

(Hvorslev, 1949) sürme yöntemlerini numune kalitesine etki yönüyle birlikte Tablo 1.5’de vermektedir. Numune alıcıların zemine çakılması gerektiği durumlarda, numune alıcı kuyu dışına kadar uzanan tije sıkıca bağlanmalıdır. Kuyunun tij çapına kıyasla büyük ve derin olması durumunda, şahmerdan enerjisi kuyu tabanına iletilirken tij eğilmesini önlemek için yanal destekler kullanılabilir.

Çekiçleme işleminin maliyeti düşüktür fakat alınan numunelerin kalitesi kötüdür. Ölçeğin diğer tarafında tek vuruş ya da patlayıcı kullanımı, kontrolü zor olan nispeten büyük bir enerji girdisi sağlar. Açık bir şekilde görülen tehlikelerden biri, numune alıcının çok derine sürülmesi ve içine giren malzemenin sıkışmasıdır. Bu nedenle, sürmeli numune alma işleminde en iyi yöntem basmadır. Modern burgulu sondajların çoğu, herhangi bir kesinti olmaksızın kolaylıkla aşağı doğru muntazam bir hareket uygulayabilir. Fakat, hafif darbeli sondaj için bazı uyum işlemleri yapmak gereklidir (Clayton vd., 1995).

Tablo 1.5. Numune alıcı sürme yöntemleri (Hvorslev, 1949)

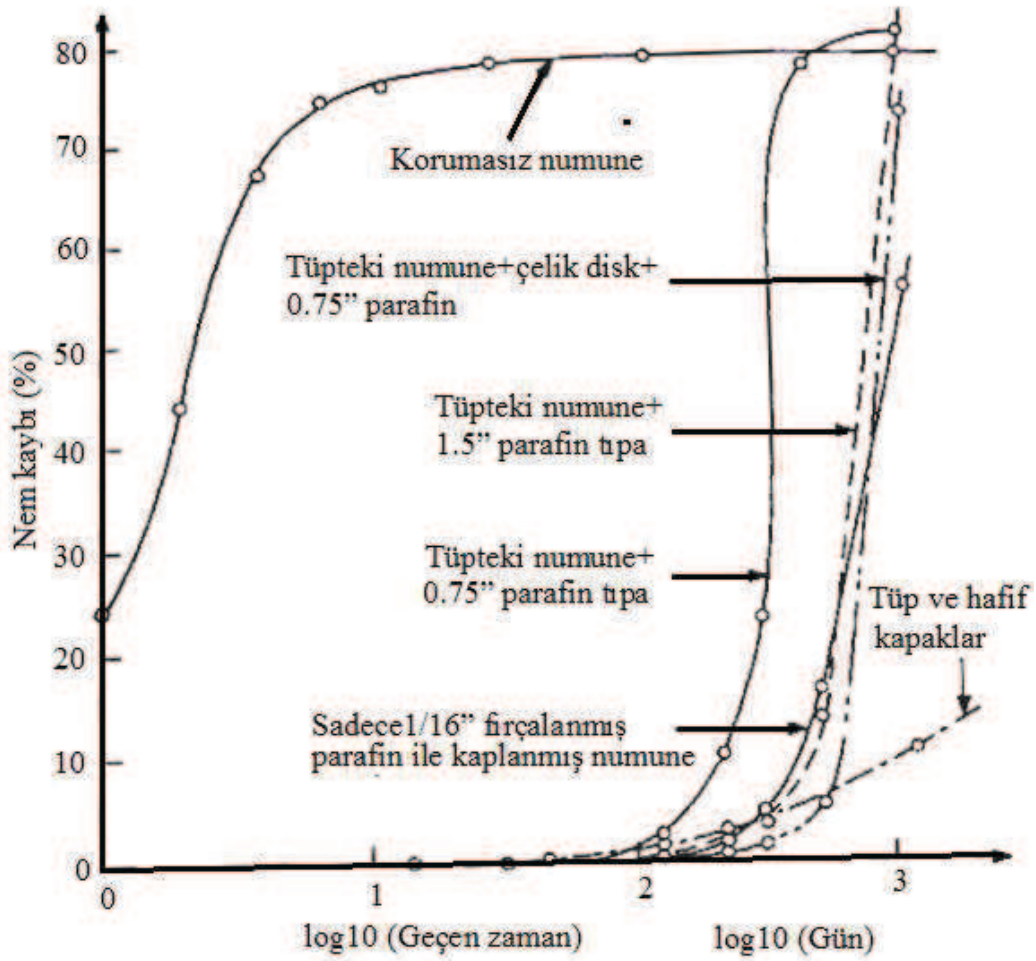
Yöntem	Numune Hareket Kalitesi	
Çekiçleme: Şahmerdanı tekrarlı düşürme	Aralıklı hızlı hareket	En kötü
Krikolama: Manivela veya küçük krikolar	Aralıklı yavaş hareket	
İtme: Sürekli ve dengeli kuvvet	Devamlı tekdüze hareket	↓
Tek vuruş: Ağır şahmerdan düşürme	Devamlı hızlı hareket	
Atış yapma: Patlayıcı kuvveti kullanma	Devamlı çok hızlı hareket	En iyi

Numune alma işleminde, zemin numunesinin örselenmesi kadar numune alıcının zarar görmesi de önemlidir. Çakarak numune alınan yöntemlerde, numune alıcılarda önemli hasarlar oluşmaktadır. Hasarlar düzeltilmeden numune alıcının kullanılması durumunda, numune alımı işlemi düşük başarıyla sonuçlanmaktadır.

Numune almadan sonra örselenme: Numunenin alınmasından sonra saklama hazırlığı ve taşınması da önceki işlemler kadar önemli olmaktadır. Numunenin uygun hazırlık yapılmadan saklanması ya da taşıma sırasında özen gösterilmemesi durumunda önemli örselenmeler oluşabilmektedir. Numunenin nem kaybı ya da nemin numune içi göçü, numune özelliklerinin değişmesine yol açmaktadır.

Nem kaybı, pratikte numune tüplerinin iki ucunun ya da blok numunelerin etrafının parafinle kaplanması ile engellenmektedir. Fakat uygun şekilde yapılmaması durumunda, parafin çatlayarak nem kaybına yol açabilmektedir. Parafin düşük sıcaklıklarda büzülerek çatlayan bir malzeme olduğunda yüksek sıcaklıklarda uygulanmalıdır. Diğer yandan 50 °C'nın üzerindeki sıcaklıklarda eriyen bir malzeme olduğundan, sıcak iklimlerde çok iyi bir yalıtım malzemesi olmadığı unutulmamalıdır.

Parafin işleminden sonra numunelerin plastik torbalara ya da kavanozlara konması nem kaybını önlemektedir. (Hvorslev, 1949) farklı yalıtım yöntemleri ile yaptığı uzun dönem deneylerinin sonuç raporlarını Şekil 1.8'de grafiğe aktarmıştır.



Şekil 1.8. Değişik numune yalıtım yöntemlerinde karşılaşılan nem kayıpları (Hvorslev, 1949)

Zemin numuneleri iyi yalıtıldıkları zaman dış ortama karşı su kaybı yaşamazlar. Fakat numunelerin nem ve cins olarak homojen olmadığı durumda, su bir çeşit zeminden diğerine geçerken (Kimball, 1936) ve (Rowe, 1972), diğerinde farklı rezidüel boşluk basıncının zamanla dengelendiği gözlenmiştir (Casagrande, 1936) ve (Schjetne, 1971). Zamanla numunedeki boşluk basıncı dengelenirken, numunedeki ortalama efektif gerilme ve dolayısıyla laboratuvarında ölçülen dayanım ve sıkışabilirlik de değişmektedir.

(Casagrande, 1936) yumuşak killerde tüp ile numune almada daha yüksek deformasyonlar oluşmasının bir sonucu olarak, numune alımından hemen sonra zemin numunesinin dış katmanında boşluk basıncının orta kısma göre daha yüksek olacağını belirtmiştir. Bu durum başka araştırmacılar tarafından da doğrulanmıştır

(Schjetne, 1971), (Bjerrum, 1973), (Siddique, 1990). (Bjerrum, 1973) yoğrulma ve nem göçüne bağlı olarak, tüpten çıkarılan Drammen kil numunelerinin dıştaki 5 mm'lik kısmının su içeriğinin iç kısma göre %3-4 daha düşük olduğunu göstermiştir.

Dondurma: En kötü örselenmeler özellikle kil ve silt numunelerinin donması durumunda oluşmaktadır (Kallstenius, 1958). Zemin suyunun donması sonucu, su emme düzeyi yüksek kaya numuneler dahi parçalanarak dağılabilmektedir. Sıcaklığın 4 °C'nin altına düştüğü durumlarda donma etkileri başlar ve numune bünyesindeki su molekülleri kristalleşmeye başlar. Don etkisine maruz kalmış numuneler ileri derecede örselenmiş numuneler olarak kabul edilir.

Titreşim, şok ve mekanik örselenme: Özellikle siltli, kumlu veya çok yumuşak killer gibi zeminlerin yatay olarak yerleştirilmiş tüplerle laboratuvara taşınması sırasında oluşan titreşimlerin zeminde dayanım kaybına ve yoğrulmaya neden olabildiği bildirilmektedir (Kallstenius, 1963). Numune tüplerinin taşınması sırasında sıkışma etkisiyle şekli değişmektedir. Şekil değişikliği koruyucu parafinin çatlayarak zarar görmesine neden olmakta ve numune nem kaybına maruz kalmaktadır.

Tüpten çıkarma: Numunenin örselenmesini önlemek için tüpten çıkarma işlemi çok dikkatli ve usulüne uygun olarak ve uygun cihazlarla yapılmalıdır. Örselenmeyi önlemek için, numune çıkarma işlemi, iyi numune almak için gerekli prensiplere uyularak yapılmalıdır. En iyi yöntem sürekli hareket yeteneğine sahip bir sistemle hızlı çıkarılmasıdır. En yaygın kullanılan sistem hidrolik sistemdir.

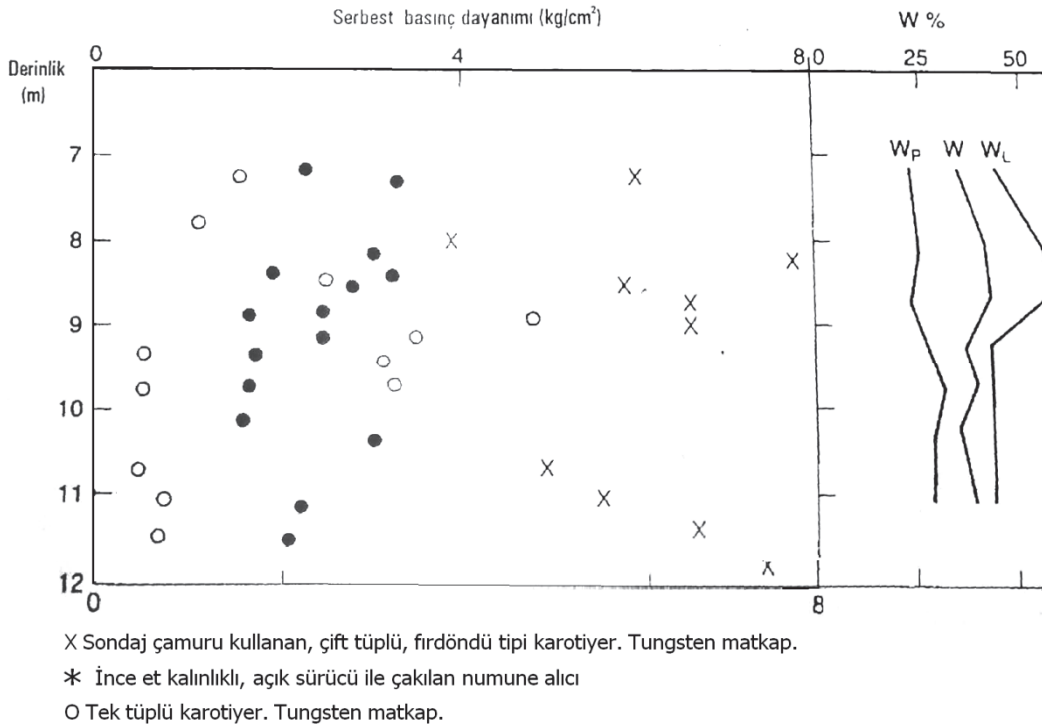
Zemin-tüp arasındaki reaksiyonlar: Deney öncesinde tüplerde bekletme süresi uzadığında, numune ile tüpler arasında reaksiyon gelişebilmektedir. Paslanmaya karşı hassas numune alıcılar paslanmakta ve iç yüzeyi bozulmaktadır. Boşluk suyunun kemirici etkiye sahip olduğu durumlarda ise numune alıcılar bozularak numuneye karışmakta ve numunenin özelliklerinde değişime sebep olmaktadır. Numune alıcıların zarar görmesi bir sonraki numuneleri de etkilemektedir. Kimyasal reaksiyonlar boşluk suyu yapısını değiştirerek numunede dayanım kaybına yol açabilmektedir.

1.3.2. Numune örselenmesinin etkileri

Numune alamama: Numune örselenmesinin derecesi zemin cinsine, numune alıcıya ve numune alma işlemine bağlı olduğu gibi numune örselenmesinin etkileri de zemin cinsine, numune alıcıya ve deney çeşidine göre değişmektedir. Numune örselenmesinin etkisi bazı zeminlerde numune alınamamasına ya da numunenin kullanılamaz hale gelmesine neden olurken bazı zeminlerde kısmen etkili olmaktadır. Örneğin hassas yumuşak killer örselenmeden fazla etkilenirler ve örselenme etkisi, numune alınamamasına neden olabilmektedir.

Zeminden numune alınamaması, çekme sırasında numune alıcı ile zemin arasında oluşan adezyonun, zeminin kohezyonundan kaynaklanan kuvvetten veya tüpte sıkışan su veya havanın basıncından az olmasından kaynaklanmaktadır. Bunun önlenmesi için, (Harper,1931) numune alıcının dış kısmına kanat eklemeyi veya (Mohr,1943) yukarıdan indirilen boru ile kuyu tabanına hava basmayı önermiştir. Fakat tüp ucuna numune tutucu eklemek veya tüp basıldıktan sonra numunenin biraz şişmesini ve adezyonun artmasını beklemek ya da tüpü biraz fazla sürerek numunenin tüp içinde yayılmasını beklemek daha kolay çözümler olarak pratikte kullanılmaktadır.

Dayanım değişimleri: Numune örselenmesinin dayanım üzerindeki etkilerinin yumuşak killerde çok az (%10 dan az) olduğunu (Siddique, 1990) ve bir çok araştırmacı bildirmiştir. Konsolide yada aşırı konsolide killerde etkiler çok daha büyük olmaktadır. (Seko ve Tobe, 1977) tarafından, değişik numune alıcılarla elde edilen Tokyo kili numunelerindeki basınç dayanımının geniş değişimi Şekil 1.9'da verilmiştir.



Şekil 1.9. Tokyo kilinde değişik numune alma yöntemlerinin basınç dayanımına etkisi (Seko ve Tobe, 1977)

Sıkışabilirlik ve rijitlik: Özellikle ileri derecede aşırı konsolide killerdeki tabakalanma etkilerinden dolayı, numune almanın sıkışabilirlik üzerine etkilerinin değerlendirilmesi zordur. Küçük deformasyonlarda dahi konsolide killerin örselenmeden etkilendiğini tespit etmek zor olmamaktadır.

(Siddique, 1990) Londra killeri yeniden yapılandırılarak örselenmemiş numunenin gerilme, dayanım ve rijitlikle ilgili özellikleriyle kıyaslamış ve önemli azalmalar kaydetmiştir. Diğer yandan, (Hopper, 1992) tarafından yapılan birim deformasyon izi deneyleri ile, normal ve az konsolide killerin rijitliğinin tüp ile numune alma yönteminden önemli derecede etkilendiği fakat, drenajsız kayma dayanım azalmalarının daha az önemli olduğu ve iyi bir yeniden konsolidasyon prosedürü ile tekrar kazanılabileceği gösterilmiştir.

1.4. Laboratuvar Deneyleri

Laboratuvar deneyleri, genellikle daha büyük zemin kütlelerini temsil ettiği varsayılan nispeten küçük numuneler üzerinde yapılmaktadır. Numuneler, elemanlar olarak (yani uniform başlangıç gerilmelerine maruz bırakılıp, gerilme ve birim deformasyon şartlarındaki değişim de uniform olacak şekilde) deneye tabii tutulmaktadır. Numunelerin model olarak deneye tabii tutulduğu diğer laboratuvar deneylerinde, sonuçlar model üzerine etkiyen uniform olmayan sınır koşulları açısından değerlendirilmelidir (Kramer, 1996).

Eleman deneyleri zemin numuneleri üzerinde yapılır. Dolgu olarak kullanılacak zeminlerin tepkisi ile ilgili problemlerde numune hazırlama işlemi, yığın şeklinde veya örselenmiş örneklerin laboratuvarında olabildiğince temsilci bir kompaksiyon işlemine tabii tutulmasıyla yapılmaktadır. Ancak, mevcut bir zemin ile ilgili özelliklere gereksinim duyulduğunda, problem daha da güçleşmektedir. Mevcut zeminlere ait deneyler örselenmemiş veya yeniden yapılandırılmış numuneler üzerinde yapılabilir. Ancak, yoğunluklar ve uygulanan gerilmeler aynı bile olsa, doğal zemindeki doku ile yeniden yapılandırılmış numunenin dokusu arasındaki farklılıklardan dolayı, bu deneylerde elde edilen sonuçlar çoğu zaman farklı olmaktadır. Laboratuvar deneylerinden, zeminlerin yerindeki gerçek davranışını olabildiğince yansıtan sonuçlar elde edebilmek için, iyi kaliteli örselenmemiş numunelerin alınması gerektiği (Kramer, 1996) tarafından bildirilmiştir.

Kohezyonlu zeminlerde, et kalınlığı küçük tüplerle numunelerin alınması veya blok numunelerin dikkatli bir şekilde tıraşlanması yoluyla deney numunesi hazırlama yöntemleri oldukça gelişmiş durumdadır. Temiz kum ve çakıl gibi kohezyonsuz zeminlerde örselenmemiş numune almak daha zordur. Temiz kumlarda ince et kalınlığına sahip tüpler bile önemli miktarda örselenmeye neden olmaktadır. Gevşek kumlar sıkılaştırırken, sıkı kumlar da hacimsel büyümeye maruz kalmaktadır (Marcuson vd., 1977). Blok numune almanın daha etkin bir yöntem olduğu gözlemlenmiştir (Horn, 1978).

Numune örselenmeleri başlığı altında da anlatıldığı üzere laboratuvar deneylerinde değerlendirilmek üzere alınan zemin numuneleri asıl yerlerinde buldukları durumdan farklı değerler alır (şekil, gerilme, yapı v.b.).

Laboratuvar deneylerine gelen eleştirilerin başlıca nedeni, Şekil 1.6'da gösterilen örnek alma sürecinin numuneye getirdiği gerilme değişimlerine bakılarak anlaşılabilir. Sükûnet konumunda duran bir zeminin gerilme izi, sondaj, numune alınması, taşıma ve deneye hazırlama sırasında yenilme noktasına kadar değişebilmektedir. Büyük gerilme değişimine maruz kalmış bir numunenin laboratuvarda ölçülen özellikleri, zeminin gerçek özelliklerini yansıtmamaktadır.

Bu değişimlerin etkisinden sonuçların etkilenmemesi için arazi deneyleri geliştirilmiştir. Şartlar bozulmadan veri elde edildiğinden dolayı, arazi şartlarındaki zeminlere yapılan deneylerin, daha gerçekçi olduğu düşünülmektedir.

BÖLÜM 2. ARAZİ DENEYLERİ

Zemin özelliklerinin arazi deneyleri ile ölçülmesi son gelişmelerinde etkisiyle tüm dünyada daha hızlı bir şekilde artmakta ve yaygınlaşmaktadır. Alet ve teçhizattaki gelişmeler, ölçüm teknikleri ve deney prosedürlerindeki ilerlemeler de bu gelişmelerde etkili olmaktadır. Gelişmelerin sürdürülmesi için tüm dünyada çalışmalar devam etmektedir. Arazi deneyleri üzerine yapılan çalışmaların tanıtılması, iyileştirilmesi ve yaygınlaştırılması için çeşitli konferanslar düzenlenmektedir; Avrupa Penetrasyon Testi Sempozyumu ESOPT I (1974) ve ESOPT II (1982); ASCE Zemin Özelliklerinin Arazide Ölçülmesi Konferansı (1985); Konik Penetrasyon Testi Konferansı CPT85 (1985) ve CPT10 (2010).

Gayretler sonucunda, arazi deneylerinin üstünlüklerine dikkat çekilerek ilgi duyulması ve yaygınlaşması sağlanmıştır. Arazi deneylerinin laboratuvar deneylerine olan üstünlüklerini ortaya çıkaran konular şöyle sıralanabilmektedir;

- Bazı zeminlerden (yumuşak killerden, su altında kumdan, çakıllı malzemelerden) bozulmamış deney numunesi alınmasının çok zor ya da imkansız olması,
- Laboratuvar deneyinin büyük bir alan ve derinliği temsil etmesinin çoğu zaman imkânsız olması,
- Laboratuvar testlerinde kullanılan numunelerin bozulmadan deneye tabii tutulmasının çoğu zaman imkânsız olması,
- Arazi deneylerin düşük maliyeti

Diğer yandan laboratuvar deneyleri bazı problemlerin çözümünde sıkça kullanılmaktadır. Çünkü arazi deneylerinin şu olumsuzlukları bulunmaktadır;

- Problemlerin ilgili çözümü için gerekli gerilme yönü ve gerilme dağılımının arazi deneylerinde ayarlanamaması, bazen bir problemin çözümü için gerekli

şartlara arazi şartları sahip bulunmamaktadır. Oysa problemin çözümü için özel şartlar gerekebilmektedir,

- Drenaj şartları ayarlanamamaktadır,
- Gelecekte oluşabilecek etkiler oluşturulamamaktadır.

Bu olumsuzluklar bazı arazi deneylerinin üstün özellikleri ile bertaraf edilebilmektedir (Robertson, 1982). Saha incelemenin önem, boyut ve cinsine göre ihtiyaç duyulan tasarım parametrelerini elde etmek için arazi deneyleri ya da laboratuvar deneyleri yeterli olabildiği gibi bazen ikisinin birlikte kullanılması gerekebilmektedir. Rutin inceleme işlemlerinde zemin cinsi ve işin özellikleri belirleyici olmaktadır. Uygulama kolaylığı, düşük maliyeti ve hızından dolayı arazi deneyleri tercih önceliği kazanmaktadır.

Arazi deneyleri, farklı zemin parametrelerini belirlemeye yönelik olarak kullanıldıklarından, aynı amaca yönelik çok farklı çeşitleri bulunduğu ve çok farklı veya çok benzer çalışma prensipleri olduğundan sınıflandırılmaları çok farklı şekilde yapılabilmektedir.

Yaygın kullanılan arazi deneyleri şu şekilde sıralanabilmektedir;

1-Penetrometreler:

- Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)
- Çakılda Penetrasyon Direncinin Ölçümü (BPT)
- Dinamik Sondalama (DP)
- Statik Sondalama (CPT)
- Piyezokoni (CPTU)
- Sismik Piyezokoni (SCPTU)

2-Presiyometre ve Dilatometreler:

- Yassı Dilatometre (DMT)
- Delikte Presiyometre (PBP)
- Kendi Delen Presiyometre (SBP/PAF)
- İtmeli Presiyometre

3-Diğer Deneyler:

- Kanatlı Kesici Deneyi (FVT)
- Plaka Taşıma Deneyi (PLT)
- Vidalı Plaka Yükleme Deneyi (SPLT)
- Geçirimlilik Deneyi
- Hidrolik Çatlatma
- Yastık Kriko
- Sismik Deneyler

Zemin şartlarına göre mevcut yaygın kullanılan arazi deneylerinden elde edilen parametreleri (Clayton vd., 1995) tarafından Tablo 2.1’de verilmiştir.

Son yıllarda araştırmalar sonucu geniş uygulama alanı bulan arazi deneyleri; plaka taşıma, vidalı plaka, kanatlı kesici, yassı dilatometre, presiyometre ve piyezometreli konik sonda olarak özetlenebilir (Lunne vd., 1989).

Zeminlerin incelenmesinde, arazi deneylerinden en sık kullanılanlar değişik tipteki penetrometrelerdir. Bir zemin araştırmasının ilk keşif aşaması sırasında zemin şartlarının genel olarak (örneğin değişik sınıfların derinlik, kalınlık ve yatay uzunlukları) belirlenmesi mümkündür.

Tablo 2.1. Zemin şartlarına göre mevcut arazi deneylerinden elde edilen parametreler (Clayton vd., 1995)

Deney türü	Gerekli parametre							
	Ko	Φ'	c_u	σ_c	E'/G	Eu	Gmax	k
SPT		G	C	R	G	C	G	
CPT		G	C	G				
Marchetti dilatometresi		G,C			G			
Kuyu presiyometresi			C		G,R	C		
Plaka yükleme deneyi			C		G,R	C		
Kanatlı kesme deneyi			C				G,C,R	
Kendinden delgili presiyometre	G,C	G	C		G,C			
Düşen/yükselen seviye deneyi								G
Sabit seviye deneyi								C
Paker deneyi								R
G: granüle, C: kohezyonlu, R: kaya								

Penetrometreler aynı zamanda dolguların yoğunluğunu kontrol ve basıncını tahmin etmede ve temelde parçalı toprakların kesme direncini ölçmede kullanılabilir. Giderek kullanımı yaygınlaşan penetrometreler, uzun ve yoğun çalışmalar sonucunda günümüzde sahip olduğu kullanışlı ve işlevsel şekle gelmiştir.

(Clayton vd., 1995) tarafından, ölçülmek istenilen parametreler bakımından penetrometreler, batma direnci, dayanım ve/veya sıkışabilirlik ve geçirgenlik ölçme yönüyle sınıflandırılmıştır. Ayrıca sonuç verilerinin yorumlanması açısından da üç sınıftan bahsetmiştir;

1. Tamamen ampirik yorumlama: Temel bir analiz yapmak mümkün değildir (örnek; SPT, CPT).
2. Yarı ampirik yorumlama: Parametreler ve ölçümler arasında bazı ilişkiler geliştirmek mümkündür. Yorumlama işlemi yarı ampiriktir (örnek; plaka deneyi, kanatlı kesme deneyi),
3. Analitik yorumlama: Gerilme izleri kontrollü ve benzerdir (örnek; kendinden delgili presiyometre)

2.1. Penetrometreler

Penetrometre sözcüğü bastırarak ya da çakarak ortama itilen 19-80 mm çapında bir metal mil ve milin gördüğü direnci ölçen alet düzeneği için kullanılmıştır. Penetrometreler zeminle ilgili verilerin zemin yüzünden (yüzeyden) elde edilmesi amacıyla üretilmiştir.

Penetrometrenin zemine sürülmesinde iki yöntem vardır; statik (iterek) ya da dinamik (çakarak) yöntem. Bu iki yöntemi kullanan üç basit penetrometre çeşidi vardır;

- Statik penetrometreler
- Dinamik penetrometreler
- Statik-dinamik penetrometreler (iki yöntemin avantajlarını kullanır)

2.1.1. Penetrometrenin geçmişi

Bilinen penetrometrelerden ilki Collin tarafından 1846 yılında Fransa'da kullanılmıştır. Bu alet, bir milin zemine itilmesi sırasında zemin yüzeyinin mile gösterdiği direncin ölçülmesi esasına göre çalışmaktadır. Collin, 1 mm çapındaki iğnenin 1 kg ağırlık altında killere batmasını incelemiştir (Sanglerat, 1982).

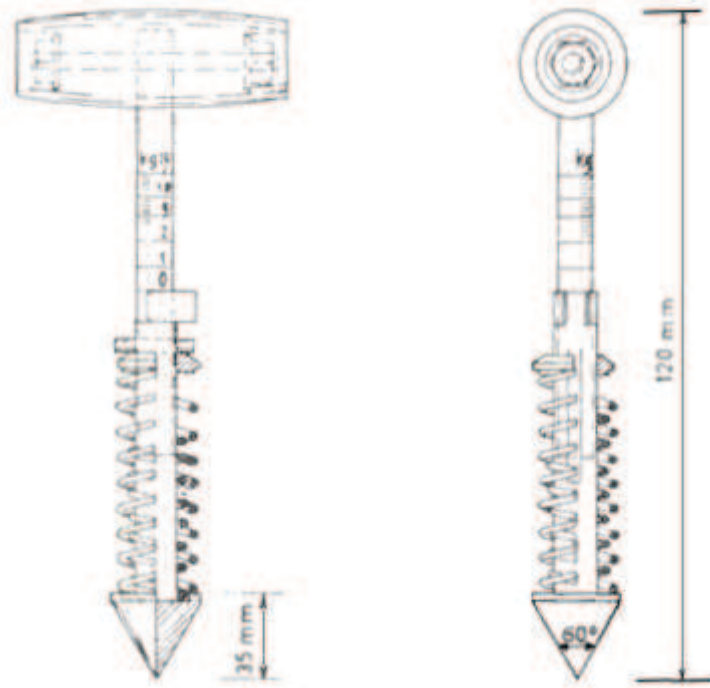
Zemin mekaniğinin ilk zamanlarında, uç açısı 90^0 olan bir koni killi zeminler üzerinde uygulanmak üzere geliştirilmiş ve bir test prosedürü hazırlanmıştır. Farklı ağırlıklar altında koninin zemine batması ölçülmüştür. Yükün derinliğe oranı hesaplanmış ve yükün yüzeye oranı zemin direnci olarak belirlenmiştir (Sanglerat, 1982).

1917 yılında İsviçre Demir Yolları günümüzde de henüz kullanılan bir metodu standarda bağlamıştır. Bu yöntemde 19 mm çapında bir metal uç 5, 15, 25, 50 ve 100 kg yüklerle bastırılır. Ucun batma derinliği ağırlıklara göre kaydedilir (Sanglerat, 1982).

Geonor Kurumu (Oslo), Norveç Geoteknik Enstitüsünün görevlendirmesiyle bir koni üretmiştir. Zemine serbest düşürülerek kullanılan koni, zeminin kesme dayanımını ve killerin hassaslığını belirlemede kullanılmıştır (Hansbo, 1957).

Penetrometrelerle ilgili gelişmelerin çoğunluğu, 1930'larda ve 1950'lerde batı Avrupa'da olmuştur (Coduto, 2001).

Danimarka ya da İsviçre cep penetrometresi 1931 yılında Danimarka Demiryolları tarafından geliştirilmiştir. Bu penetrometre killi zeminlerin kohezyonunu ve taşıma gücünü belirlemede kullanılmıştır (Godskesen, 1936) (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Danimarka cep penetrometresi (Sanglerat, 1982)

1929 yılında New York'ta 30 m kalınlıkta yığılmış kumlar üzerinde batma direncinin belirlenmesinde bir koni penetrometre kullanıldığından bahsedilmiştir (Terzaghi, 1953). Diğer yandan Terzaghi ucunda koni bulunan hidrolik jetle çalışan bir alet kullandığından bahsetmiştir.

Yine aynı yıllarda A.S.K. Buisman, Delft Teknik Üniversitesi Zemin Laboratuvarında (Hollanda) bir koninin zemine itilmesiyle ilgili çalışmalar yapmıştır.

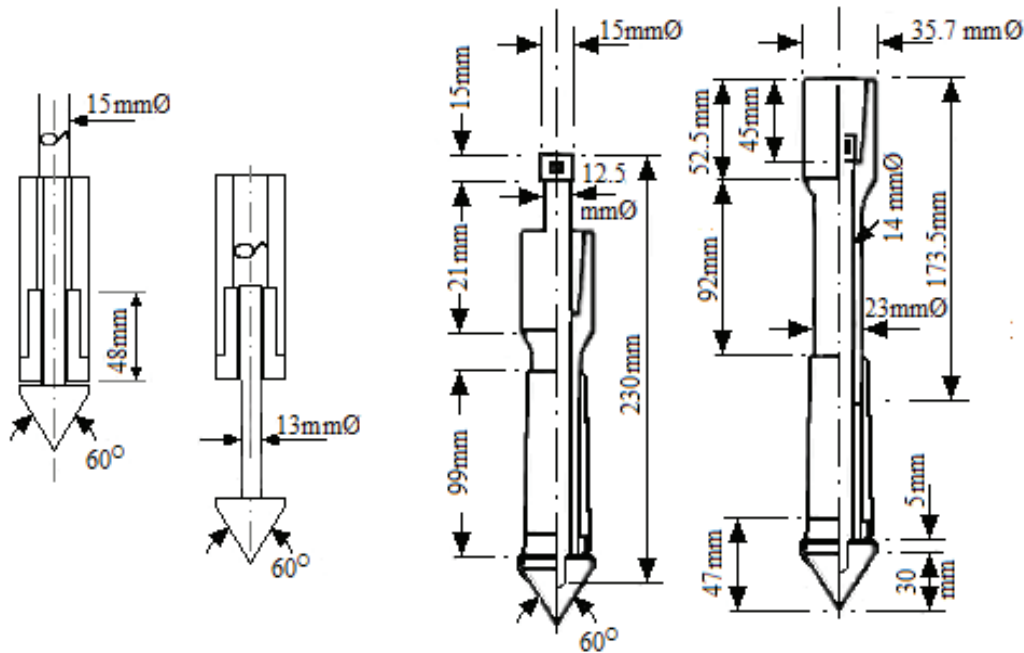
İlk statik koni deneyi 1932-1937 yıllarında P. Barentsen tarafından yapılmıştır. İcat edilen sürtünme ceketli penetrometre patent almıştır (Sanglerat, 1982).

Delft Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı 1946'da Gaudsche Makine Fabrikası işbirliği ile 2500 kg kapasiteli elle kullanılan bir penetrometre üretmiştir. Bu penetrometrelerden, dünyanın çeşitli yerlerinde yaklaşık 500 adet kadar satılmıştır. 1948 yılında 10000 kg kapasiteli elle kullanılan makineden ise 350 adet civarında satılmıştır (Sanglerat, 1982).

Statik penetrometre deneyi metal bir milin zemine yavaşça itilmesi prensibine dayanmaktadır. Uluslar arası yönetmelikler ve ASTM (Amerikan Standardı) penetrometre itilme hızı için 30-60 cm/dakika'yı öngörmektedir. Statik penetrometreler metal milin ucunda oluşan uç direncini ve mil çevresine konumlandırılmış hareketli bir sürtünme ceketi ile çevre sürtünmesini ölçmektedir.

Hollanda ve Belçika'nın gayretli çalışmaları sonucu 1948 yılında Rotterdam'da yapılan İkinci Zemin Mekaniği Kongresinden sonra Avrupa'da Penetrometre kullanımı artmıştır. Bu yıllara kadar Fransa gerilerde bulunmaktaydı, fakat 1949 yılında Dr. J. Karisel'in Yeniden Yapılanma Çalışmaları Bakanlığına getirilmesiyle bir penetrometre geliştirilmesi için büyük bir bütçe ayrılmıştır. Yapılan çalışmalarla yeni penetrometreler geliştirilmiştir (Sanglerat, 1982). Penetrometrelerin günümüze kadar gelişmesinin seyri şöyle olmuştur;

Dutch statik penetrometreler (Hollanda): Hollanda Goudsche Makine Fabrikası tarafından üretilen penetrometreler hareketli tip penetrometrelerdir. Dutch Statik Penetrometresinin uç açısı 60° , uç alanı 10 cm^2 ve milin çapı 36 mm 'dir. Koni Delft Üniversitesi Laboratuvarı adına Hollanda'da patent almıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Orjinal Dutch konisi ve geliştirilmiş mekanik Delft konisi (Lousberg vd., 1974)

Goudsche Makine Fabrikası, Delft Üniversitesi işbirliği ile 1959 yılında ilk motorize penetrometreyi üretmiştir (Şekil 2.3).

Daha sonra 1962-1963 yıllarında yaptığı çalışmalarla sürtünmeyi doğrudan koninin kısa bir çevre uzunluğundan ölçmeyi başarmıştır. Bu gelişme 1965 yılında Begemann penetrometresinin tasarlanmasını sağlamıştır (Şekil 2.4).

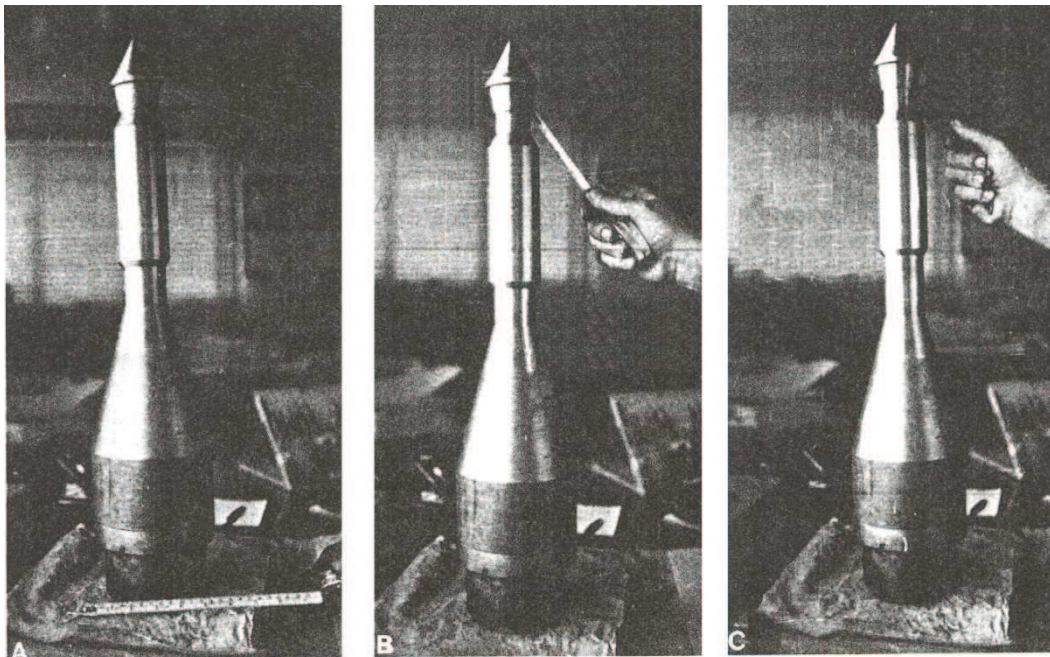


Şekil 2.3. Mekanik Delft Konisi ve Mekanik Begemann Konisi

Venezüella Maracaibo Gölünde yapılan çalışmalarda kullanılmak üzere, Professor Dr. J. Kerisel ve Dutchman P.S. Heerema tarafından Heereman penetrometresi geliştirilmiştir (Şekil 2.5). Bu penetrometre, 56 mm çapında bir uç ve Begeman ceketinin Dutch penetrometresine eklenmesiyle oluşturulmuş olup, toplam ve uç direncini ölçmekteydi. Sistem su yüzeyinde durarak su tabanını araştırabilmek için yüzer tasarlanmıştır (Sanglerat, 1982).

Frankipfahl statik penetrometresi (Almanya): Frankipfahl Penetrometresi 1955 yılında geliştirilmiştir. 35 mm çapında gövde içinde hareket edebilen 15 mm çapında bir milden oluşmaktadır. Uç direnci ve çevre sürtünmesi manometre ile ölçülmektedir. Kullanma şekli Jangot-Bonneton ve Andina tipi penetrometrelere benzemektedir (Sanglerat, 1982).

Cep penetrometreleri (Amerika Birleşik Devletleri): Zemin parametrelerini ve zeminden araç geçebilirliğini hızlı bir şekilde tespit edilebilmek için Amerikan Ordusu tarafından 1948 yılında konik bir penetrometre geliştirilmiştir. Ucuz maliyetli ve elle kullanılan alet 30 inç derinliğe kadar kullanılabilir.

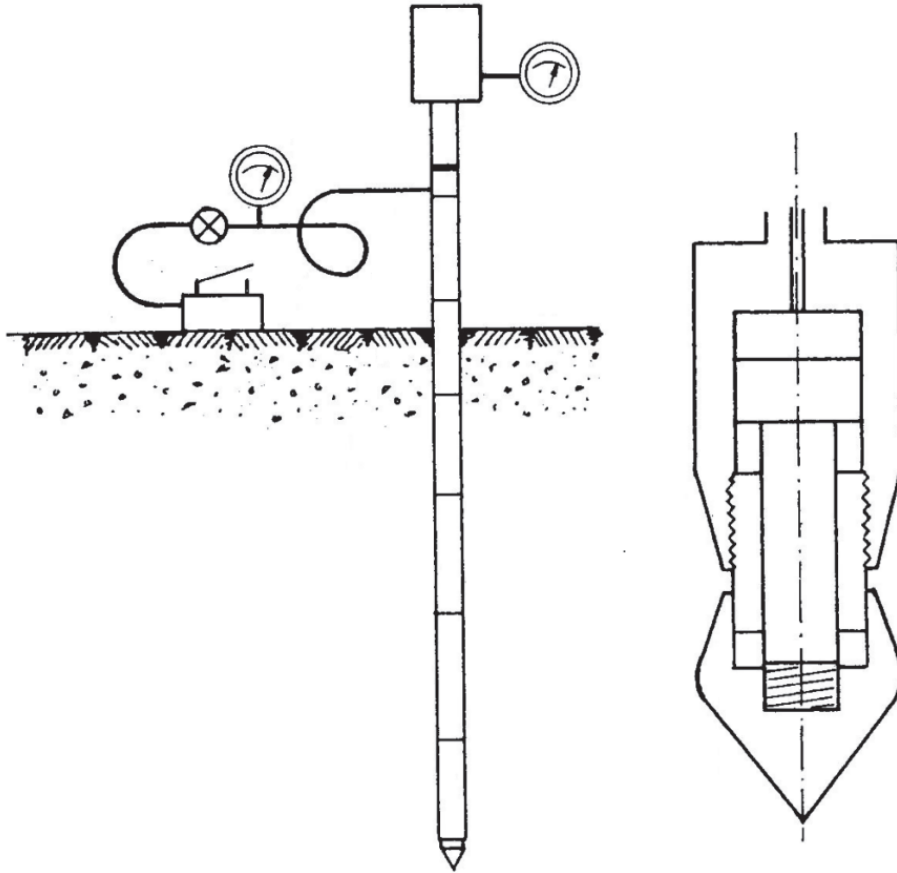


Şekil 2.5. Heerema penetrometresi ucu (Sanglerat, 1982)

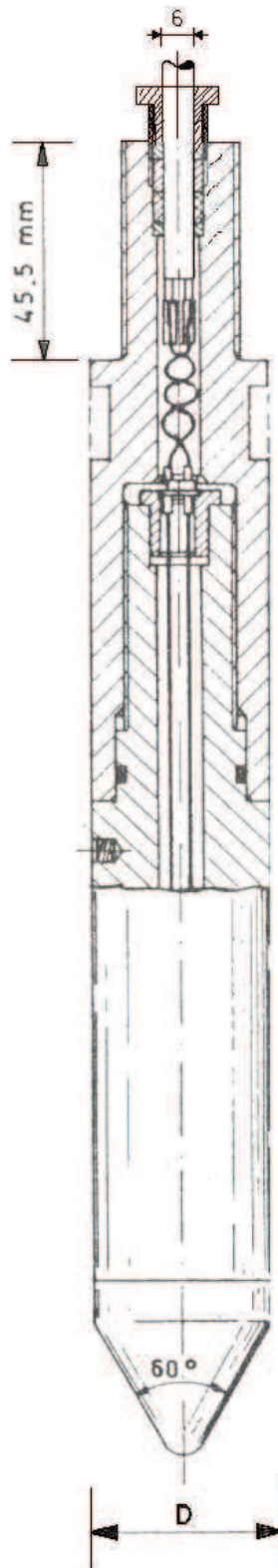
Bu penetrometre 1970 yılında geliştirilmiştir, 218 gram ağırlık, 3/4 inç çap ve 6 inç boya düşürülerek kullanışlı hale getirilmiştir.

Sol-Essais (Parez) statik penetrometreler (Fransa): 1953 yılında L.Parez tarafından, yağ basıncı yardımıyla yüzeyden manometrelerle ölçüm yapılabilen Sol-Essais penetrometresi yapılmıştır. 45, 75 ve 100 mm çaplarında çeşitleri bulunmaktadır (Sanglerat, 1982) (Şekil 2.6).

Degebo penetrometesi (Almanya): Yüzeyden bağlanan bir elektrikli sistemle (Vibroting String of the Maihak Systems) uç direnci ölçülmektedir (Şekil 2.7). Mil çapı uç çapından küçük olduğundan çevre sürtünmesi ölçülememektedir. Bu daha yüksek kapasitelere ulaşmak için Maihak A.G. Şirketi (Hamburg) tarafından yapılmıştır. 5 tonluk uç kapasitesi ve 7,5 tonluk toplam kapasiteye göre tasarlanmıştır. 20 m derinliğe kadar kullanılmaktadır (Sanglerat, 1982).



Şekil 2.6. Sol-Essais penetrometresi (Sanglerat, 1982)



Şekil 2.7. Degebo penetrometresi, (Sanglerat, 1982)

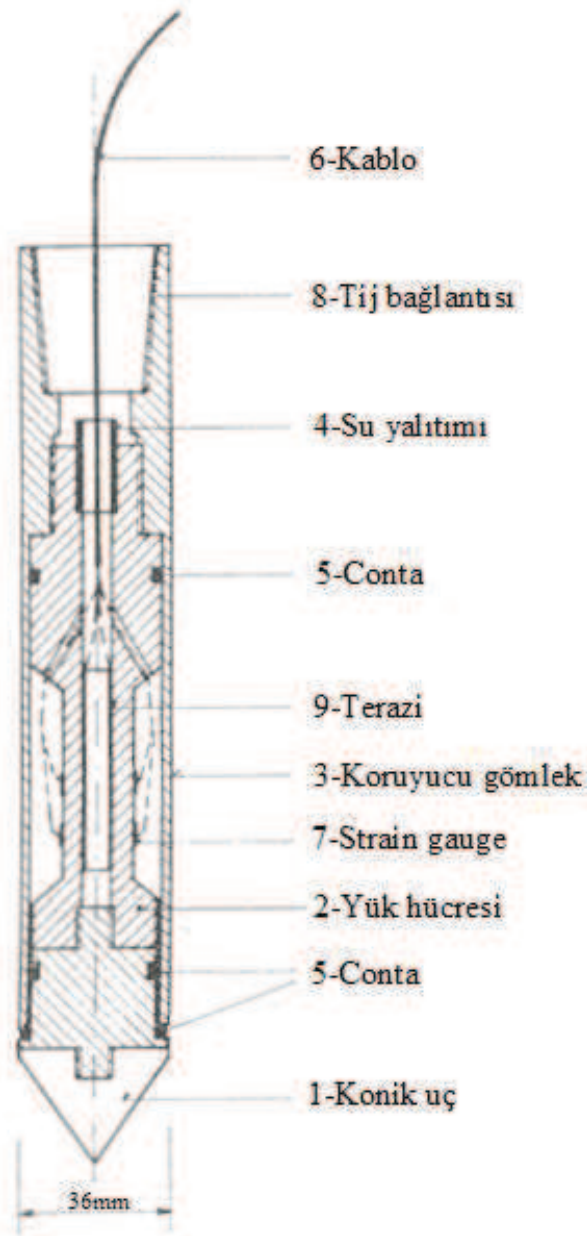
GC statik penetrometresi: K.Gamski tarafından Liege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde geliştirilmiştir. Elle kullanılan aletin 10 cm² uç alanı ve 60° uç açısı bulunmaktadır. Sondaj kuyusu tabanında zemine itilirken ilerlemek için gerekli kuvvet bir yük halkası yardımıyla ölçülmektedir (Gamski, 1961).

Otomatik kayıt yapan statik penetrometreler (Amerika Birleşik Devletleri): Bengt B. Broms ve D. E. Broussard ASCE Journal'in 1965 yılı Ocak sayısında kendiliğinden kaydeden statik penetrometre hakkında yayın yapmıştır. Bu alet yükleri derinlik ve zamanın fonksiyonu olarak kaydedecek şekilde tasarlanmıştır. Alet Shell Canadian Expolaration of Huston, Texas tarafından geliştirilmiştir ve daha sonra denemeler İsviçre Geoteknik Enstitüsü tarafından yapılmıştır (Sanglerat, 1982).

Franki statik penetrometresi (Belçika): Liege'den International Franki Pile Şirketi Dutch penetrometreyi andıran bir penetrometre geliştirmiştir. Yük hidrolik olarak uca iletilmektedir. Piezometrik hücre ceketle uç arasına yerleştirilmiştir. Uç direnci ve çevre sürtünmesi bir düzencekle ölçülmektedir. Uç alanı 9,2 cm² ve toplam kapasite 10000 kg'dır (Sanglerat, 1982).

Solatanche statik penetrometre (Fransa): Dutch penetrometrenin değişik bir çeşididir. 40 mm çapında ve 1 m uzunluğunda tijler 50 mm'lik uca bağlanmaktadır. Uç direnci ve toplam sürtünme direnci tijlerin üzerine yerleştirilen bir manometre ile ölçülmektedir (Sanglerat, 1982).

Fugro elektrikli statik penetrometre (Hollanda): Fugro Temel Mühendisleri, 1965'den sonra bir elektrikli penetrometre geliştirmiştir. Araştırma Delft Araştırma Enstitüsü ve Philips Şirketi tarafından desteklenmiştir. Bu penetrometrenin uç çapı Delft penetrometresi ile aynı fakat gövdesi biraz farklıdır (Şekil 2.8) (Sanglerat, 1982).

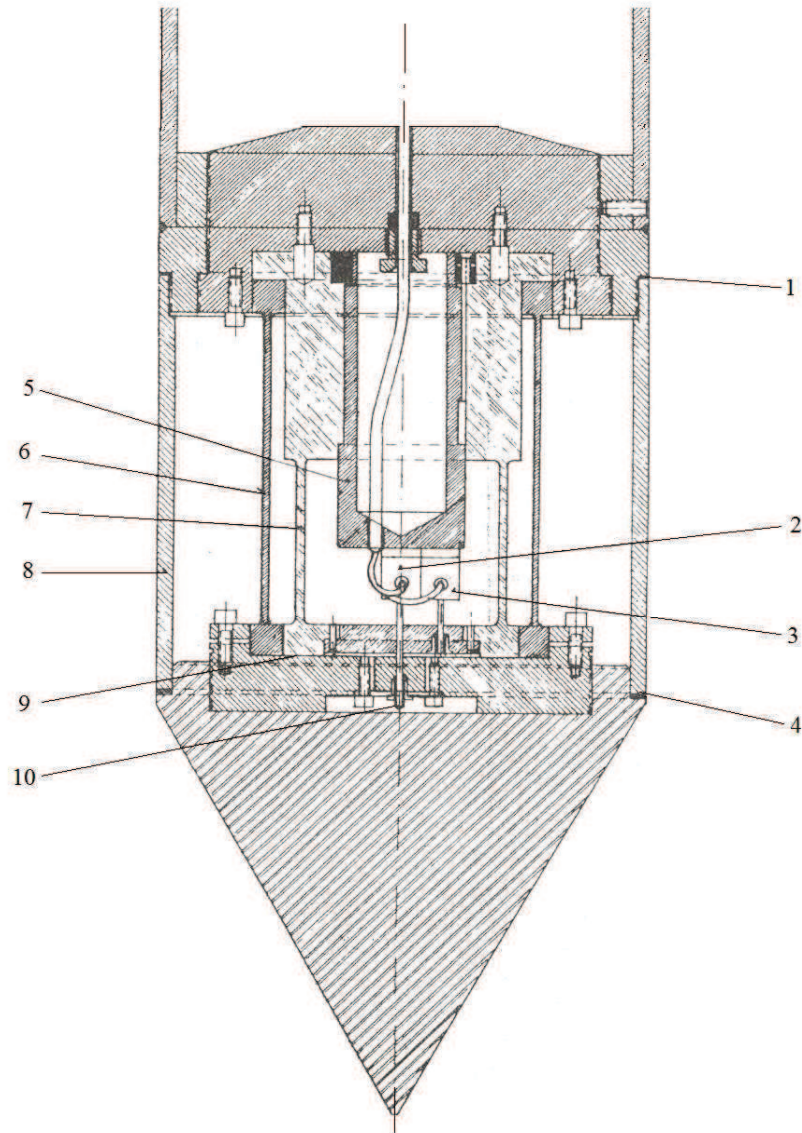


Şekil 2.8. Elektrikli strain gauge konisi (Fugro) (Sanglerat, 1982)

CEBTP Penetrometreleri (Fransa):

Statik penetrometre: CEBTP (Centre Experimental du Batiment et des Travaux Publics) 1966 yılında Pariste bir elektrikli statik penetrometre geliştirme çalışmalarını başlatmıştır. Bir kaç yıl sonra CEBTP Jangot-Bonneton penetrometresini üretmiştir. Bir kaç geliştirme başarılıdır ve değişik penetrometreler geliştirilmiştir (Şekil 2.9). 1965’de 320, 216 ve 100 mm çapında statik penetrometreler kullanıma sunulmuştur. Çapı 27 mm den büyük penetrometrelerin içine dinamometreler yerleştirilerek uç

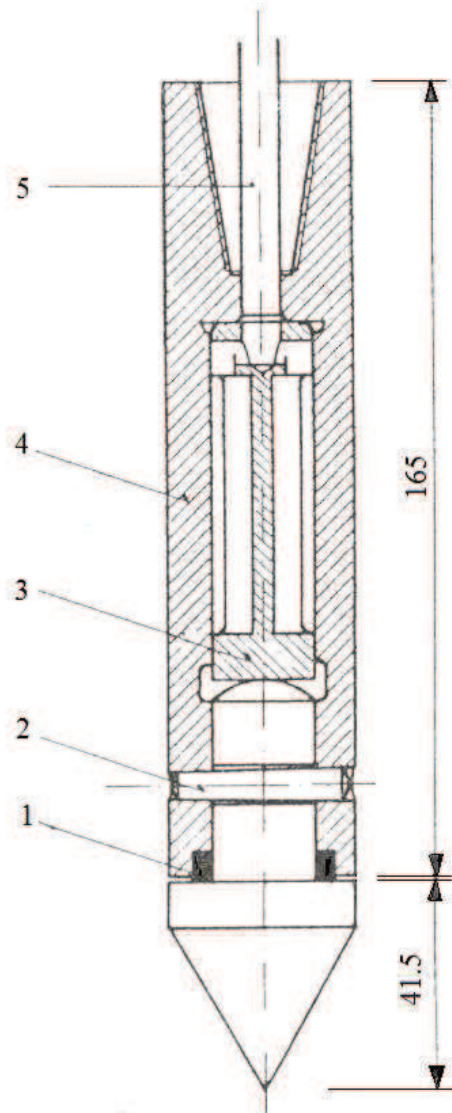
direnci ölçülürken küçük çaplı penetrometrelerin uç direnci ölçümü hidrolik sistemle yapılmıştır. 1967 yılında 216 ve 100 mm çaplı penetrometreler 320 mm çapında olan penetrometrenin ölçüm düzeneğine dönüştürülmüştür. Statik penetrometrenin üzerine eklemelerle ve değişikliklerle CEBPT üç dinamik ve bir dinamik-statik penetrometre daha üretmiştir (Sanglerat, 1982).



1,4-Esnek nokta 2-Ana hareket kayıtcısı 3-Tali hareket kayıtcısı
5-Kayıtcı kaidesi 6-20ton dinamometre 7-60ton dinamometre
8-Sürtünme ceketi 9-Boşluk 0.2mm 10- Kayıtcı sıfırlama ayarı

Şekil 2.9. CEBTP penetrometresinin ucu (Sanglerat, 1982)

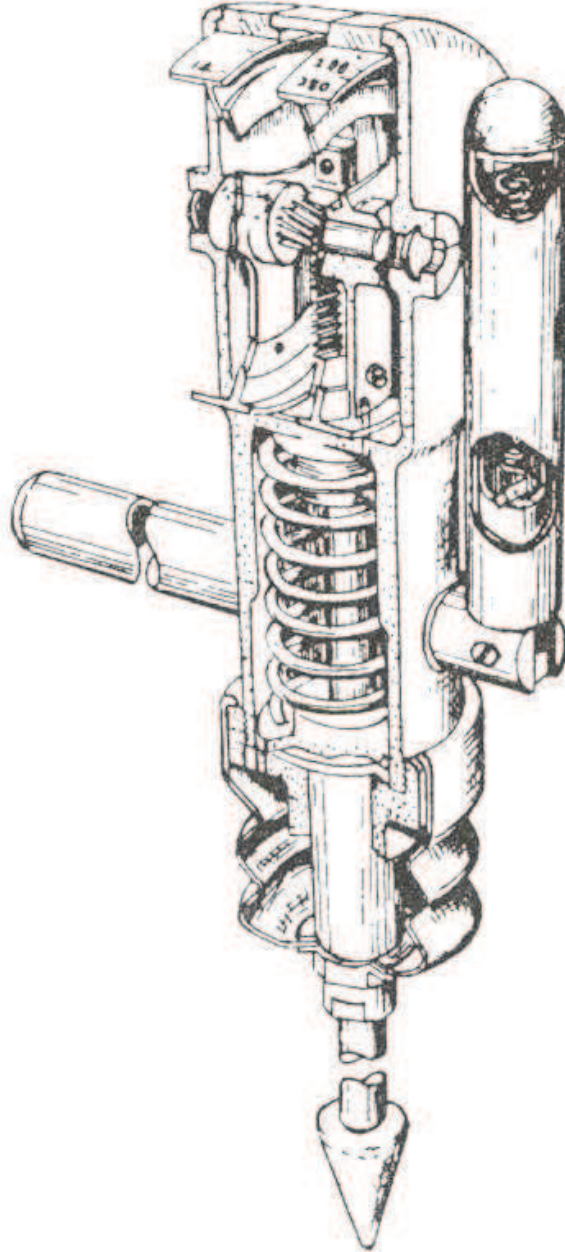
Ponts Et Chaussees Laboratuvarı statik penetrometresi (Fransa): Saint-Brieuc'deki bölgesel Ponts Et Chaussees Laboratuvarı, ucu elektiriksel donatılmış 10 ton kapasiteli, Gouda statik penetrometreyi geliştirmiştir. Uç direnci doğrudan ölçüldüğünden, uç ve gövde arasında titreşim olmamasını zorunlu kılmaktadır (Şekil 2.10). Gerinim ölçümü, strain gauge, Wheatstone köprüsü ve galvanometre ile donatılmış plaklarla yapılmaktadır (Sanglerat, 1982).



1-Uç 2-Kamalı pin 3-Yük hücresi 4-Muhafaza 5-Bağlantı kablosu

Şekil 2.10. Ponts et Chaussees Laboratuvarının elektrikli penetrometresi (Sanglerat, 1982)

BMEE hafif penetrometre (Büyük Britanya): Bu penetrometre öncelikle doğal zeminlerin yol yapımına uygunluğuna hızlıca karar vermek için tasarlanmıştır (Şekil 2.11). Bu alet CPT yerine tasarlanmamıştır, ikisinin birlikte kullanılması uygundur. Daha ziyade kumlar için tasarlanmıştır. Konik bir ucun batmaya karşı direncini ölçmeye dayalı bir deney aletidir (Sanglerat, 1982).



Şekil 2.11. BMEE hafif penetrometre (Sanglerat, 1982)

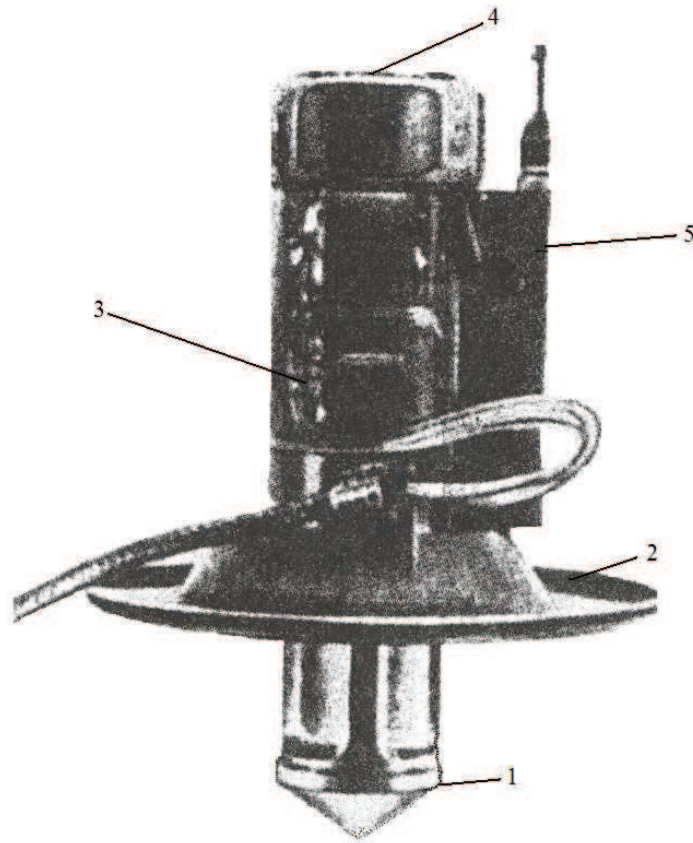
Avustralya statik penetrometreleri: A.H. Gawith ve A.H. Bartlett 1963 yılında kendi Dutch tipi penetrometrelerini dördüncü Zemin Mekaniği Konferansında (Avustralya ve Yenizelanda) tanıtmıştır. Konik tijlere su geçirmez bir şekilde vidalanan alet 61 cm/dak hızla 40 m yi iki saatte geçmektedir. Bir sürtünme penetrometresi Avusturalya'da (Bartlett ve Holden, 1968) tarafından tasarlanmıştır. Delft sürtünme konisi mantığıyla, taşıma kolaylığı için hafif metalden özel olarak tasarlanmıştır.

Braithwaite 6 inç çapındaki bir numune alıcının içine bağlanmış bir penetrometre geliştirmiştir. Penetrometre, zemine istenilen derinliğe kadar sokularak, bu sırada uç direnci ve çevre sürtünmesi strain gauge ile ölçülmüştür. Lübricant silikon ile korunan strain gauge ömrü 50 teste yetmektedir. Alet 4,5 kg ağırlığındadır ve 40 metreye kadar kullanılabilir (Sanglerat, 1982).

Yarra Nehrinin geçilmesi projesinde özel bir penetrometre tasarlanmıştır. Yumuşak silt, kötü derecelenmiş kumlu çakıllar için tasarlanan penetrometre 6 inç çapında ve 60⁰'lik ucunda 6 adet su deliği taşımaktadır. Uç yüzeyindeki iki nervür iri parçaların hareket etmesini sağlar. Alet döndürülerek ilerlerken deliklerden su verilir (Sanglerat, 1982).

Sovyet Lunar Penetrometresi: 28 Aralık 1966'da Sovyetler, küçük bir penetrometreyi (Luna 13) ay yüzeyinin batma direncini ölçmek üzere göndermiştir (Şekil 2.13). 3,5 cm çapında ve 103⁰ lik eğimli bir uca sahip aletin plastik gövdesine eklenmiş potansiyometre ucun ilerlemesini ölçmektedir. Alet yere bastığı anda otomatik sıfırlanmaktadır ve ölçüm dataları deney bittiğinde kaydedilmektedir. Batma miktarı TV kamerası ile de kaydedilmiştir (Sanglerat, 1982).

Dinamik Rus penetrometreleri: Fizdel 1947-1948 de elle kullanılan dinamik bir penetrometreyi kumların sıkılığını belirlemek için geliştirmiştir. 60 mm çapında ve 2 m uzunluğunda konik uç 9 kg'lık tokmakla çakılmaktadır. 1950-1955'de V.A. Durante Volga Havzasında, arazilerde Hidro Projesi kapsamında kumlu zeminlerin araştırılması amacıyla elle kullanılan vurmali bir penetrometre geliştirmiştir. 74 mm çapında 60⁰ açıda bir ucu bulunan bu alet 60 kg ağırlığın 0,8 m yüksekten düşürülmesiyle çakılarak kullanılmıştır (Sanglerat, 1982).



1-Uç en (düşük pozisyonda) 2-Dairesel taban 3-Gövde 4-Gövde kapağı 5-Ölçüm ünitesi

Şekil 2.13. Rus Lunar penetrometresi (Sanglerat, 1982)

Mekanize dinamik sondaj donanımları: 1957'de Hidro Projesi UBP-15 (Ustanouska Burovaya Penetratsionnaya) Boring penetration rig donanımını üretmiştir. Şu anda arazi çalışmalarında ve bilimsel araştırma faaliyetlerinde kullanılmaktadır. Bu modeller dışında Ruslar özel amaçlara yönelik dinamik penetrometre modelleri de geliştirmiştir (Sanglerat, 1982).

Statik penetrometreler: 1953 yılında Hidroproje bir statik sondaj tiji tasarlamıştır. Elle kullanılan sondaj tiji çubuk üzerine monte edilmiş bir kurt boğazını zemine bastırmaktadır. 13 ton kapasiteli ve 40 m derinliğe kadar çalışan sistem 10 cm/dak hızla batmaktadır (Sanglerat, 1982).

S-979 statik Rus penetrometresi: Bir metre uzunluğunda, ucu konik bir tij, bir tüp içine yerleştirilmiştir. Bir hidrolik pompa ile yük uygulanır ve uç direnci bir dinamometre ile ölçülür. Koni çapı 36 mm, alanı 10 cm^2 ve uç açısı 60^0 'dir. Tüpün

dış çapı 36 mm, iç çapı 20 mm, tijin çapı 18 mm dir. Maksimum ceket yükü 10 ton, maksimum ölçülebilen uç direnci 5 ton ve maksimum batma derinliği 15 m dir. 1966 yılından sonra üretimine başlanmıştır.

S-832 statik Rus penetrometresi: S-979 ile benzer karakteristikleri olan aletin kapasitesi biraz artırılmış ve bir araca yüklenmiştir.

Bulgar penetrometresi: M. Beykov'dan alınan bilgiye göre Bulgaristan'da Dutch tipi statik penetrometre kullanılmaktadır. Bu durum Yugoslavya'da da geçerlidir. Bir ceketle korunan alet hidrolik pompayla zemine itilir. Elle kumanda edilen bir düzencele yüklenmektedir. Her 25 cm de uç direnci ve sürtünme direnci ölçülmektedir. Alet bir araç üzerine yerleştirilmiştir (Sanglerat, 1982).

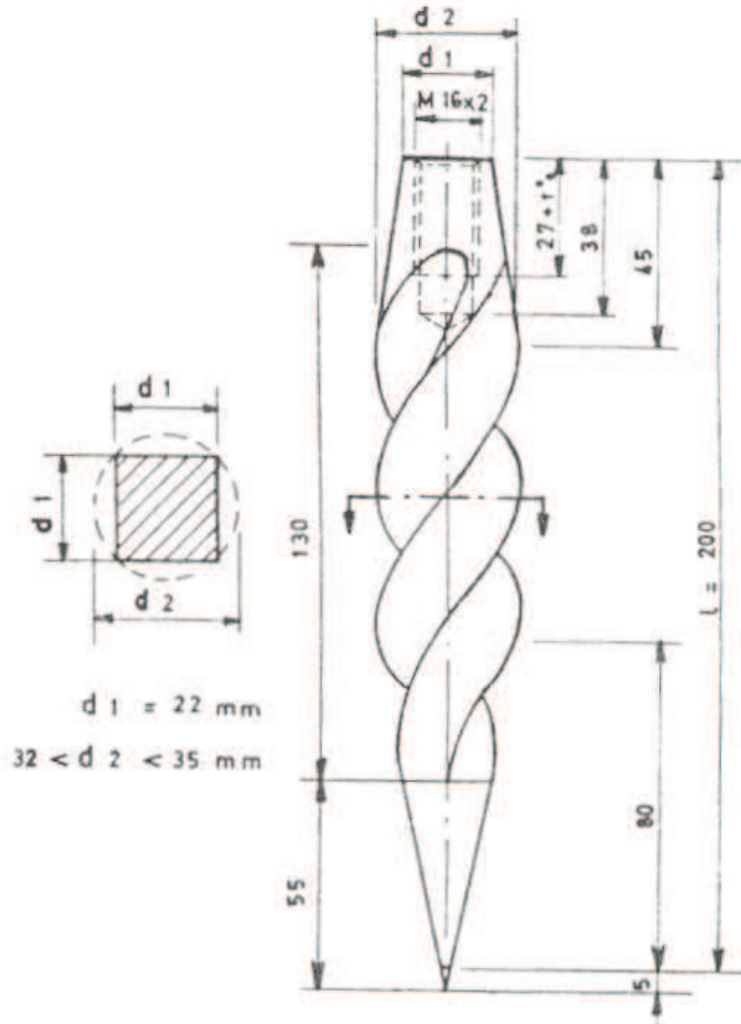
Fondasol dinamik penetrometresi (Fransa): 60 mm çapında konik ve teleskobik uç, 100 kg çekicinin düşüşüyle zemine iletilmektedir. Uç direnci bir ilerleme formülüyle hesaplanmaktadır (Sanglerat, 1982) (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Fondasol dinamik penetrometresinin ucu (Sanglerat, 1982)

Dynatest (Fransa): Marsilya Societe Provencale des Pieux Express kuruluşu 1959 yılında Dynatest adını verdiği bir alet geliştirmiştir. Kendiliğinden akma düzeneğine sahip sistem 700 kg lık bir çekiçle dakikada 30 vuruş yapmaktadır. Ucu 85 mm lik numune alıcı ile değiştirilebilmektedir. Sonuç dataları, Dutch formüllerinde kullanılabilmektedir (Sanglerat, 1982).

İsviçre penetrometresi: İsviçre'nin çok çeşitli dinamik ve statik penetrometreleri mevcuttur. Farklı amaçlar için kullanılabilen İsviçre statik penetrometresi 1917 yılında standardize edilmiştir (şekil 2.15). Standart uç, sırasıyla 5, 10, 25, 50, 100 kg ile yüklenerek batma miktarları llmektedir (Sanglerat, 1982).



şekil 2.15. İsviçre penetrometresinin ucu (Sanglerat, 1982)

Elektrikli Borro penetrometresi: Elektrik kayıtlı cihaz, kum ve siltler için tasarlanmıştır. Killer içinde kullanılabilir. Kayıt düzeneği ile aldığı sonuçları kaydetmektedir. Cihaz 1 mm lik uç hareketini kaydedebilmektedir. Kendi tijleri ile zemine sürülmektedir (Sanglerat, 1982).

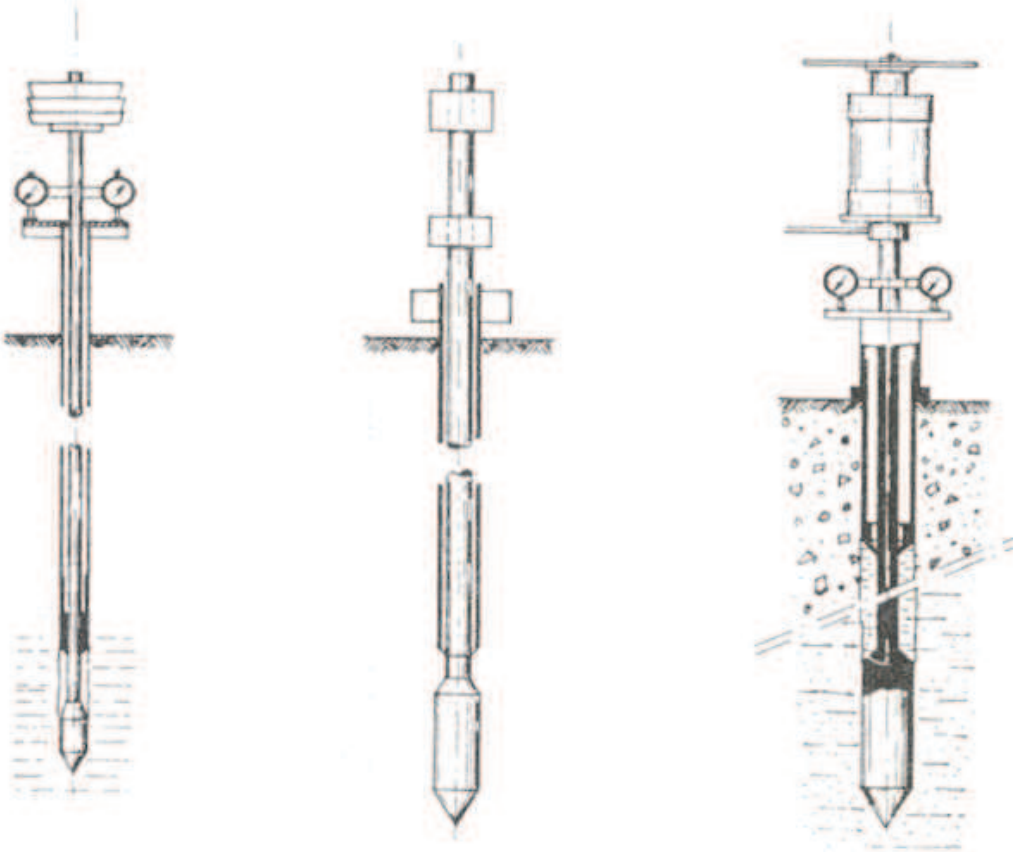
Jonell ve Nilson statik penetrometresi: 20 mm çapında tij ve 10 cm² alanlı uca sahip sondaj penetrometresi, Jonell ve Nilson tarafından İsviçrede geliştirilmiştir (Şekil 2.16). Ucu İsviçre penetrometresine benzemektedir. Sürtünme direnci tij boyunca toplanarak ölçülmektedir. Bu makine batma direncini derinliğin fonksiyonu olarak otomatik kaydetmektedir (Sanglerat, 1982).



Şekil 2.16. Jonell ve Nilson penetrometresi ucu (Sanglerat, 1982)

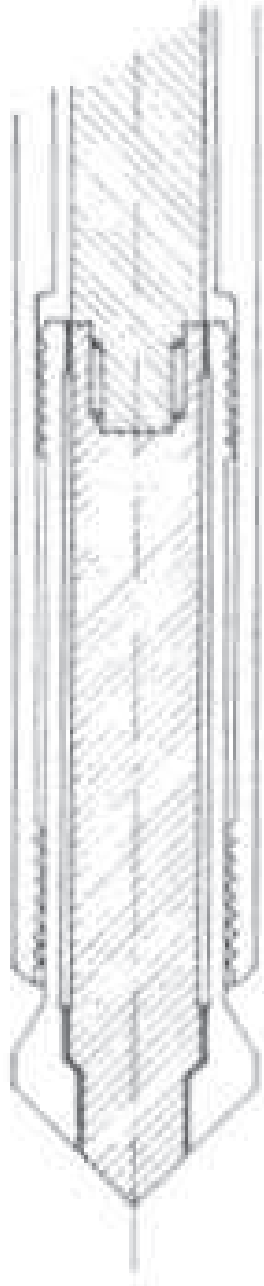
Danimarka penetrometresi: Danimarka Demiryolları 1927’de İsviçre’nin kullandığı penetrometreye benzer bir penetrometre kullanmıştır. Danimarka penetrometresinin 25x25 mm boyutunda piramit şeklindeki ucu 20 mm çapında tije bağlı olarak 100 kg’a kadar yüklenerek ilerleyecek şekilde tasarlanmıştır (Sanglerat, 1982).

Haefeli-Fehlmann statik-dinamik penetrometresi (İsveç): Bu penetrometrede uç tije birleşik tasarlanmıştır. Dışta bir koruyucu kılıf bulunmaktadır. Bu alet kar yığınlarının direncini ölçmek için tasarlanmıştır. Çeşitli aşamalardan geçerek 1964-1965 yıllarında dinamik-statik uç direncini ölçen, çevre sürtünmesini ölçerek uç direncini çıkararak taşıma kapasitesini belirlemeye yarayan bir alete dönüştürülmüştür (Şekil 2.17). 10 cm² uç alanı olan alet, 20 m ye kadar kullanılmaktadır. Dinamik kullanımda ise 30 kg ağırlık 20 cm den düşürülmektedir (Sanglerat, 1982).



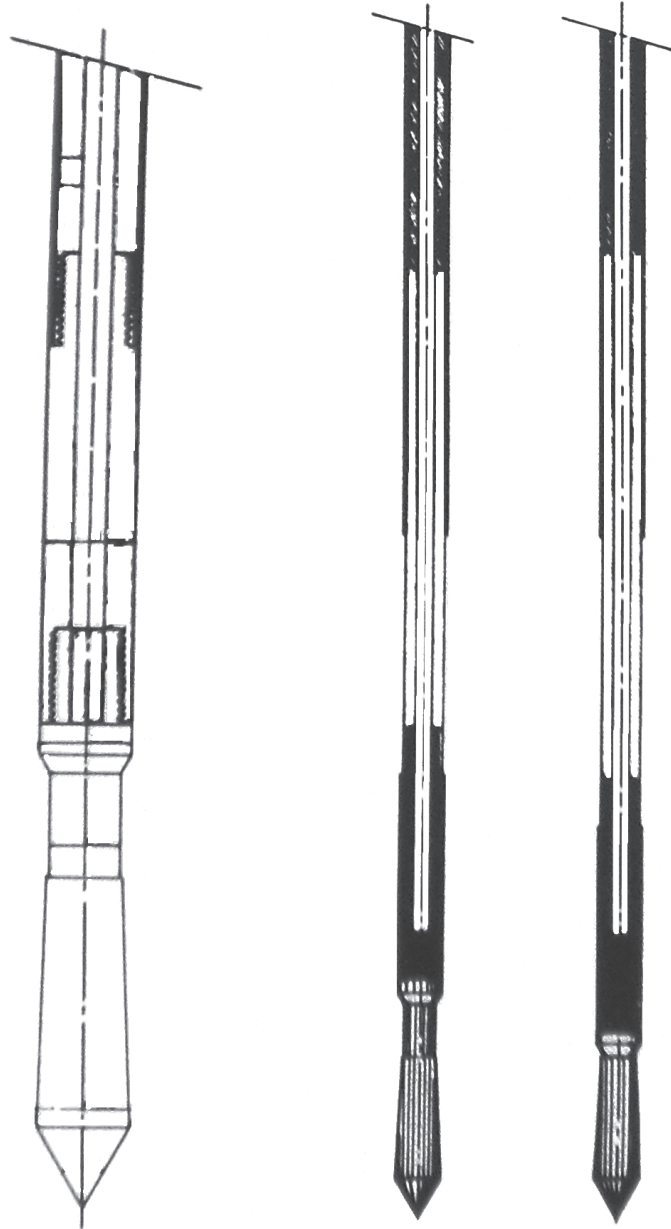
Şekil 2.17. Haefeli Fehlmann statik-dinamik penetrometresi (Sanglerat, 1982)

Jangot-Bonneton statik-dinamik penetrometre (Fransa): 1950 yılında Andina ve Bauer, Jangot-Bonneton isimli firmayla 90° uç açılı bir penetrometrenin patentini almıştır (Şekil 2.18). Bu alet Dutch ve Alman penetrometrelerine benzer fakat bazı özellikler eklenerek tasarlanmıştır; ucu otomatik ilerliyor ve orijinalde 25 mm olan ucu hassas direnç ölçümleri için ince ucuyla değiştirilebilmektedir.



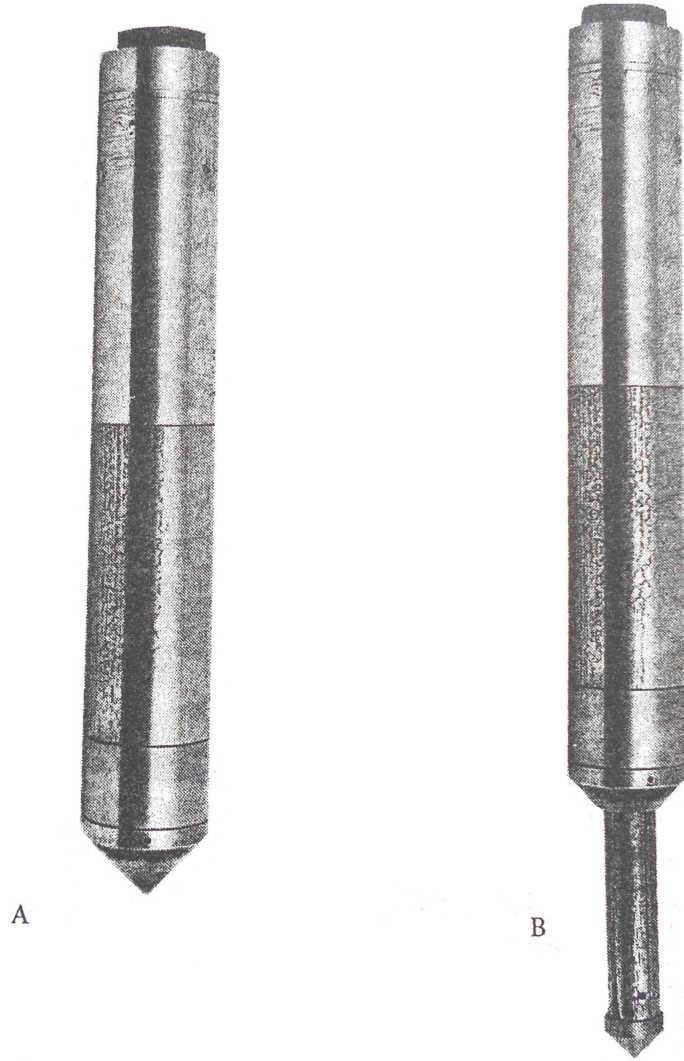
Şekil 2.18. Jangot-Bonneton statik-dinamik penetrometresi ucu (Sanglerat, 1982)

Meurisse statik-dinamik penetrometresi: Meurisse dışında ceketi bulunan bir penetrometreye patent almıştır (Şekil 2.19). Dış ceket koruyucu vazife görmektedir. Yük hem iç mile hemde dış cekete uygulanabilmektedir. Böylece uç direnci yada dış çevre sürtünmesi ölçülebilmektedir. Fakat uç çevresindeki kısa bir uzunluğun çevre sürtünmesi ölçülebilmektedir. Meurisse, 1965 yılında ise penetrometresini deniz tabanında kullanılacak şekilde geliştirmiştir (Sanglerat, 1982).



Şekil 2.19. Meurisse statik-dinamik penetrometresi ucu (Sanglerat, 1982)

Andina statik-dinamik penetrometre (İsviçre ve Fransa): Bu penetrometre özellikle daha zayıf katmanların olduğu tabakalı zeminlerde kullanışlı olmaktadır. Bu penetrometrenin verileri killi ortamda ve su altında yorumlama güçlüğü getirmektedir. Andina penetrometresine ilk İsviçre’de patent alınmıştır ve ilk olarak 1967 yılında Fransa’da üretilerek kullanılmıştır. Penetrometre birbiri içine girmiş iki uçtan oluşmaktadır (Şekil 2.20). Sağlam zeminlerde ince uç ilerleyerek ek bilgi elde etmektedir. 15 ton kapasitelidir. Dış çapı 80 mm, uç açısı 90^0 uç alanı 50 cm^2 ’dir. Çevre sürtünmesini ölçen bölge 50 mm çapında (alanı 628 cm^2) ve 250 mm yüksekliğindedir. İç sondanın uç alanı 12 cm^2 , uç açısı 90^0 , dış çapı 39 mm’den 35 mm’ye düşmektedir (Sanglerat, 1982).



Şekil 2.20. Andina statik-dinamik penetrometresi ucu (Sanglerat, 1982)

2.1.2. Penetrometrelerde yeni gelişmeler

Mekanik penetrometreler halen yaygın olarak kullanılsa da, kullanım hızı ve kolaylığı sayesinde pek çok ülke de elektrikli penetrometrelerin kullanımına geçilmektedir. Şekil 2.21’de ki mekanik sürtünme konileri ile Şekil 2.22’de ki elektrik sürtünme konileri arasında bir karşılaştırma yapıldığında, mekanik ve elektrik koni geometrilerinin önemli ölçüde farklı olduğu görülmektedir. Bu durum koni verilerinin yorumlanmasında önemli farklılıklara yol açmaktadır.



Şekil 2.21. Begemann mekanik sürtünme konileri (penetrometreleri)



Şekil 2.22. Elektrikli sürtünme penetrometreleri

Elektrikli koni verilerinin değerlendirilmesi, batırma işlemi sırasında dahi yapılabilmektedir. Değerlendirme sırasında konik uç direnci ve çeper sürtünmesi

grafiklerinin çizilmesi yanında zemin türü ve zemin parametreleri hakkında bilgiler de elde edilebilmektedir. Elektrikli penetrometrelerin bu özelliği, mühendislerin daha deney sırasında saha inceleme ve inşaat mühendisliği işlerinin tasarımı hakkında karar vermelerine imkân sağlamaktadır.

Elektrikli penetrometrelerin kullanımlarının kolay olması, kuvvet ölçümünün uygulama noktasına yakın yerde yapılması (sürtünme ve tij kısaltma etkilerinin olmaması) ve zeminde derinlikle sürekli bir şekilde veri sağlanması önemli avantajlar olarak görülmektedir. (Meigh, 1987) elektrikli penetrometre kullanmanın avantajlarını aşağıdaki şekilde sıralamıştır;

- Özellikle zayıf zeminlerde olmak üzere, sonuçların doğruluk derecesi ve tekrar edilebilirliği,
- İnce katmanların daha iyi bir şekilde tespit edilmesi (çünkü okumalar çok daha sık aralıklarla yapılabilmektedir),
- Operasyon hızının genel anlamda yüksek olması,
- Bir dizi sensörün konik uç içine veya yukarısına yerleştirilebilmesi,
- Veri analizinin daha kolay olması.

Standart olarak ölçülen konik uç direncinin yanında çeper sürtünmesi ölçümleri de yaygın olarak yapılmaktadır. Ayrıca, koni imalatçısının sağladığı ürüne göre, aşağıdaki ölçümler de yapılabilmektedir:

- Koninin düşeyden sapmasını kontrol etmek amacıyla koni eğiminin ölçümü
- Boşluk basıncı ölçümü (piyezokoni ile yapılır),
- Zemin öz direnci ölçümü (örnek olarak; kirlenme araştırmalarında kullanılmaktadır),
- Yer titreşiminin ölçümü (üç bileşenli jeofon kullanarak yapılmaktadır)
- Gama ışını geri saçınım ölçümü (yoğunluk ölçümünde kullanılmaktadır),
- Basınç değerleri ölçümü (Presiyometre ile yapılmaktadır)
- Ses ölçümü (akustik penetrometre ile yapılmaktadır) (Clayton vd., 1995).

Penetrometrenin zamanla gelişimini (A.P. van den Berg, 2011) tarafından Şekil 2.23'te verilmiştir.

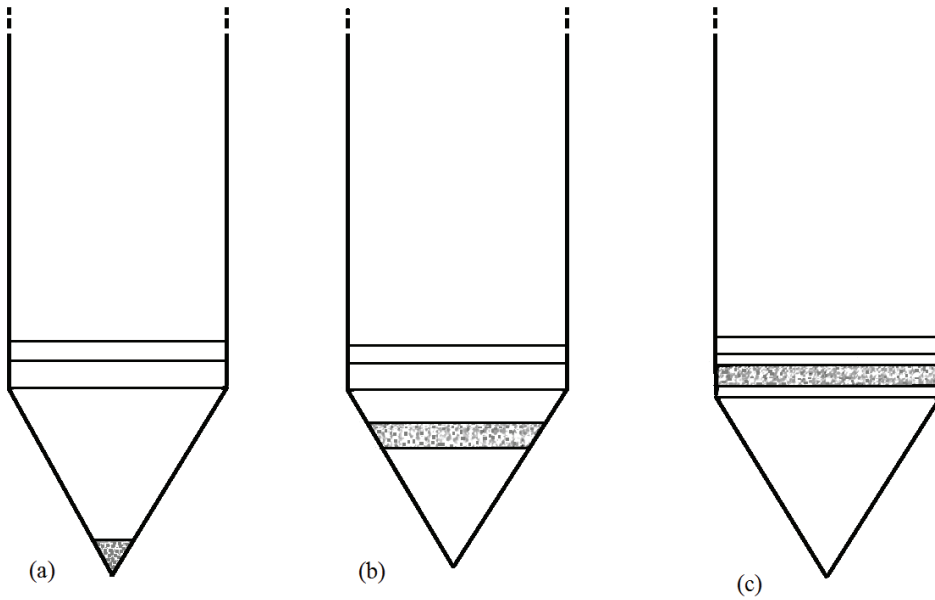


- a) Konik ceketli mekanik koni (1948)
 b) Sürtünme ceketli mekanik koni (1953)
 c) 2 cm² elektrikli sürtünme konisi (1998)
 d) 5 cm² elektrikli sürtünme konisi (1997)
 e) 10 cm² kablosuz elektrikli piyezo konisi (1997)
 f) 10 cm² elektrikli piyezo konisi (1994)
 g) 10 cm² elektrikli sisimik koni (1998)
 h) 10 cm² tek kullanımlık piyezo konisi (1988)
 ı) 15 cm² elektrikli sürtünme konisi (1989)
 j) 25 cm² elektrikli sürtünme konisi (1986)

Şekil 2.23. Penetrometrenin zamanla gelişimi (A.P. Van den Berg, 2011)

Penetrometre ölçümlerinde çok önemli bir gelişme 1980'lerde konik ucun hemen arkasına bir piyezometrenin yerleştirilmesiyle olmuştur. Piyezokoni aletiyle (CPTU) zeminin kayma direnci yanında aşırı konsolidasyon oranı, sıvılaşma potansiyeli, hatta sükunette toprak basıncı katsayısı da ölçülebilmektedir. Uygulamada aletin daha etkin kullanılmasıyla ilgili araştırmalar sürdürülmektedir. Arazi deneyleri arasında zemin parametrelerini en iyi belirleyebilecek deney konumunda olduğu düşünülmektedir. Deney sonuçları, operatör yeterliliğinden oldukça az etkilenmektedir.

(Clayton vd., 1995) bildirdiğine göre konik penetrasyon deneyi sırasında boşluk suyu basıncının ölçümü konik uç direnci ve çeper sürtünmesi kadar yaygın değildir. Ancak, son yıllardaki gelişmeler; özellikle yumuşak, kohezyonlu zeminlerde bu özelliğin ölçülmesinin çok önemli olduğunu ortaya koymuştur. Bu düzenekte gözenekli bir bileşen ile birlikte bu bileşenin arkasındaki boşluğa yerleştirilmiş, elektronik boşluk basıncı ölçüm sensörü bulunmaktadır. Şekil 2.24'de görüldüğü gibi, bu gözenekli elemanın üç değişik pozisyonu söz konusudur.



Şekil 2.24. Piyezokonilerin gözenekli uçlarının pozisyonları

Piyezokoninin başlıca uygulama şekilleri aşağıdaki gibidir:

Profil çıkarma: Boşluk basıncı ölçüm elemanının sisteme eklenmesiyle, kohezyonlu yumuşak çökeller içindeki ince granüle katmanlar tespit edilebilir. Bu katmanlar, yumuşak kil çökelinin konsolidasyon hızı açısından çok önemlidir.

Zemin türünün belirlenmesi: Aşırı boşluk suyu basıncının net konik uç direncine oranı zemin türünün belirlenmesi açısından önemli bilgiler sağlar.

Statik boşluk basıncının belirlenmesi: Granüle zeminlerde (sönümlenmenin hızlı olduğu zeminlerde) statik boşluk basıncı ölçülebilir.

Arazide konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesi: Killerde, koniyi durdurmak ve boşluk basıncını zamanın fonksiyonu olarak ölçmek suretiyle, yatay konsolidasyon katsayısı (c_v) bulunabilir (Torstensson, 1977).

Sismik ölçüm özelliği olan penetrometre tipi, son yıllarda giderek yaygınlaşmaktadır. Jeofizik bilim dalındaki gelişmelerin de etkisiyle giderek daha fazla kabul gören bu koni çeşidinde, sürtünme ceketinin üzerine konumlandırılmış üç bileşenli jeofon bulunur. Kuyu aşağı deney yöntemiyle çok küçük birim deformasyon rijitliği değerinin ölçülmesi sismik koninin önemini artırmıştır.

Günümüzde de penetrometrelerin geliştirilmesi için tüm dünyada çalışmalar sürmektedir. Bu çalışmalardan ortaya çıkarılan penetrometreler zeminin farklı parametrelerini ölçmeye yaramaktadır. Geliştirilen bazı penetrometreler bölgesel kullanımla sınırlı kalmaktadır. Bazıları ise kullanım zorluğu, yüksek maliyet yada yeteri kadar tanıtılmadığından dünyada kullanım alanı bulamamaktadır. Günümüzde geliştirilen bazı penetrometreler şöyle sıralanabilir.

Vertek Görüntü Sondası: Görüntü sondası toprak altı görüntüleri sağlamak için geliştirilmiş yeni ve yenilikçi zemin araştırma aletidir. Sonda, standart koni sürme donanımı ile zemin içine itilir. Paslanmaz çelikten üretilen koni, 60 mm yarıçapında ve 1 m uzunluğundadır (Şekil 2.25).

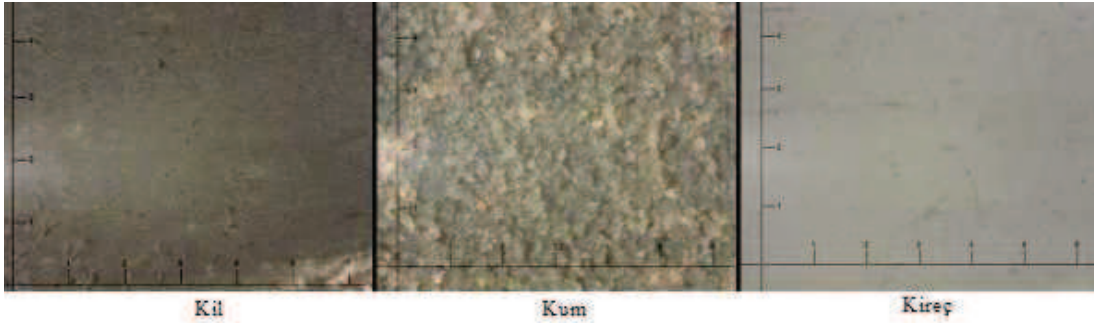


Şekil 2.25. Vertek görüntü sondası (Lankelma, 2008)

Video konisi, 1998 yılında GeoDelft tarafından geliştirilmiştir. Safir camdan kamera penceresi koninin 300 mm gerisinde yer almaktadır. İnceleme camı 5x7 mm büyüklüğündedir. Camın arkasına bir ışık kaynağı, yansıtıcı ve kamera yerleştirilmiştir (Geodelft, 2008).

Deneyi araç içinde izleyebilmek için kamera bir elektronik sinyal kablosuyla kayıt cihazına bağlanmıştır. 56 mm çapında uzatma tüpleri kullanılarak görüntü sondası zemine uygun bir hızda (saniyede 5 mm) itilir. Aynı zamanda görüntü kaydı yapılır. Doğrudan görüntü almak da mümkün olmaktadır. Zemine batma sırasında, görüntü kaydedebilmek için kamera merceğinden bir ışık demeti sınır zemin yüzeyine verilir.

Görüntü: Görüntü, toprağı 752x582 piksellik çözünürlükte gösterir. Zemin tanecik ve partiküllerin merceğ yüzeyinden görüntüsü iyice büyütülerek ekrana verilir. Monitörün tipine göre 100 kata kadar büyütülebilir. Bu bilgilerin gözle elde edilmesi mümkün değildir. Örneğin plak şeklindeki bir mineral diğerlerinden ayırt edilebilmete veya küçük tanecik ve gaz kabarcıklarını görmek mümkün olmaktadır. Aşağıda Şekil 2.26'da kum, kil ve kirecin ve Şekil 2.27'de kaba temiz kum, kömür katran atığı ve gazolin atığı görüntüleri verilmektedir (Lankelma, 2008).



Şekil 2.26. Görüntü sondası sensöründen alınmış görüntüler (Lankelma, 2008)



Şekil 2.27. Görüntü sondası görüntüleri (Vertek, 2011)

Elektrik  ziletkenlik sondası: Bu yöntem, zeminin iki standart özelliği olan uç direnci ve evre sürtünmesinin derinlikle değişimi yanında yeraltı iletkenliğinin derinlikle değişimini de belirleme olanağı sağlamaktadır. Standart CPT ye benzemektedir, basit batma parametreleri (q_c , f_s) zemin sınıflamasını yapmaya olanak sağlamaktadır (şekil 2.28).

Zeminde yeraltı iletkenlik ölçümü, su muhtevası ile değişen tabakaları ayırmaya, su tablası derinliği ve kılcal yükselme kalınlığını da kapsayan zemin özelliklerini belirleme imkanı tanımaktadır (Lankelma, 2008).

Çevresel değerleri ölçüm sondası: Kirletilmiş arazilerin çevresel değerler açısından ölçümünü yapmak için geliştirilmiştir. Kimyasal kirleticilerle ve petrol atıklarıyla kirlenen arazilerin incelemeleri için tasarlanmıştır (şekil 2.29).



şekil 2.28. Elektrik  ziletkenlik sondaları (Lankelma, 2008)



Şekil 2.29. Çevresel değerleri ölçüm sondası (A.P. van den Berg, 2008)

Ölçüm; normalde bu sondalar piyezo uçla donatılmıştır ve boşluk suyu basıncını, çevresel sürtünmeyi ve uç direncini ölçmektedir. Sensorlar koninin içine yerleştirilmiştir ve koni ucunun az arkasına yerleştirilmiş ölçüm hücresine bir yeraltı suyu örneği gösterilir. Ölçüm, yeraltı suyunda çözünen atmosfer oksijeninin etkilerini azaltmak için ölçüm nitrojen atmosferinde yapılır.

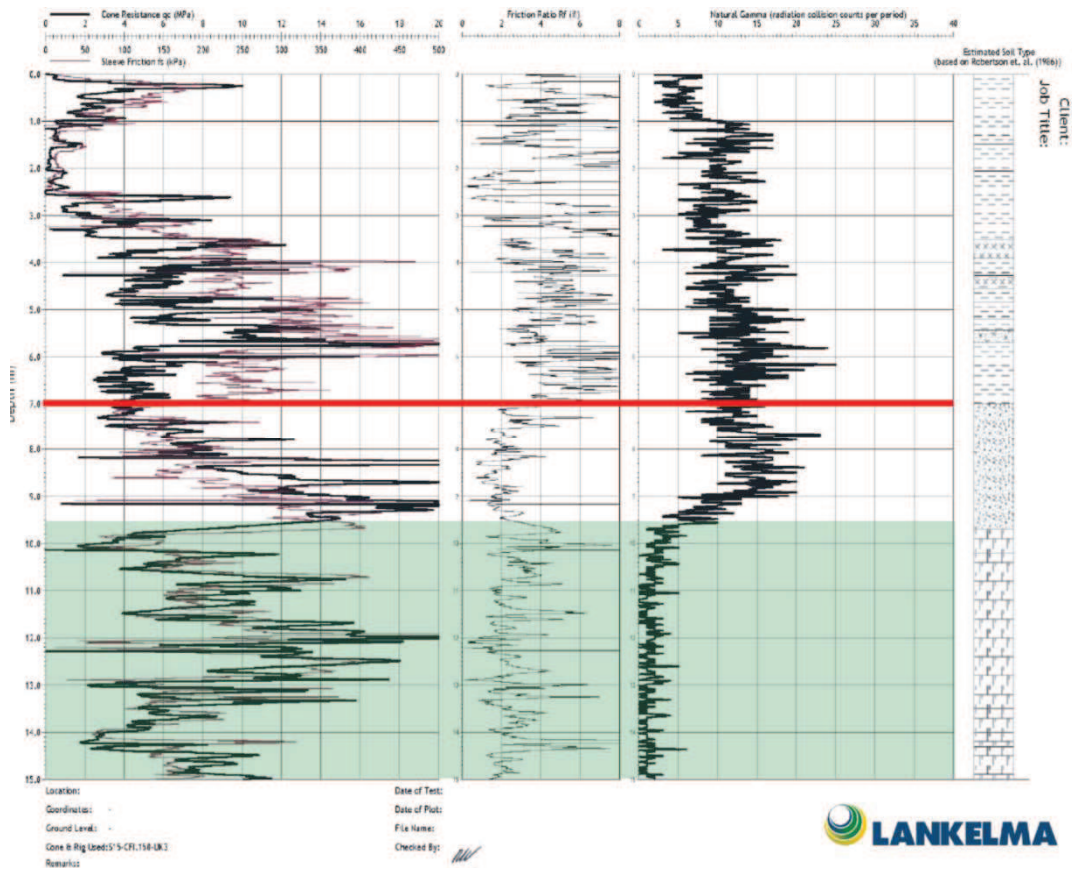
Ölçüm, kirliliğin büyüklük ve çeşidini belirlemeyi mümkün kılmaktadır. Böylece laboratuvar deneylerine gerek olup olmadığına karar verilebilmektedir. Çevresel değerleri ölçüm sondası pH, redoks potansiyeli ve ısıyı ölçmektedir. (A.P. van den Berg, 2008).

Gama Işını Sondası: Gama ışını ölçümleri, uranyum (U), toryum (Th) iz elementlerinin konsantrasyonundan kaynaklanan doğal radyoaktivite değişimlerini ölçmektedir. Bu sondalar 1 inç çapından daha küçük detektörlerle donatılarak doğal radyo aktiviteyi kolayca ölçecek konuma getirilmişlerdir (Şekil 2.30). Sonda zemine itilerek ölçümler alınır.



Şekil 2.30. Gama ışını sondası (Lankelma, 2008)

Killi zeminler içerdikleri bol mineraller sebebiyle doğal radyoaktiviteye sahiptirler. Bu yüzden ölçümlerde zorluklar ortaya çıkmaktadır. Örnek bir deney sonucu olarak Şekil 2.31’de 7 m’lik kili geçtikten sonra kum veya kireçli zemine girildiğinde grafiğin nasıl düzgün bir hal aldığı görülmektedir (Lankelma, 2008).



Şekil 2.31. Gama ışını sondası veri çıktısı (Lankelma, 2008)

Hidrolik konduktivite sondası: Hidrolik konduktivite bazı zemin mekaniği problemlerinde önemli rol oynamaktadır. Çünkü, düşey yer altı suyu akışı, çoğunlukla akiferlerde önemli yer tutmaktadır. Akiferlerin düşey hidrolik konduktivitelerinin ölçümü arzulanmaktadır. GeoDelft, $10^{-3} - 10^{-7}$ m/s aralığında permabilite ölçümü yapabilen ve derinliğe karşı düşey konduktivite ölçüm sonucunu verebilen bir sonda geliştirmiştir. 36 mm çapındaki sonda zemine CPT düzeneği ile en fazla 30 m derinliğe kadar itilmektedir. Düşey hidrolik konduktivite ölçümü düşey derinliğin fonksiyonu olarak yapılmaktadır (Geodelft, 2008).

Hidrokarbon Sondası: Sıvı fazında olmayan likitlerin toprak olmayan ortamda incelenmesi için geliştirilmiş bir konik penetrasyon deneyi (CPT) dir (Şekil 2.32).

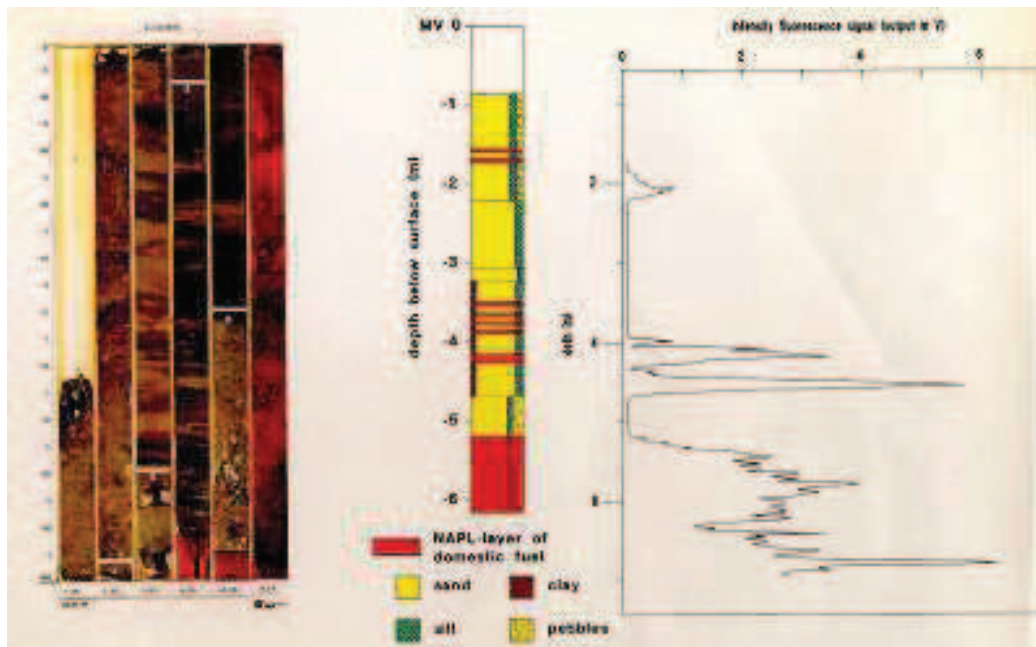


Şekil 2.32. Hidrokarbon sondası (Lankelma, 2008)

Kimyasal bitkiler altında, rafineri ve petrol istasyonlarında sıklıkla hidrokarbona toprak olmadan (küçük parçalar ve yüzen tabakalar dışında) rastlanabilmektedir. Bu yapıyı dikkatli incelemek gerekmektedir. Hidrokarbon sondası derine doğru sürekli incelemektedir, arazide, zemin içinde hidrokarbon malzemelerden ne kadar bulunduğunu belirlemektedir.

Saf bir malzeme olarak hidrokarbonların incelenmesi kolaydır çünkü, aromatik katkılı saf hidrokarbon karışımları ultraviyole (UV) ışınlarıyla aydınlatıldıklarında florasan özelliği göstermektedirler.

Hidrokarbon sondası konik penetrometre deneyi (CPT) sondasına benzemektedir. Ancak sistemi olabildiğince araştırabilecek bir ışık kaynağı içermektedir. Toplam 55 mm çapındadır. Batma sırasında pencere arkasından UV ışık kaynağı ile aydınlatılan zeminden ölçümler alınmaktadır. Işık kaynağının hidrokarbonlarda oluşturduğu florasan etkisi sondadaki bir kayıt cihazıyla alınmaktadır (Şekil 2.33) (Lankelma, 2008).



Şekil 2.33. Hidrokarbon sondası örnek veri çıktıları (Lankelma, 2008)

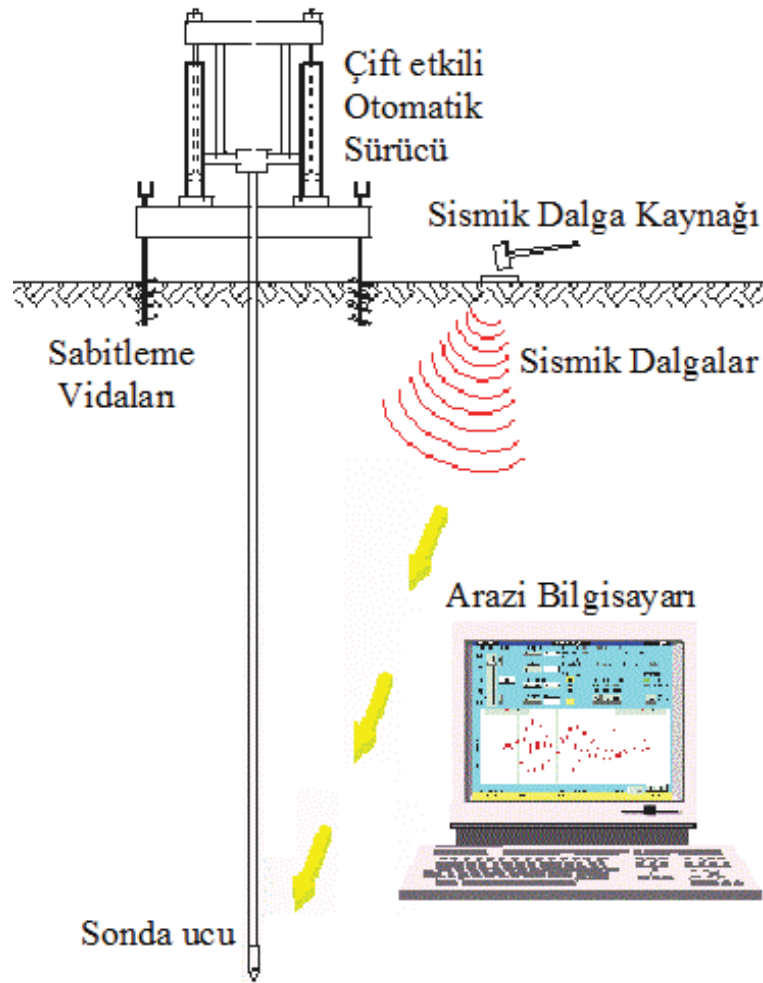
Manyetometre sondası: Yeni yapılaşma alanlarının açılması ya da eskilerinin değiştirilmesi durumunda arazide eski bombaların var olup olmadığının incelenmesi işinde gerekli olabilmektedir. Araştırma derinliğinin yumuşak zeminlerde daha fazla olması gerekmektedir; çünkü bombalar turba gibi yumuşak zeminlerde Londra kili gibi katı zeminlere göre daha derine gömülmektedir.

Manyetometre sondası zemine hidrolik olarak bastırılmaktadır. Manyetometre sürekli zemindeki manyetik alanı okumaktadır (Şekil 2.34). Bomba, boru, tank gibi metal malzemeler manyetometrenin verilerinde anomali oluşturmaktadır. Sezyum buharlı manyetometrenin 500 kg bomba gibi cisimler için 2 m araştırma genişliği vardır (Zetica, 2008).

Sismik sonda: Sismik sonda zeminin küçük kayma gerilmesi modülünü ölçmektedir (Şekil 2.35). Sondanın 10 cm² ve 15 cm² çaplı olanları mevcuttur. Piyzometrik sondanın ekipmanlarını da içermektedir. Sonda zeminin geoteknik parametresi olan q_c , f_s ve yüzeyden oluşturulan sismik P ve S dalgası etkilerini ölçmektedir (gctscanada, 2008).



Şekil 2.34. Manyetometre sondaları (Zetica, 2008)



Şekil 2.35. Sismik sonda deneyi (gctscanada, 2008)

Sonik sonda: Zemin etüt firması Lankelma ve Zetica CPT için yeni bir araç geliştirmiştir. Bu sonik sonda yüzey kaynağına gerek kalmadan zeminin sismik özelliklerini belirlemektedir. Alet akustik hız ölçen bir cihaz içermektedir.

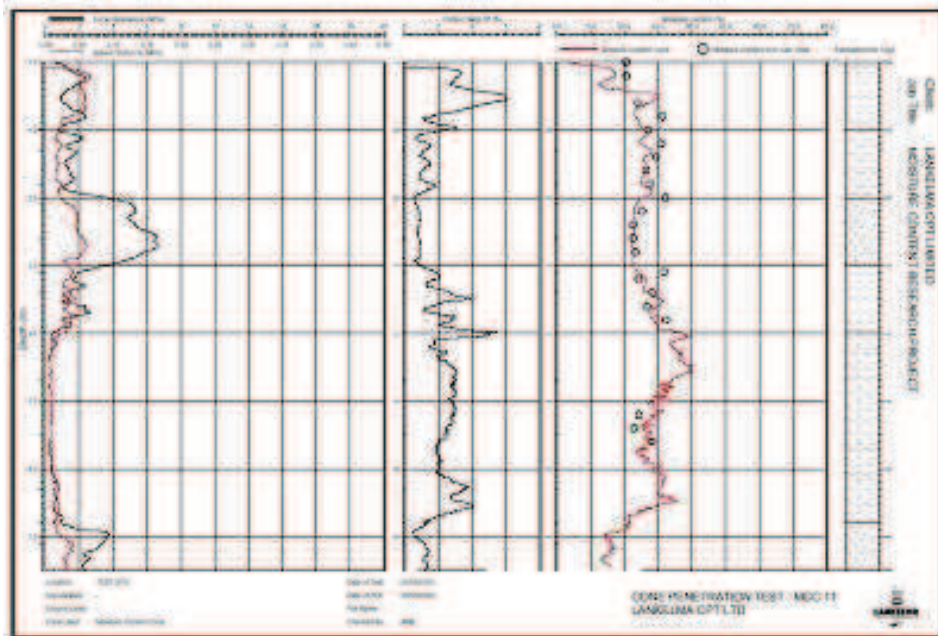
Akustik hız ölçücü bir vurunun mekanik enerjisini ya da bir ses kaynağının akustik frekansını algılamaktadır. Ses kaynağı oluşturmak için bir ses üretici cihazla birlikte aşağı indirilmektedir.

Nem sondası: Nem sondası (soil moisture probe SMP) elektrikli sondanın arkasına zeminin nemini ve geoteknik özelliklerini birlikte ölçmeye izin veren aletlerin eklenmesiyle geliştirilmiştir (Şekil 2.36).



Şekil 2.36. Nem sondası (Lankelma, 2008)

Alet halka şeklinde ve iyi izoleedilmiş iki elektrodun sisteme entegre edilmesiyle oluşturulmuştur. Sistem ölçümleri, elektrik karışıklığı olmadan, eş zamanlı yapabilmektedir (Şekil 2.37) (Lankelma, 2008).



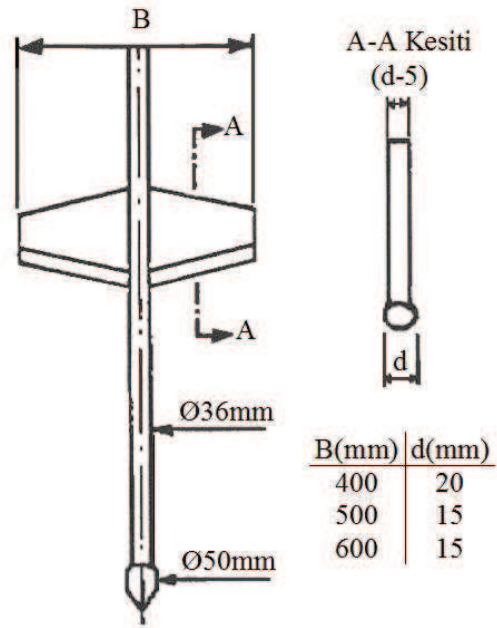
Şekil 2.37. Nem sondası deneyi veri çıktısı (Lankelma, 2008)

Kanatlı sonda: Konik bir sondanın biraz arkasına kanatlar eklenerek yeni bir penetrometre geliştirilmiştir. Deneyin prensibi, birbirine eklenen tijlerin ucuna takılan koninin, konvoy şeklinde zemine itilmesi ve itme ya da halatla çekilmesi sırasında itme yada çekme kuvvetinin ölçülmesi esasına dayanır (Şekil 2.38).

İtilen kanatlı sonda: Tijlerin ucuna takılan koninin konvoy şeklinde zemine itilmesi ve itme kuvvetinin ölçülmesi esasına göre kullanılır (Şekil 2.39). Grup ekleriyle sürülen konvoyun içinde herhangi bir noktada ölçüm yapılabilir. Bu yöntem çapları iyi seçilmiş tijlerin ucuna takılan koninin konvoy şeklinde zemine itilmesi sırasında itme kuvvetinin ölçülmesi esasına dayanır. Grup ekleriyle sürülen konvoyun içinde herhangi bir noktada ölçüm yapılabilir. En büyük avantajı kablo gerektirmediğinden her ortamda kullanılabilmesidir. Dezavantajı ise düşey gidip gitmediğinin anlaşılabilmesidir (Lankelma, 2008).

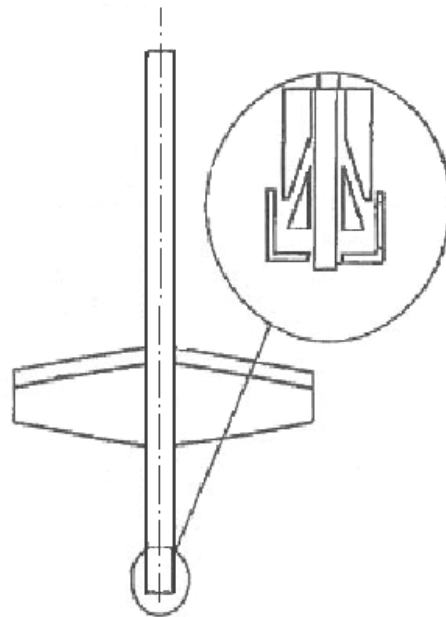


Şekil 2.38. Kanatlı sonda (Lankelma, 2008)



Şekil 2.39. İtilen kanatlı sonda (Lankelma, 2008)

Çekilen kanatlı sonda: Bu yöntemle bir sonda takım ucunda zemine itilir. Bir halat, takım merkezinin yukarısına gelen sondaya ve bir CPT donanımı şahmerdanına eklenir. Takım çekilirken kabloyu çekmek için gerekli güç kaydedilir (Şekil 2.40). Takıma eklenerek kullanılması avantajı, rastgele takıma eklenememesi ve halatın CPT donanım şahmerdanına sıkışabilmesi dezavantajıdır (Lankelma, 2008).



Şekil 2.40. Çekilen kanatlı sonda (Lankelma, 2008)

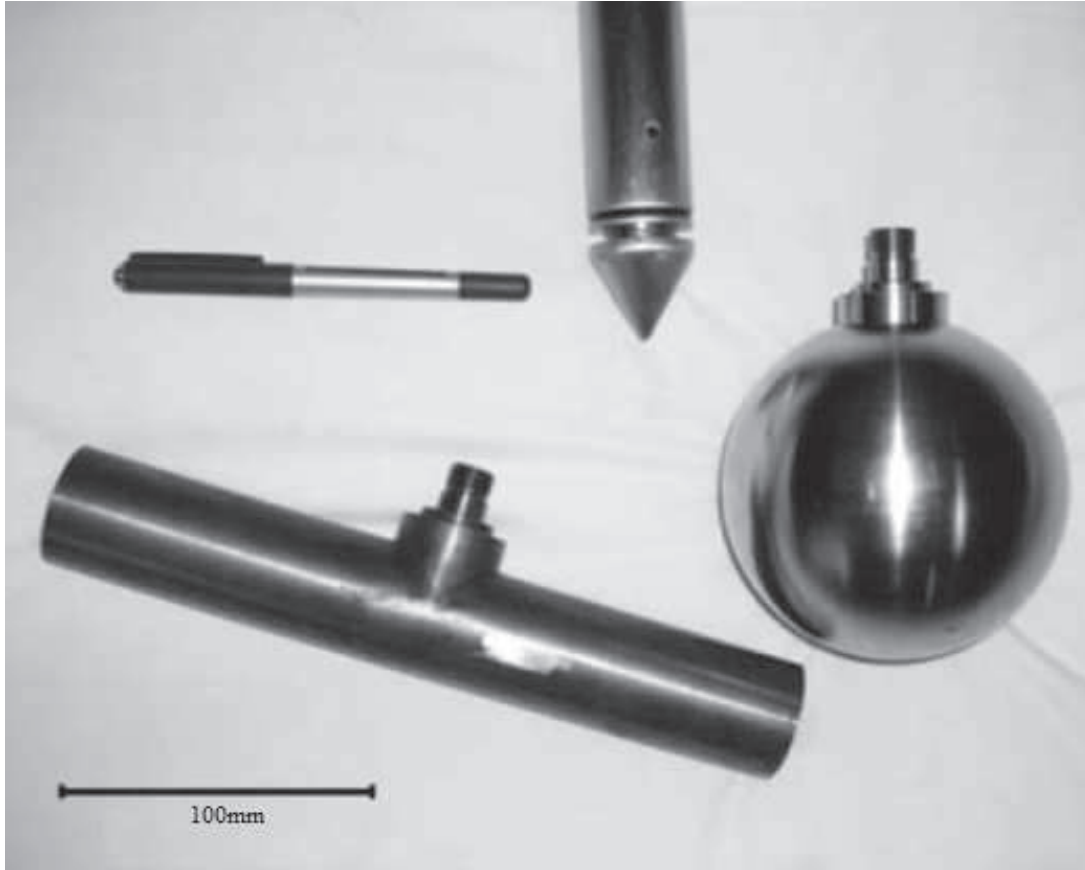
T-çubuğu sondası: Yumuşak zeminlerde drenajsız kayma direncini c_u , elektrik sondasını ve elektrikli sonda dataları için hazırlanmış korelasyonları kullanarak doğru belirleyebilmek zordur. Bu belirsizliklerden dolayı; yeni ve tuhaf bir T-Çubuk sondası geliştirilmiştir (Şekil 2.41).

T-bar penetrometre ilk olarak santrifüj modeli testlerinde güç profil doğruluğunu artırmak için Stewart ve Randolph tarafından 1991 ve 1994 yıllarında Batı Avustralya Üniversitesinde tanıtılmıştır. T-çubuğu sondası, 250 mm uzunluğunda ve 40 mm çapında bir çubuğun tijlere dik bağlanması ve hemen üzerine bir yük hücresi eklenmesiyle yapılmıştır. Cihaz boşluk suyu basıncını ölçmek için de donatılabilmektedir. T-çubuk sondasının iki avantajı vardır;

- 1) Yük hücresi, örtü basıncı ve ortamın gözenek suyu basıncı için herhangi bir düzeltme yapılması gerekmeden, zemin direncinden kaynaklanan toplam kuvveti ölçebilmektedir.
- 2) T-çubuğundaki net basınç ile zeminin kayma direnci arasındaki korelasyonu %10 hatayla verebilmektedir (Lankelma, 2008).



Şekil 2.41. T-çubuğu sondası (Lankelma, 2007)



Şekil 2.42 Konik penetrometre ve sürekli itilen probalar (Boylan ve Long, 2007)

2.2. Günümüzde Yaygın Kullanılan Penetrometreler

En sık ve yaygın kullanılan penetrometreler zemine çakarak (dinamik) ya da iterek (statik) sokulmaktadır. Günümüzde statik ve dinamik penetrometrelerin değişik türleri kullanılmaktadır. Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), dünyanın tüm bölgelerinde yoğun olarak kullanılan yöntemdir. Bunun nedeni ise yöntemin sonuçlarının yorumlanmasındaki tecrübe ve yöneme aşinalıktır. Statik penetrometrelerden en çok gelişmiş ve ünlü olan Konik Penetrasyon Deneyi (CPT)'dir. CPT, başta Avrupa ve Uzakdoğu olmak üzere Güney Amerika'nın da bazı bölgelerinde çok popülerdir. CPT ve SPT International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE) tarafından standartlaştırılmıştır. Aynı zamanda farklı ülkeler için ulusal standartlar da mevcuttur.

2.2.1. Standart penetrasyon deneyi (SPT)

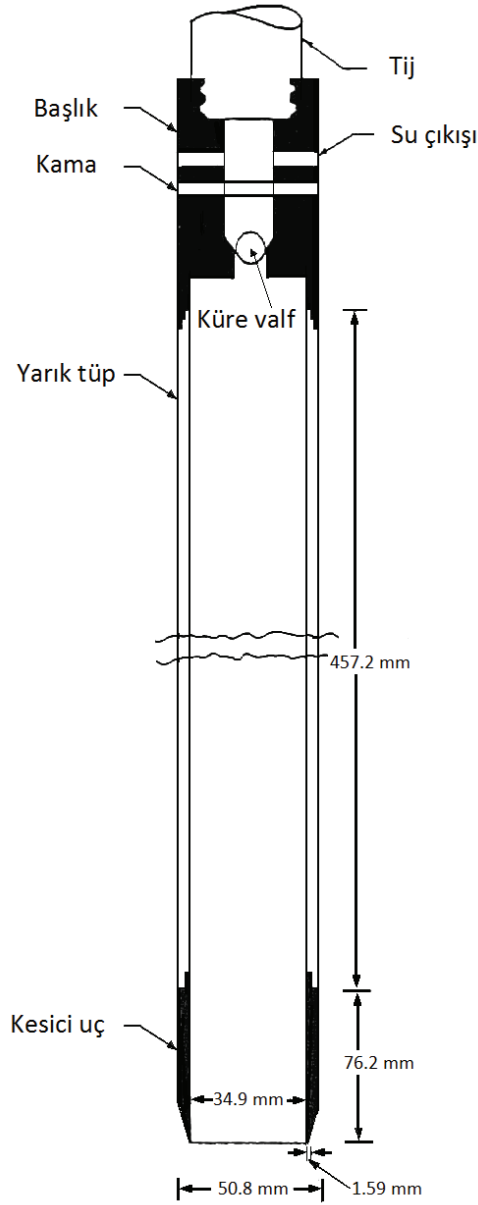
1902 yıllarında, Boston'da Gow Construction Co. nun sahibi Colonel Charles R. Gow, 1 inch çapında numune alıcılarla araştırma kazılarına başlamıştır. 1920 yılı sonları ile 1930 yılının başları arasında, bu yöntem Gow'un mühendislerinden olan Harry Mohr tarafından standardize edilmiştir. Gow'un numune alıcısını kimse kullanmamış fakat Karl Terzaghi ve Arthur Casagrande üzerinde çalışarak bunu tanıtmıştır. Bu tanıtımda Karl Terzaghi'nin Harry Mohr ile numune alıcısı üzerinde çalışarak ,Kumlarda izin verilebilir taşıma basıncı ile SPT sayıları korelasyonu, başlıklı yazılarını Zemin Mekaniği ve Mühendislik Uygulamaları kitabında yayımladıkları 1947 yılına kadar etkili olmamıştır. Bir yıl sonra Terzaghi, Texas Üniversitesinde düzenlenen 7. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Konferansında, Zemin araştırmalarında yeni trendler, konulu sunumunda 2 inch Gow numune alıcısına Standart Penetration Test adını koyarak yayımladı. Daha sonra 1949 yılında, ASCE (Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneği) tarafından, İnşaat Mühendisliği Amaçlı Zemin Araştırmaları ve Numune Alma, adıyla kabul edilmiştir ve 1962 ve 1965 yıllarında The Engineering Foundation'da basılmıştır. Sprague and Henwood 2 inch çaplı Mohr yarıklı numune alıcı kaşığı, 1950 yılının başlarında üretmeye başlamış ve ASTM'nin D1586 (1984 yılında revize edilmiştir) test yöntemi olarak resmen kabul etmesinin ardından 1958 yılında ulusal standart haline gelmiştir. Bu gelişmelerin ardından, SPT ile ilgili araştırmalar artmıştır (Rogers, 2009).

1927 yılında geliştirilen Standart Penetrasyon Testi (SPT) büyük ölçüde dünya çapında uygulanmaktadır. Kuzey ve Güney Amerika, İngiltere ve Japonya'da çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu uzun süreli birikimden dolayı bu deney, mühendislik uygulamasında çok oturmuş bir deneydir olmuştur (Coduto, 2001). Kuzey Amerika'da SPT, zemin incelemelerinde kullanılan en yaygın arazi deneyi durumundadır (Horn, 1979). (Kovacs ve Salomone, 1982) Amerika Birleşik Devletlerinde, rutin temel tasarımlarının %80-90'ında SPT-N değerlerinin kullanıldığını ifade etmişlerdir. Kumlu ve çakıllı zeminlerin hakim olduğu Japonya'da bu oranın daha da yüksek olduğu bilinmektedir. (Mori, 1979)'a göre Japonya'da ön inceleme aşamasında sondajların %90 dan fazlası SPT ile birlikte yapılmaktadır. Bu deney Türkiye'de ve birçok ülkede en fazla tercih edilen deneydir

(Durgunoğlu ve Toğrol, 1974). Türkiye'de SPT hemen hemen her zemin inceleme programının ana kısımlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. SPT bir dinamik sondalama deneyi olup yurdumuzda da yaygın uygulama alanı bulmuş yerinde deney tekniğidir. Ülkemiz için de yapılmış çalışmalar mevcuttur (Durgunoğlu ve Toğrol, 1974), (Sağlamer, 1979), (İyisan ve Ansal, 1990) ve (Sivrikaya ve Toğrol, 2002).

Dünyanın farklı bölgelerinde yaygın olarak kullanılan standart penetrasyon deneyi çeşitli avantajlara sahiptir. Standart penetrasyon deneyi, sıklık, zemin yapısı, gerilme-deformasyon özellikleri ve ortalama efektif gerilme gibi etkileri yansıtan bir arazi deneyidir. Ekipmanı nispeten basit ve sağlamdır. Araştırmanın bir parçası olarak, genellikle örselenmiş bir zemin numunesi alınarak dane boyutu karakteristiklerinin belirlenmesine imkân verir. Standart penetrasyon deneyi, yumuşak zayıf kayalardan ince daneli zeminlerden oluşan yumuşak tabakalara kadar çoğu zemin tipinde uygulanabilmektedir. Uzun yıllardan beri kullanılmaktadır ve zemin parametreleri ile ilgili çok sayıda kullanışlı bağıntı geliştirilmiştir. SPT tüm dünyada zeminlerin çeşitli mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan ve tatminkr sonuçlar elde edilen deney yöntemidir.

şekil 2.43'de verilen, ortadan ikiye ayrılabilen (yarık) rnek alıcının zemine sokulması sırasında örnek alıcının ilerlemesi için gerekli vuruş sayısının (zemine sokulması için harcanan enerjinin bir ölçüsü) granüler zeminlerde sıklıkla, kohezyonlu zeminlerde kıvamla ilişkisi grldğinden bu işlem bir standarda bağlanmaya çalışılmıştır.

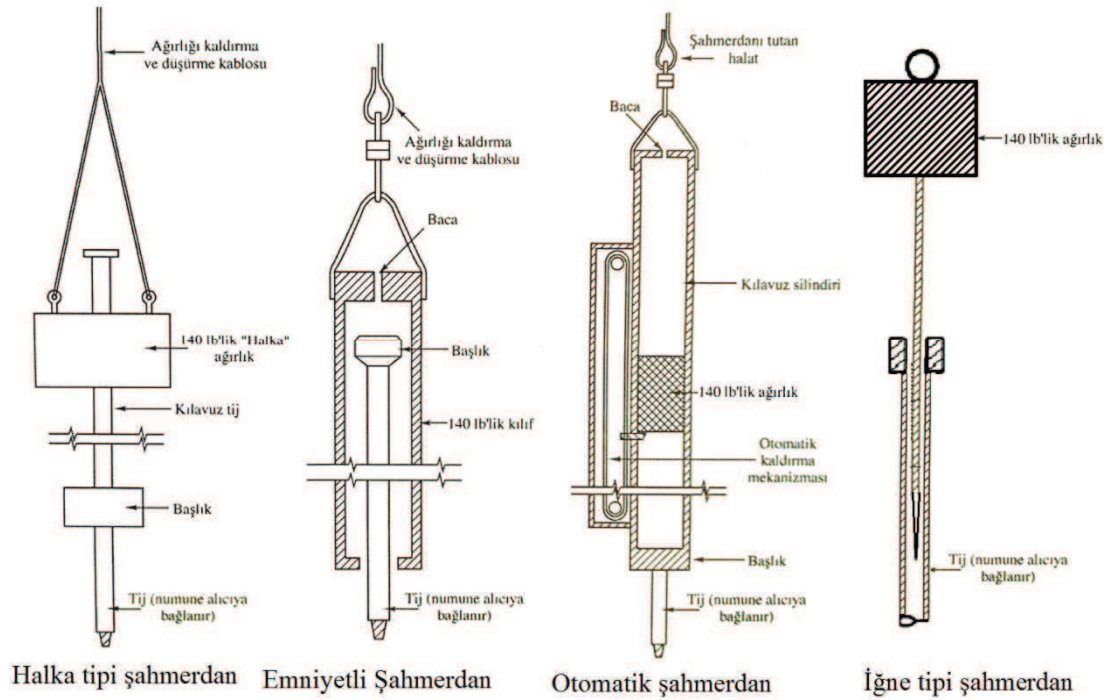


Şekil 2.43. SPT numune alıcı kesit ve boyutları

ASTM D 1586'ya göre belirli bir derinliğe ulaşan sondaj sırasında, sondaj takımı dışarı çekilir ve örnek alıcı indirilir. Standart penetrasyon deneyinde, boyutları Tablo 2.2'de verilen, ince cidarlı numune alma kaşığı sondaj kuyusunun tabanına, 760 mm yükseklikten serbest düşen 63,5 kg ağırlığında bir tokmakla çakılır. Dünyada kullanılan tokmak tiplerinden dördü, Şekil 2.44'de verilmektedir. Numune alıcının ilk 15 cm lik batması dikkate alınmadan (örselenmeden dolayı), sonraki 30 cm batma için gerekli darbe sayısı (N_{30}) kaydedilir. Sondaj kuyusu stabil değilse, muhafaza borusunun kullanılması gerekmektedir. Sondaj kuyusunun çapı 63,5 mm ve 150 mm arasında olmalıdır.

Tablo 2.2. Standart numune alma kaşıklarının boyutları (ASTM D 1587, 1992)

Dış çap	inç (mm)	2 (50.8)	3 (76.2)	5 (127)
Cidar kalınlığı	inç (mm)	0.049 (1.24)	0.065 (1.65)	0.120 (3.05)
Tüp uzunluğu	inç (mm)	36 (0.91)	36 (0.91)	54 (1.45)



Şekil 2.44. SPT şahmerdan (çekiç) çeşitleri (Rigs, 1986 ve Coduto, 2005)

Deney bitirilince takım dışarı alınır, uç ve bağlantı elemanı çıkarılır, zemin örneği tüpten alınarak su muhtevasını koruyacak bir kaba konulup laboratuvara gönderilir. Deney genellikle 1,53 m aralıklarla uygulanmaktadır. Genelde 152–456 mm arasındaki giriş için vuruş, yüzden fazla ($N > 100$) ise deneye son verilmekte ve giriş miktarı yazılmaktadır. Özellikle çok ayrışmış ve zayıf kayalarda istenilen kadar ilerleme sağlanmamış olsa da sonuçlardan yararlanılabilir. Örneğin 50 vuruş için

100–300 mm arasında giriş için çok zayıf kayaç, 30–100 mm arasında giriş için zayıf kayaç ve daha azı için orta–sağlam kayaç tanımlaması yapılabilir. Taş ve çakıllı formasyonlarda, 50 mm den büyük parçaların örnek alıcı ağzına rastlaması gerçek sıklıktan daha fazla sıklıklara işaret edilebilir. Bu nedenle çakıllı zeminlerde SPT kullanımı güvenilir olmamaktadır.

SPT deneyinin örselenmemiş bir zemin kitlesinde yapılması esastır. Yer altı suyu üzerinde kil ve kumlu zeminlerde bu koşul kolayca sağlanabilir. Deneyin asıl amacı kumlar ve çakıllar için göreceli sıklığın bir göstergesi olmasına karşın silt, kil ve zayıf kayaçların kıvam ve mukavemetinin tahmininde de kullanılmaktadır. Basit ve ucuz bir deney olduğu için yaygın olarak kullanılmakta, özellikle sondajdan yeteri kalitede örnek almanın mümkün olmadığı koşullarda çakıllar, kumlar, siltler, kum ve çakıllı kil ve zayıf kayaçlarda zemin parametrelerini yaklaşık vermektedir. Bazı durumlarda sondajdan alınan örselenmemiş örneklerin çok siltli veya kumlu killerin, sert killerin kalitesinin tartışmalı olduğu hallerde laboratuvar sonuçlarının kontrolü olanağı vermektedir. Gerçekçi olamayacak kadar düşük olduğuna inanılan durumlarda diğer yerinde deneylerle de kontrol edilmelidir.

Temel oturması konusunda doğrudan hesaplama yöntemlerinin çoğu SPT penetrasyon direncine dayanmaktadır. Fakat sistematik bir araştırma (Bratchell vd., 1975), (Simons ve Menzies, 1977), (Talbot, 1981), (Milititsky vd., 1982) bunların çoğunun doğru olmadığını göstermiştir. Yazarlar, (Schultze ve Sherif, 1973) ile (Burland ve Burbidge, 1982) tarafından geliştirilen yöntemlerin kullanılmasını önermiştir. Çünkü bunlar, karşılaştırmalı hesaplamalarda diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk derecesinde sonuçlar vermiştir.

Standart penetrasyon deneyinden, sığ temellerin taşıma gücü ve oturmalarının belirlenmesi, kayma mukavemetinin belirlenmesi, silt ve kumların sıvılaşma potansiyelinin tahmin edilmesi, granüler zeminlerin sıklıklarının ve içsel sürtünme açılarının değerlendirilmesinde yararlanıldığı bildirilmiştir (Sowers, 1979), (Schultze ve Melzer, 1965), (Terzaghi ve Peck, 1967), (Youd ve Idriss, 2001) ve (Özkan vd., 1990).

Standart penetrasyon deneyi çeşitli dezavantajlara da sahiptir. Killerde, efektif gerilme düzeltmesi güvenilir değildir. Zemin direncinin derinlik boyunca değişimi sürekli olarak gözlenemez, yakın sıklıktaki tabakalar arasında bulunan ince ve farklı sıklıktaki tabakalar fark edilmeden atlanabilmektedir. Kullanılan alet ve prosedür dünya çapında tam olarak standartlaştırılmamıştır, aynı ülke içerisinde dahi kullanılan deney aleti ve prosedüründe oldukça büyük farklılıklar bulunmaktadır. Bu yüzden, standart penetrasyon deneyine dayalı tasarımlarda dikkat gerekmektedir. Yaygın kullanımı ve basit prosedürüne rağmen, standart penetrasyon deney sonuçları numune alımı, sondaj, ekipman ve operatör karakteristiklerinden büyük ölçüde etkilenir. Deneyde elde edilen sonuçlardaki hatanın büyük bir kısmı, kusurlu ekipman kullanımından kaynaklanmaktadır.

SPT'nin dinamik yapısı nedeniyle tekrarlanabilirliği ve güvenilirliği ile ilgili önemli sorunlar bulunmaktadır. Birçok çalışma usul ve ekipman, bu sözde standart testte önemli değişkenlik göstermiştir. Ancak, tekrarlanabilirlik ve güvenilirlik ile ilgili tüm sorunlara rağmen SPT, hala günümüzde kullanılmakta olan en yaygın arazi deneyidir.

Son yıllarda SPT dinamikleri anlayışımıza katkıda bulunacak kayda değer gelişmeler meydana gelmiştir (Schmertmann ve Palacios, 1979), (Kovacs vd., 1981), (Kovacs ve Salomone, 1982).

(Kovacs vd., 1981), SPT sırasında teorik potansiyel enerjinin 475 J (4200 inc lb) %30 - %80'inin tijler aracılığıyla aktarıldığını göstermiştir. Sisteme iletilen enerji, kasnak etrafında ipin dönüş sayısına, düşme yüksekliğine, sondaj ekipmanına, çekiç tipine ve operatör karakterine bağlı olarak iletilmektedir. Çekiç tipinin etkisi, örsle sondaj takımları arasında bir enerji iletim mekanizması olduğunu göstermektedir. (Kovacs ve Salomone, 1982) ipi iki kere kasnaktan geçirmenin operatör performans karakterinin enerji iletim verimine etkisini en aza indirdiğini göstermiştir.

(Schmertmann, 1978a) sınırlı datarlarla yaptığı korelasyonlarla göstermiştir ki, standart işlemlerle yapılması durumunda verimde %55'e varan iyileşmeler

sağlanmaktadır. SPT standartlarının yükseltilmesine ihtiyaç olduğu (Robertson, 1982) tarafından bildirilmiştir..

(Schmertmann, 1979) ve (Kovacs ve Salomone, 1982) ölçülen N değerlerini, tijlere iletilen enerji miktarı, sondaj usulü ve muhafaza türünün etkilediğini göstermiştir. (Schmertmann, 1978a) SPT sonuçlarının belirgin olarak şu faktörlerden etkilendiğini belirtmiştir; sondaj deliğinin boyutu, ipin kasnak etrafında dönüş sayısı, matkap tijlerinin uzunluğu, sondaj deliği duvarlarının sondaj çamuru ile sıvanması ve standart olmayan numune alıcılar kullanmak.

Çeşitli çalışmalar da, SPT için standart bir enerji kriterinin kabul edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bazı araştırmacılar oldukça ucuz ve kolay kullanımlı enerji kalibrasyon birimi ile birlikte, gelecekte daha tekrarlanabilir ve güvenilir SPT-N değerleri için ölçülen enerji düzeltme faktörlerinin ortaya konabileceğini göstermiştir (Campanella ve Robertson, 1982), (Kovacs ve Salomone, 1982).

SPT ile ilgili diğer önemli endişe verici konulardan biri, kil ve silt gibi zayıf zeminlerde düşük çözünürlüktür, öyle ki takım kendi ağırlığıyla batmakta ve N değeri birden daha az dahi olabilmektedir. (Niven, 2006) yaptığı araştırmada gevşek kumlarda, SPT ekipman ağırlığı etkisiyle takımın kendiliğinden battığını belirtmiştir. Bu batmanın deneyin dinamik etkisi sebebiyle oluşan aşırı boşluk suyu basıncı ile daha da arttığını ve SPT nin değerleri üzerine etkili olduğunu belirtmiştir.

SPT deneyinin başlıca avantajları ise, kullanımının yaygın olması ve zemin numunesi alınabilmesidir.

Deney sonuçlarını etkileyen önemli faktörler ve uygulamalar şu şekilde sıralanabilir; standart olmayan tokmak veya düşüş yüksekliği kullanılması, tokmağın serbest düşmemesi, tokmak düşüşündeki düzensizlikler, tokmağın örse eş merkezli düşmemesi, standart olmayan ya da hasarlı tij kullanılması, tijlerin elastisite ve fleksibilitesi, numune alıcıdaki hasarlar, kuyunun çapı ve şekli, sondaj kuyusunun iyi temizlenmemesi, numunenin alındığı seviyeye göre yer altı su seviyesinin durumu, kuyu sondajı ile standart penetrasyon deneyi arasında geçen süre, darbenin

sayılmasında ve penetrasyonun ölçülmesindeki hatalar (Sanglerat, 1982), (Tokimatsu, 1988) ve (Prakash ve Sharma, 1990).

(Terzaghi ve Peck, 1948) tarafından, su altındaki gevşek-çok ince veya siltli kumlar için, zeminin düşük permeabilitesi ve yükün dinamik olarak uygulanması nedeniyle, penetrasyon deneyleri sırasında zeminde pozitif boşluk suyu basıncı gelişebildiği bildirilmiştir. Bu pozitif boşluk suyu basınçları, numune alma kaşığının penetrasyonuna karşı koyan zeminin kayma mukavemetini azaltır. Bu nedenle, yeraltı su seviyesi altındaki bu gevşek zeminlerde standart penetrasyon değerleri azalır. Diğer taraftan, su altındaki sıkı-çok ince veya siltli kumlar için penetrasyon testi penetrasyon direncini arttırabilen negatif boşluk suyu basıncı oluşabilir ve böylece penetrasyon değeri artar.

Standart penetrasyon deneyi, ölçümün yapıldığı derinlikteki efektif gerilmelerden etkilenmektedir. Penetrasyon direnci, zemin yapısı ve sıklığı aynı olmasına rağmen derinlikle artmaktadır. Bu nedenle, eğer farklı derinliklerdeki zemin karakteristikleri karşılaştırılıyorsa, ölçülen penetrasyon dirençlerinin efektif gerilmelere bağlı olarak düzeltilmesi gereklidir. Bu amaçla penetrasyon dirençleri 1 kgf/cm^2 veya tonf/ft^2 efektif geostatik basınç için düzeltilmektedir.

Fakat literatürde penetrasyon direncinin sadece düşey efektif gerilmeden değil, yatay efektif gerilmeden ya da yanal zemin basıncından da etkilendiği belirtilmiştir. (Schmertmann, 1970) standart penetrasyon deneyinin yorumlanmasında aşırı konsolidasyon oranının ve yanal gerilmenin önemini vurgulamıştır. Bu durum (Marcuson ve Bieganousky, 1977) tarafından da doğrulanmıştır. Aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla penetrasyon direncinin de arttığı ifade edilmiştir (Broms ve Flodin, 1988).

Sondaj kuyusundaki örselenmenin SPT üzerine etkisi büyük olabilir. Bu durum, penetrasyon direncinde %70-80 kadar azalmaya yol açabilir. Ancak, örselenmenin etkisi ve gerçek miktarı zemin türüne, sondaj yöntemine ve kuyuda kullanılan muhafaza borusu ile kuyu çapına bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Örselenen zeminin kuyunun tabanından itibaren maksimum derinliği genel anlamda kuyu

çapının bir fonksiyonudur. Bu konudaki bulgular, zemin örselenmesinin kuyu tabanından itibaren kuyu çapının üç katına kadar olan derinlikte önemli miktarda olduğunu göstermektedir.

Bu örselenmeden en çok etkilenenler granüle zeminlerdir. Mantık, kuyunun sondaj sıvısıyla doldurulamadığından ve zeminin kuyu tabanında 'kaynadığından' dolayı, sadece ince daneli veya siltli kumların bu örselenmeden etkileneceğini ve bunun da kuyu tabanındaki kaynamadan ileri geleceğini düşünmeye zorlamaktadır. Çimentolanmamış oldukları takdirde ince daneli ve siltli kumların bu anlamda risk taşıdığı bir gerçektir. Bu durum, çimentolanmamış alüvyal iri kum ve çakıllar da dahil olmak üzere çimentolanmamış tüm granüle zeminler için de geçerlidir (Connor, 1980).

2.2.1.1. SPT-N değerlerinin düzeltilmesi ve kullanımı

Çeşitli zemin parametrelerinin arazi veya laboratuvar şartlarında bulunan değerleri arasındaki ilişkiler, mühendislere gerek tasarım sırasında ısk tutmakta gerekse çeşitli yöntemlerle bulunan sonuçların tutarlılığını kontrol etme imkânı sağlamaktadır. Numune alınması sırasında çeşitli nedenlerden dolayı örselenen numuneler ile laboratuvar ortamında zeminin gerçek davranışını belirlemede karşılaşılan güçlükler, doğal koşullarda uygulanan arazi deneylerinin önemini arttırmaktadır. Standart penetrasyon deneyi (SPT) dünyanın birçok ülkesinde olduğu gibi ülkemizde de geoteknik araştırma ve incelemelerde en çok kullanılan arazi deneylerinden biridir. SPT sonuçlarının geniş bir aralıkta değişmesine sebep olan birçok faktör mevcuttur. Bu değişim veya deneyin tekrarlanabilirliğinin düşük olması, SPT deneyi sonuçlarının yorumlanmasında ve geçmiş verilerin güvenle kullanılmasında zorluklara sebep olmaktadır.

SPT deneyini etkileyen faktörler, arazi şartlarından daha çok onun uygulama yöntemlerinden kaynaklanmaktadır. Örneğin çekiç düşürme sistemi bu faktörlerin en önemlisi olarak görülmekte ve düşürme yöntemine bağlı olarak sonuçlar arasında % 40'a varan değişimler olmaktadır (Frydman, 1970), (Kovacs vd., 1977).

SPT deneyinin uygulanması sırasında kullanılan tekniklerin farklı olması, N darbe sayısında da farklılıklara neden olmaktadır. Bu nedenle, elde edilen N sayıları sabit bir enerji oranına veya efektif düşey gerilmeye göre normalize edilmesi, yani düzeltilmesi doğru bir yaklaşım olmaktadır. Seçilen sabit enerji oranına göre yapılacak düzeltmede, $ER=60$ kullanılması tavsiye edilmektedir (Skempton, 1986). Bu durumda enerji; $N_{60} = N \times ER / 60$ şeklinde verilmektedir.

ER; çubuk enerji oranıdır ve deney esnasında ağırlığın bilinen bir yükseklikten düşürülmesiyle oluşan toplam enerjinin çubuklara aktarılan kısmını göstermektedir.

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında, arazide ölçülen vuruş sayılarında (SPT- N_{arazi}), tokmak enerjisi, jeolojik basınç ve bazı durumlarda sonuçları etkileyen çeşitli diğer dış değişkenler için düzeltme yapılmalıdır. Ölçülen vuruş sayıları (SPT- N_{arazi}), N_{60} veya $N_{1,60}$ şeklinde normalize edilebilir. N_{60} veya $N_{1,60}$ için en genel formül aşağıdaki gibidir (Sivrikaya ve Toğrol, 2002), (Sivrikaya ve Toğrol, 2003).

$$N_{60} = N_{arazi} C_E C_R C_B C_S C_A C_{BF} C_C \quad (2.1)$$

$$N_{1,60} = N_{arazi} C_N C_E C_R C_B C_S C_A C_{BF} C_C \quad (2.2)$$

Burada;

N_{60} : Teorik serbest düşme, tokmak enerjisinin %60'ına göre düzeltilmiş vuruş sayısı,

$N_{1,60}$: Teorik serbest düşme tokmak enerjisinin %60 ve efektif düşey basıncı atmosfer (yaklaşık 100 kPa) değerine göre düzeltilmiş vuruş sayısı,

N_{arazi} : Arazide ölçülen vuruş sayısı,

C_N : Jeolojik yük düzeltme faktörü,

C_E : Enerji düzeltme faktörü,

C_R : Tij uzunluğu düzeltme faktörü,

C_B : Sondaj çapı düzeltme faktörü,

C_S : Numune alıcı kılıf düzeltme faktörü,

C_A : Çakma başlığı düzeltme faktörü,

C_{BF} : Çakma sayısı sıklığı düzeltme faktörü,

C_C : Tokmak yastığı düzeltme faktörüdür.

Çoğu geoteknik uygulamalar için yukarıda sıralanan son altı düzeltme faktörü kullanılmamaktadır. Bazı durumlarda, bunlar daha iyi veri sağlamak için kullanılabilir. Bununla beraber, birçok durum için, N_{60} ve $N_{1,60}$ aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır (Sivrikaya ve Toğrol, 2002):

$$N_{60} = N_{\text{arazi}} C_E \quad (2.3)$$

$$N_{1,60} = N_{\text{arazi}} C_E C_N \quad (2.4)$$

(Melzer, 1971), SPT–N değerinin su altında daha düşük olduğunu hem arazi hem de laboratuvarında yaptığı deney sonuçlarıyla göstermiştir.

(Bieganousky ve Marcuson, 1976) laboratuvarında uyguladıkları SPT deney sonuçlarından N değerinin, yoğunluğun değişmesinden, aşırı konsolidasyon oranından ve düşey efektif gerilmeden etkilendiğini ve bunlarda meydana gelecek bir artışın SPT–N değerinde önemli bir artışa sebep olacağını göstermiştir.

(İyisan ve Ansal, 1990) farklı zemin gruplarında yapılmış SPT deneylerinden bulunmuş SPT–N darbe sayıları ile laboratuvarında elde edilen drenajsız kayma mukavemetleri arasında geliştirdikleri koralasyon sonuçlarını kullanarak önerdikleri düzeltme faktörünün büyük olmasını, yapılan SPT deneylerindeki enerji kayıplarının büyük olmasına bağlamışlardır.

SPT sonuçlarındaki çok sayıda belirsizliklerden dolayı bu koralasyonlarda geniş bir hata payı bulunmaktadır. Bu fonksiyonların killer için daha çok hata içermesinden dolayı, SPT sonuçları ile killerin mühendislik özellikleri arasındaki koralasyonları kullanırken özellikle dikkatli olmak gerekir. Genel anlamda SPT sadece kumlu zeminler için kullanılmalıdır (Coduto, 1994).

Temel oturması konusunda doğrudan hesaplama yöntemlerinin çoğu SPT penetrasyon direncine dayanmaktadır. Fakat, sistematik bir araştırma (Bratchell vd., 1975), (Simons ve Menzies, 1977), (Talbot, 1981), (Milititsky vd., 1982), (Clayton vd., 1988) bunların çoğunun doğru olmadığını göstermektedir. Yazarlar, (Schultze ve Sherif, 1973) ile (Burland ve Burbidge, 1982) tarafından geliştirilen yöntemlerin

kullanılmasını önermektedir. Çünkü bunlar, karşılaştırmalı hesaplamalarda diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk derecesinde sonuçlar vermektedir.

SPT sonuçlarını kullanarak; (Peck vd., 1974) ve (Mitchell vd., 1978) tarafından kumda efektif sürtünme açısı, (Stroud, 1974) tarafından kilde drenajsız kayma dayanımı, (Poulos, 1989) tarafından kazık tasarımı, (Stroud, 1989) tarafından kumda rijitlik, kilde drenajlı young modülü, zayıf kayada serbest basınç dayanımı ve çatlaklı tebeşirde kütleli sıkışabilirlik, (İyisan ve Ansal, 1990) tarafından kayma mukavemeti ilişkisi (Moroğlu, 1996) tarafından sığ temel sistemlerinin oturmalarının hesaplanması, (Sivrikaya ve Toğrol, 2007) tarafından Türkiye’de ince daneli zeminlerin drenajsız kayma mukavemeti hakkında bağıntılar geliştirilmiştir.

Kumların sıklılığını tanımlamada rölatif sıklılık yararlı bir yöntemdir. Kumların rölatif sıklılığı (D_r), aşağıdaki ampirik koralasyon kullanılmak suretiyle SPT verilerinden bulunabilir (Kulhawy ve Mayne, 1990);

$$D_r = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{C_p C_A C_{OCR}}} \times 100 \quad (2.5)$$

$$C_p = 60 + 25 \log D_{50} \quad (2.6)$$

$$C_A = 1,2 + 0,50 \log(t/100) \quad (2.7)$$

$$C_{OCR} = OCR^{0,18} \quad (2.8)$$

Burada;

D_r – Rölatif sıklılık (%)

$(N_1)_{60}$ – Düzeltilmiş SPT N değeri

D_{50} – Zeminin %50’sinin daha küçük olduğu dane çapı (mm)

t – Zeminin yaşı (çökmeden sonra geçen zaman) (yıl)

OCR – Aşırı konsolidasyon oranı

(Coduto, 1994)'nun bildirdiğine göre, çok ender durumlarda yukarıdaki denklemlerde yer alan tüm parametreleri destekleyecek deney verileri söz konusudur. Bu nedenle, çoğu zaman bunların tahminle bulunması gerekir. Tane boyu dağılım eğrisinin bulunmadığı durumda D_{50} değeri zeminin görsel incelemesine dayalı olarak tahmin edilebilir. Jeologlar kum çökellerinin yaşını tahmin edebilirler fakat, (2.13) denklemi seçilen değere çok hassas değildir, bu nedenle çok kaba bir tahmin muhtemelen yeterli olacaktır. Çoğu analizler için $t=1000$ yıl almak amaca uygundur. Kumların aşırı konsolidasyon oranı çok ender durumlarda mevcuttur fakat, (2.14) eşitliğinin kullanılması için gevşek kumlarda ($N_{60} < 10$) 1 ve sıkı kumlarda ($N_{60} > 50$) yaklaşık 4 alınmasının yeterli olacağı bildirilmiştir.

2.2.2. Konik penetrasyon deneyi (CPT)

Mühendislik pratiğinde penetrometrelerin zemine itilmesinde en sık kullanılan yöntem statik yöntemdir. Dinamik konilerin SPT ile aynı dezavantajları bulunmaktadır. Statik konik penetrasyon deneyi, Dünyada CPT olarak anılmaktadır. CPT Hollanda'da 1934'te geliştirilmiş olup, bu ülkedeki orijinal kullanımı, kazık çakma tasarımına yönelik olarak yumuşak delta killeri içindeki kum katmanlarının yerini bulma ve bunların sıklığını değerlendirme amacına yönelik olmuştur.

CPT olarak bilinen konik penetrasyon deneyi en basit şekliyle, kesit alanı 10 cm^2 (çap: 35,7 mm) olan 60° lik bir koniyi sabit bir hızla ($2 \pm 0,5 \text{ cm/s}$) zemine hidrolik olarak sürerken bu koniyi sürmek için gerekli kuvvetin ölçüldüğü bir arazi deney yöntemidir. Statik sondaj deneyi olarak da bilinen CPT deneyi, toplam ve uç okumaları alınarak uygulanmaktadır. Toplam okuma ile uç okuması arasındaki fark çevre sürtünmesine eşit olmaktadır. Ancak, çok daha yaygın olarak kullanılanı, bir sürtünme konisidir. Dış çapı koninin çapı ile aynı olan ve koninin hemen üstünde yer alan, 150 cm^2 lik yüzey alanına sahip sürtünme çeperi üzerindeki kesme kuvveti de ölçülür.

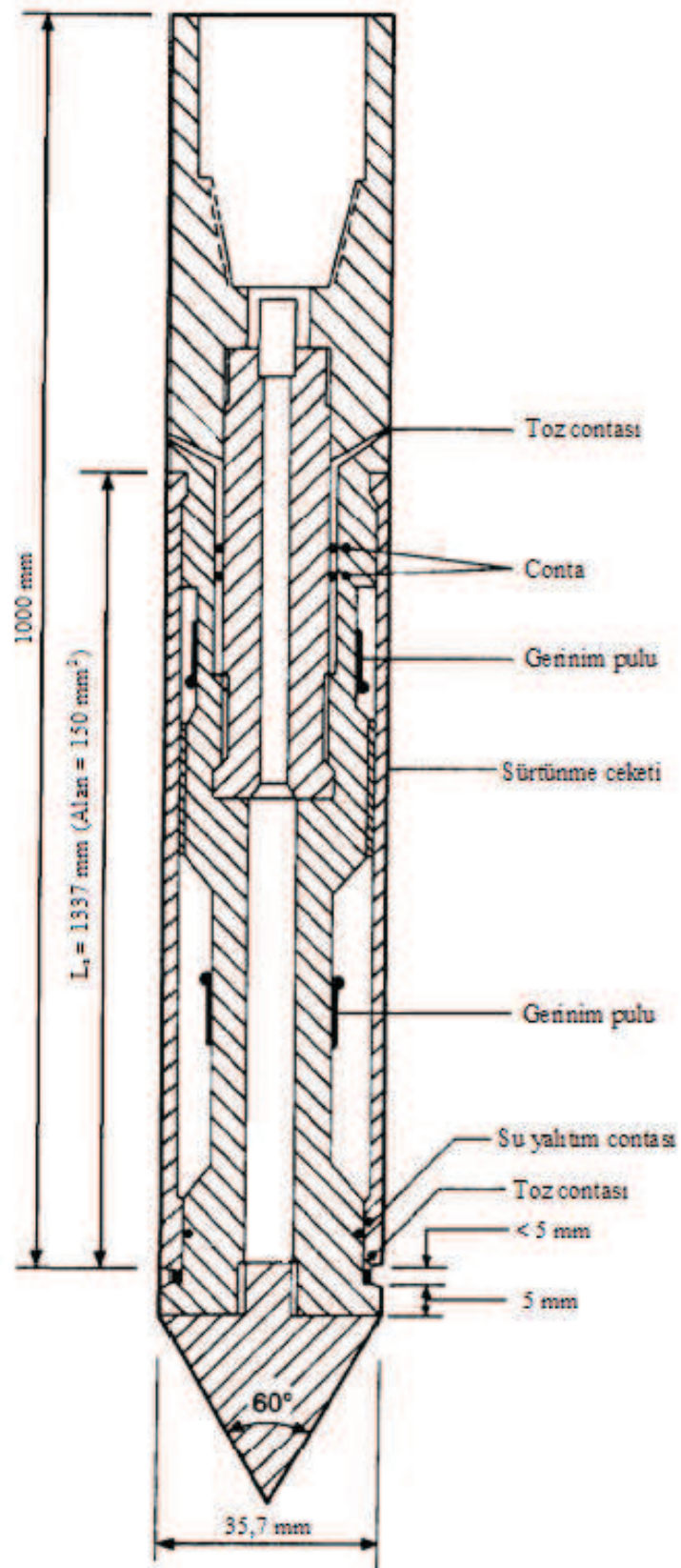
Birçok çeşidi olan ve her geçen gün yeni çeşitleri eklenen veya geliştirilen koni penetrasyon aygıtları Avrupa'da sık kullanılmaktadır. Ancak Kuzey Amerika kıtasında giderek daha çok kabul görmektedir. Koni penetrasyon testlerinin genel

tipleri (Schmertmann, 1972) tarafından Tablo 2.3’de verilmiştir. Koni penetrasyon testlerine artan ilginin başlıca nedenleri; testin sadeliği, sonuçların tekrarlanabilirliği ve daha rasyonel analiz için test verilerinin mükemmelliğidir.

Elektronik teknolojisindeki gelişmeler, 1970’lerde penetrometre ölçümlerinin de bu yoldan yapılabilmesi kolaylığını getirmiştir. Konik uç direnci ve çeper sürtünmesinin hem mekanik hem de elektrik yöntemle ölçülmesi mümkün olmaktadır, fakat günümüzde elektrikli olanlar tercih edilmektedir. Elektrik konilerinin hem koni üretimi ve hem de veri kayıt sistemi açısından daha pahalı olduğu (Meigh, 1987) tarafından bildirilmiştir ve Şekil 2.45’te bir elektrikli sürtünme konisi verilmiştir.

Tablo 2.3. CPT’nin genel tipleri (Schmertmann, 1972)

Tip	Tip özelliği		Kullanıldığı bölge	Not
	Metot	Hız		
Statik (Yarı statik)	Hidrolik veya mekanik krikolu	2 cm/sn	Dünya	Genellikle 10 cm ² ve 60° koni
Dinamik	Sürülen ağırlık darbeli	Değişken	Dünya	Çok değişken boyut ve ağırlıklarda
Vidalı	Ağır bir sarmal koniyi döndürme	Değişken	İsveç, Norveç	
Hareketsiz (Darbeli)	Düşürmeli veya itmeli	Değişken	Denizde ve orduda	Ulaşılmaz derinlikteki zeminler için



Şekil 2.45. Elektrikli sürtünme konisi (Meigh, 1987)

Koni penetrasyon deneyi ucuz ve hızlı olup kamyon monte olanlarıyla 8 saatte 250 m boyda deney yapılabilir. Başlangıçta kohezyonsuz zeminlerde yer alacak kazıklarda çevre ve uç direncinin tahmin edilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Günümüzde ise, sürtünme direncinin koni uç direncine oranı (sürtünme oranı) değerlerinin yorumu ile zemin profili için değerli yorumlar yapılabildiği gibi koni direncini diğer zemin parametrelerine bağlayan korelasyonlar da geliştirilmiştir.

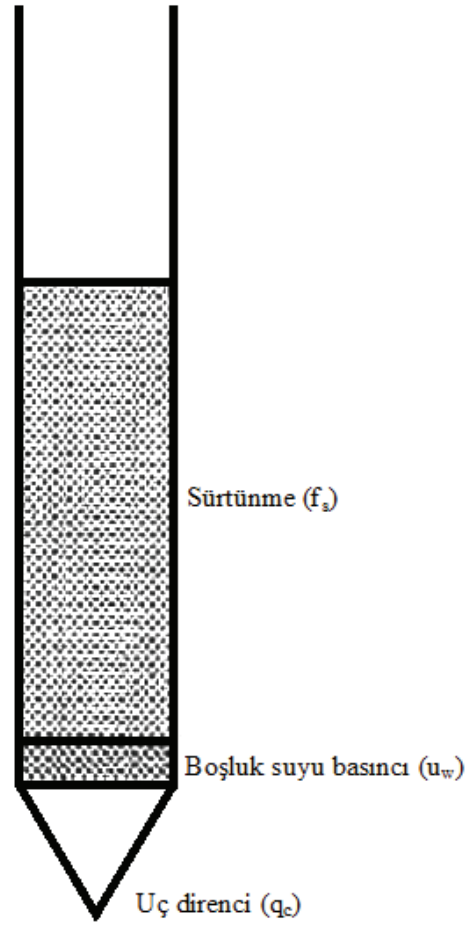
Genel olarak SPT deneyini etkileyen benzer faktörler bu deneyi de etkilemektedir. CPT uç mukavemeti q_c , kumlarda rölatif sıklığın bir fonksiyonudur. Dane dağılımı, çimentolaşma, yatay gerilme ve derinlik uç mukavemetini etkileyen önemli faktörlerdir. Ancak, D_r ve efektif gerilmenin etkisini tek tek ayırt etmek pek kolay olmamaktadır (Schmertmann, 1978b).

(Baldi vd., 1986) dikkatlice kontrol ederek laboratuvarda kuru kumlarda yaptıkları deney sonuçlarından q_c uç mukavemetinin rölatif sıklık ve düşey efektif gerilme ile değiştiğini göstermiştir. Araştırmacılar, ayrıca uç mukavemetinin yatay gerilmeden de etkilendiği ve bu sebepten, q_c ile diğer parametreler arasında korelasyon yapılacağı zaman, aşırı konsolide zeminlerde yatay gerilmenin hesaplanması gerektiğine işaret etmiştir.

(Veismanis, 1974) yatay efektif gerilmenin penetrasyon direncine etkisini inceleyerek kumlarda ilk sıklığın bir fonksiyonu olarak yatay gerilme ile q_c değerinin arttığını göstermiştir.

Efektif düşey gerilme ile f_s arasındaki korelasyonlar mühendislikte faydalı olmakta ve kullanım alanı bulmaktadır. Bu korelasyon denklemleri yardımı ile zemin numunesi ve laboratuvar deneyleri olmadan, zeminin etkisinde kaldığı gerilme tahmin edilebilmektedir. Penetrasyon direnci ve σ_v arazi ölçümlerine dayanan bağıntılara birinci derecede etki eden değişkenlerdir.

Penetrometre ölçümlerinde çok önemli bir gelişme 1980 li yıllarda konik ucun hemen arkasına bir piyezometrenin yerleştirilmesiyle olmuştur (Şekil 2.46).



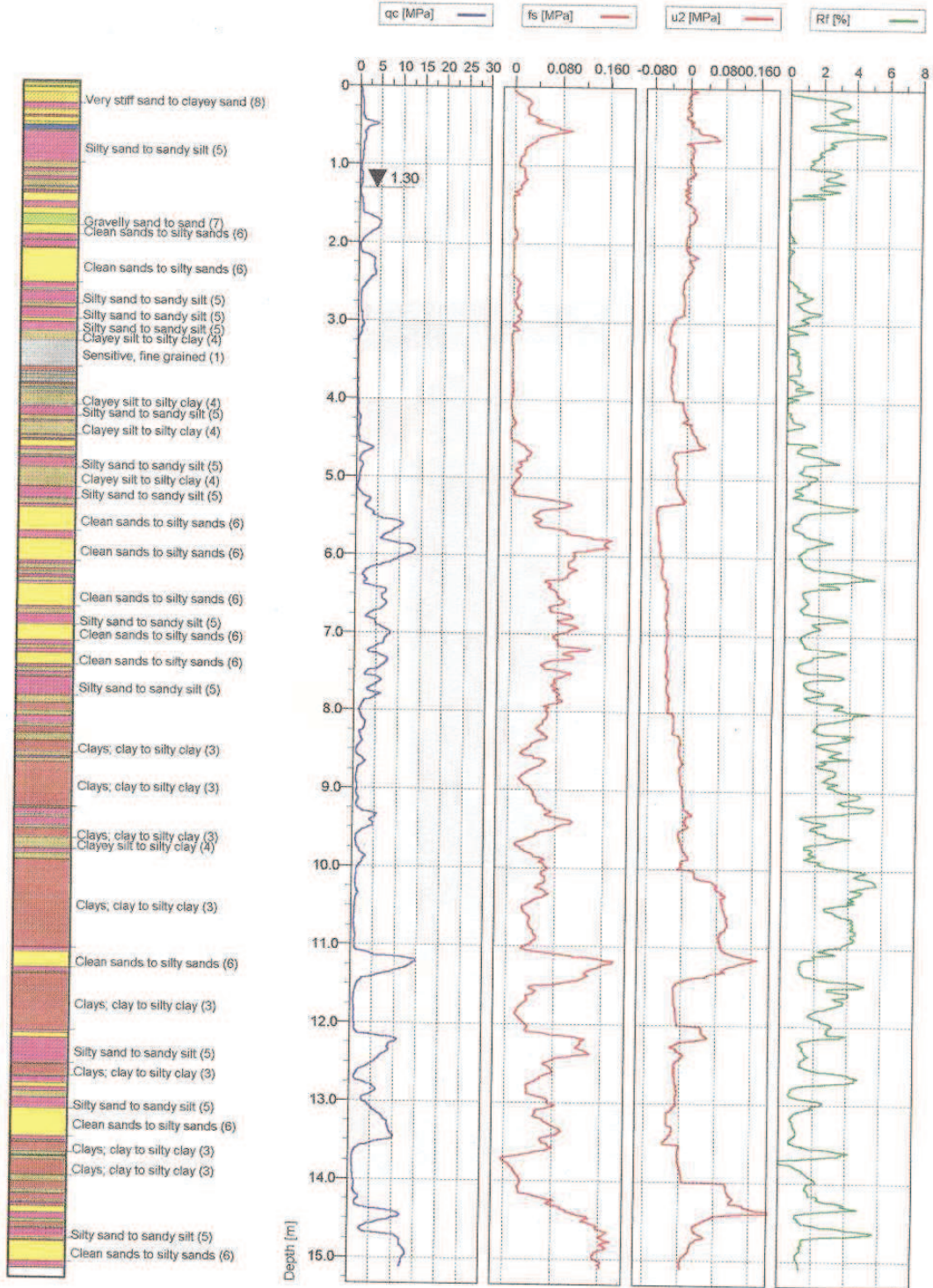
Şekil 2.46. Sürtünmeli koni etki kuvvetleri

Bu sistemde gözenekli bir parçanın arkasına yerleştirilen sensörle boşluk suyu basıncı ölçülmektedir. Özellikle kohezyonlu zeminlerde yapılan ölçümler zeminin geçirgenliğine bağlı özelliklerin (konsolidasyon hızı gibi) belirlenmesinde önemli veriler sağlamaktadır.

Piyezokoni aletinde (CPTU) zeminin kayma direnci yanında aşırı konsolidasyon oranı, sıvılaşma potansiyeli, hatta sükunette toprak basıncı katsayı da ölçülebilmektedir (Şekil 2.47).

Bu aletin uygulamasıyla ilgili araştırmalar sürmekte olup ölçmelerin sismik olarak da yapılması gündemde bulunmaktadır. Bu deneyin zemin parametrelerini en iyi

yansıtan deney olduğu konusunda fikir birliği belirmiştir. Ayrıca bu yöntemde deney sonuçları operatör faktöründen daha az etkilenmektedir.

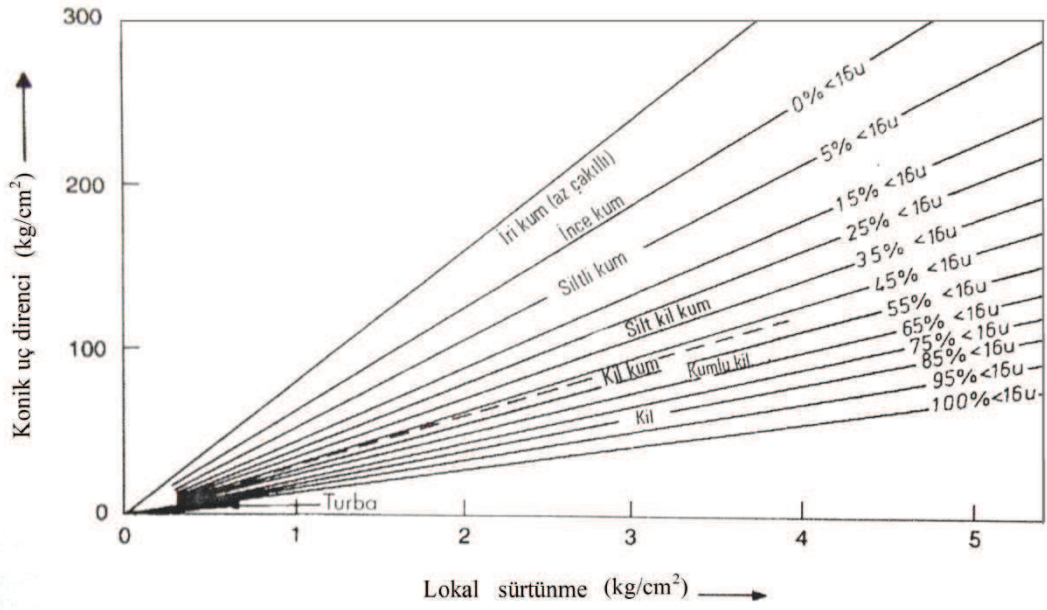


Şekil 2.47. CPTU deneyine ait tipik sonuçlar

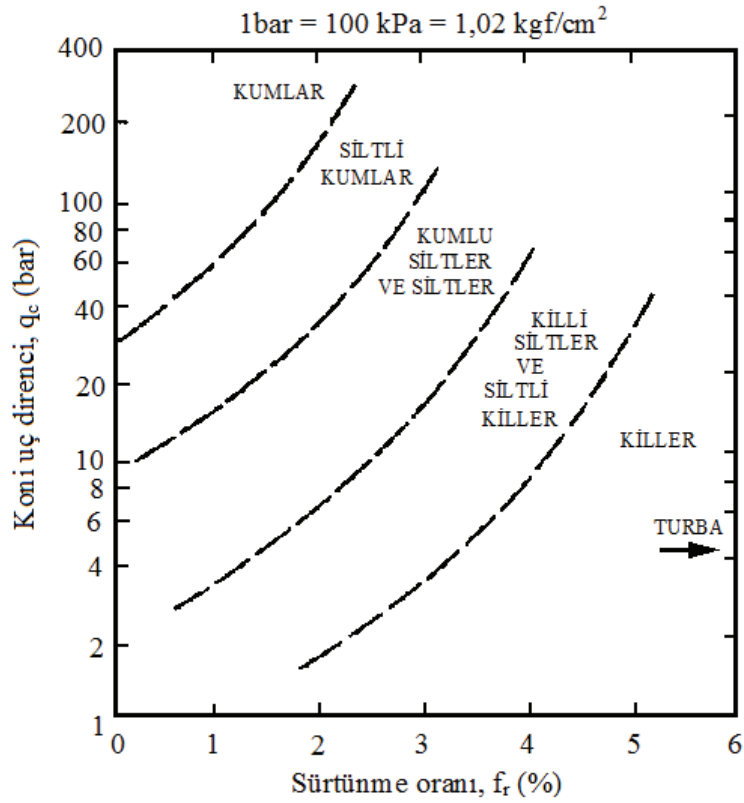
CPT deney ekipmanının standardizasyonu, kalibrasyonu, bakımı, kullanımı, CPT deney prosedürü, verilerin hesaplanması, sonuçlarının yorumlanması ve kullanımı hakkında çok sayıda genel ve bölgesel çalışma yapılmıştır ve yapılmaya devam etmektedir.

CPT verilerinin kullanılması ve bu verilerle zemin özelliklerini belirlemek amacıyla çok sayıda yerel şartlara ve genel kullanıma yönelik araştırmalar yapılmıştır; (De Beer ve Martens, 1957), (Van Der Veen ve Boersma, 1957), (De Alencar Velloso, 1959), (Meigh ve Nixon, 1961), (Begeman, 1965), (Schmertman, 1970), (Thornburn, 1971), (Sanglaret, 1972), (Veismanis, 1974), (Schmertman, 1978b), (Lambrechts ve Leonards, 1978), (Robertson, 1982), (Robertson vd., 1983), (Danziger ve De Velloso, 1995), (Chin vd., 1988), (Ajayi ve Balogun, 1988), (Jefferies ve Davies, 1993), (Danziger vd., 1998), (Suzuki vd., 1998), (Emrem ve Durgunoğlu, 2000), (Akça, 2003), (Ahmadi ve Robertson, 2005), (Kara ve Gündüz, 2010) v.b. Bu araştırmalardan bir çoğu CPT verilerinin geçerliliğini ispatlamak ve CPT deneyinin kullanılabilirliğini göstermek amacıyla güden, diğer tanınmış deneylerle korelasyonlar içeren araştırmalardır. Bir kısmı ise CPT nin değişik ortamlarda kullanımını araştıran çalışmalardır.

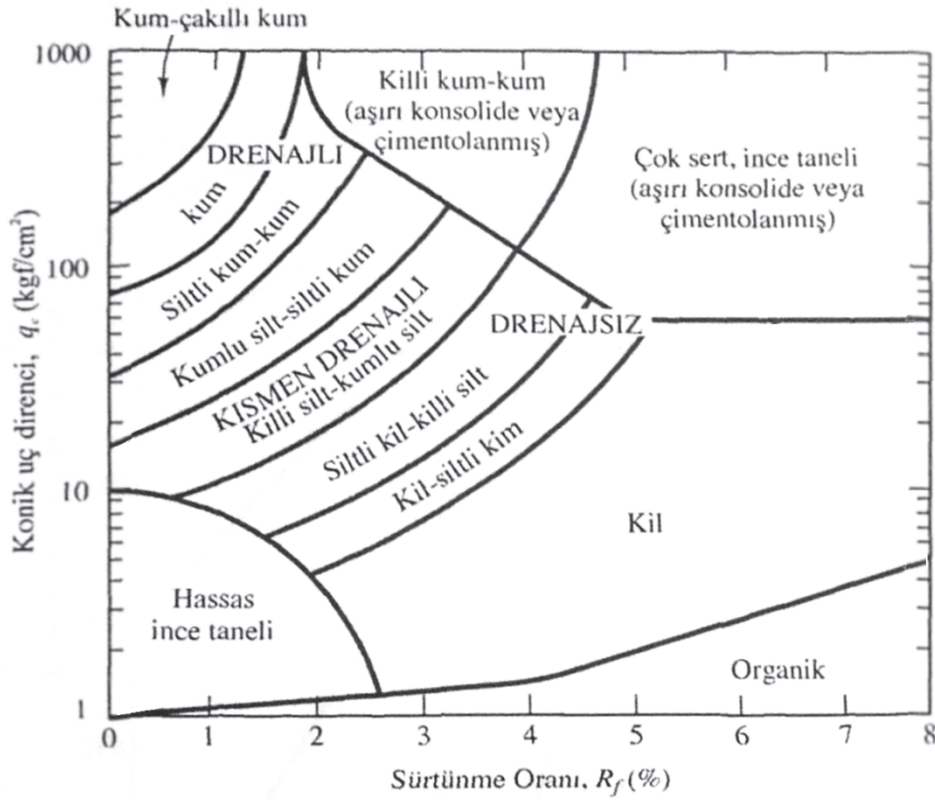
İlk çeper sürtünmesi ölçümü, Şekil 2.48'de ki sürtünme oranı ile zemin türü arasındaki faydalı korelasyonu keşfeden Begemann tarafından mekanik koni kullanılarak yapılmıştır. Elektrikli sürtünme konisi için zemin cinsini belirlemede kullanılacak sadeleştirilmiş bir zemin teşhis abağı (Robertson ve Campenella, 1979) tarafından verilmiştir (Şekil 2.49).



Şekil 2.48. Zemin türü, konik uç direnci ve çeper sürtünmesi ilişkisi (Begemann, 1965)



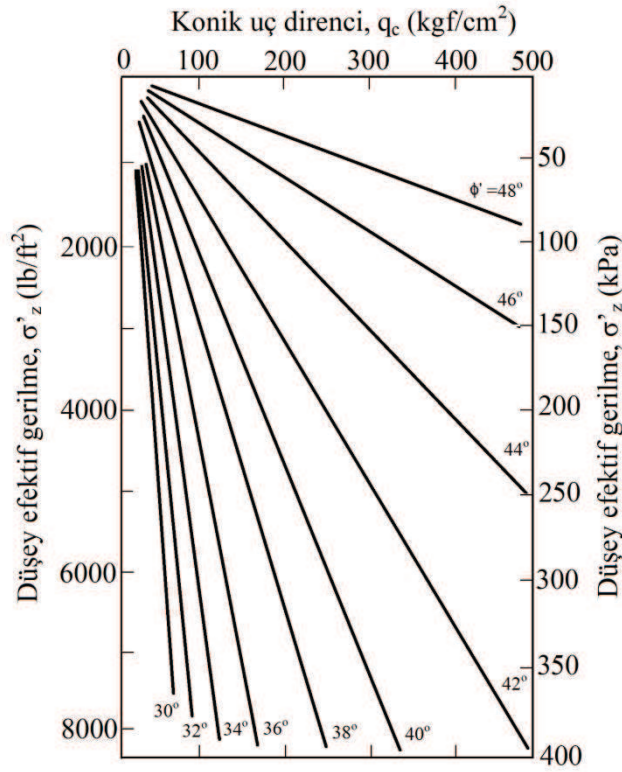
Şekil 2.49. Elektrikli sürtünme konisi için sadeleştirilmiş zemin teşhis abağı (Robertson ve Campanella, 1979)



Şekil 2.51. CPT deney sonuçlarına göre zemin sınıflaması (Robertson ve Campanella, 1983).

SPT de olduğu gibi; laboratuvar deneylerinde kullanılmak üzere örselenmemiş, iyi kaliteli numune almanın zor olduğu granüle zeminlerde CPT de önemli veriler sağlamaktadır. CPT sonuçlarından zeminin rölatif sıkılık, kayma direnci açısı (ϕ') ve rijitliğe ait yaklaşık değerler elde etmede çoğu zaman ampirik korelasyonlar kullanılmaktadır. Bu ampirik korelasyonların zemin türüne bağlı olduğu ve doğruluk derecelerinin sınırlı olduğu hatırdan çıkarılmamalıdır.

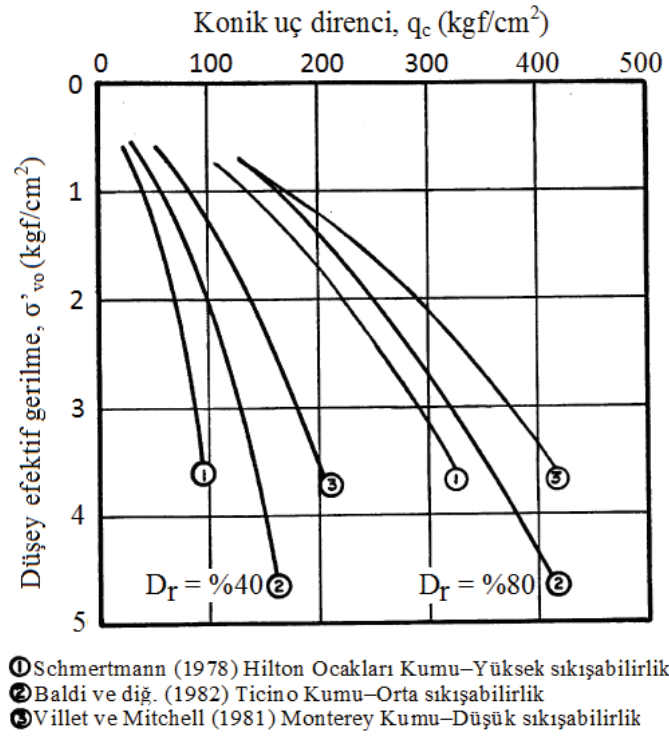
Kayma direnci açısı ile konik uç direnci (q_c) arasındaki faydalı ilişkiler (Schmertmann, 1978b) ile (Durgunoğlu ve Mitchell, 1975) tarafından verilmiştir. Kayma direnci açısının, koni uç direncinden bulunmasıyla ilgili bir bağıntı Şekil 2.52'de verilmiştir.



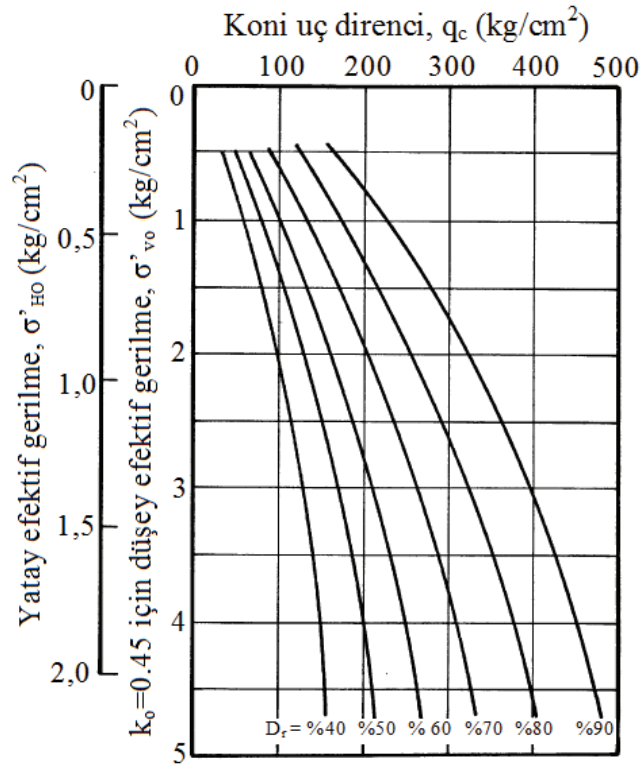
Şekil 2.52. Çimentolanmamış normal kuvars kumları için CPT sonuçları, örtü basıncı ve efektif sürtünme açısı arasındaki ilişki (Robertson ve Campanella, 1983)

Kumların önemli parametrelerinden biri olan rölatif sıkılığın (D_r) uç direnciyle (q_c) değişimini gösteren, farklı araştırmacıların farklı kumlar üzerinde yaptığı araştırmalar sonucu geliştirdiği ilişkiler (Robertson ve Campanella, 1983) tarafından Şekil 2.53'te karşılaştırılmıştır. Çimentolanmamış ve yeni oluşmuş kum zeminlerde rölatif sıkılığın (D_r), uç direnciyle (q_c) ilişkisi Şekil 2.54'de verilmiştir (Baldi vd., 1982).

Sığ temellerin oturmasını hesaplamada kullanılan meşhur yöntemlerden ikisi (De Beer ve Martens, 1957) ve (Schmertmann, 1970) önerdiği yöntemlerdir. Böyle ilişkiler pratik açıdan çok değerli olsa da, doğruluk dereceleri sınırlıdır. Bu durum, CPT deneyinde koni etrafındaki zeminin sürekli bir şekilde yenilmesinden ve konik uç direncinin de zeminin sıkışabilirliğinden ziyade, zemin dayanımının bir ölçüsü olmasından dolayı, beklenen bir durumdur. Granüle zeminlerin sıkışabilirliği, aşırı konsolidasyondan önemli ölçüde etkilenirken, dayanımın etkilenmediği ifade edilmiştir (Lambrechts ve Leonards, 1978). Bu eksiklik SPT için de geçerlidir.



Şekil 2.53. Farklı kumlar için CPT uç direnci ile sıklık ilişkisi (Robertson ve Campanella, 1983)



Şekil 2.54. Çimentolanmamış ve yeni oluşmuş kuvars kökenli kum zeminlerde rölatif sıklığın uç direnciyle ilişkisi (Baldi vd., 1982)

Kum zemine sürülen kazıkların uç direncini konik uç direncine dayalı olarak hesaplamada statik konik penetrometreyi bir kazık modeli olarak göz önünde bulundurmamak normal olup, izin verilebilir taşıma basıncını hesaplamada çok basit olarak iki ile altı arasında bir azaltma faktörü uygulanır (Van der Veen ve Boersma, 1957), (Sanglerat, 1982). Kum çökelleri çok ender durumlarda üniform olduğundan, kazık ucunun planlanan derinliği için q_c değerini hesaplamada ucun hemen altında ve üstündeki değerlerin ortalaması alınır (Schmertmann, 1978b). Kazıkların çeper sürtünmesi, CPT'nin çeper sürtünmesinden doğrudan veya konik uç direnci ile korelasyondan hesaplanabilir.

Kohezyonlu zeminlerde drenajlı ve drenajsız kayma dayanımı ile sıkışabilirliği belirlemede CPT rutin olarak kullanılmaktadır. Bir temelin taşıma gücüne benzer şekilde, konik uç direnci, hem örtü basıncının (σ_v) hem de drenajsız kayma dayanımının (c_u) fonksiyonudur.

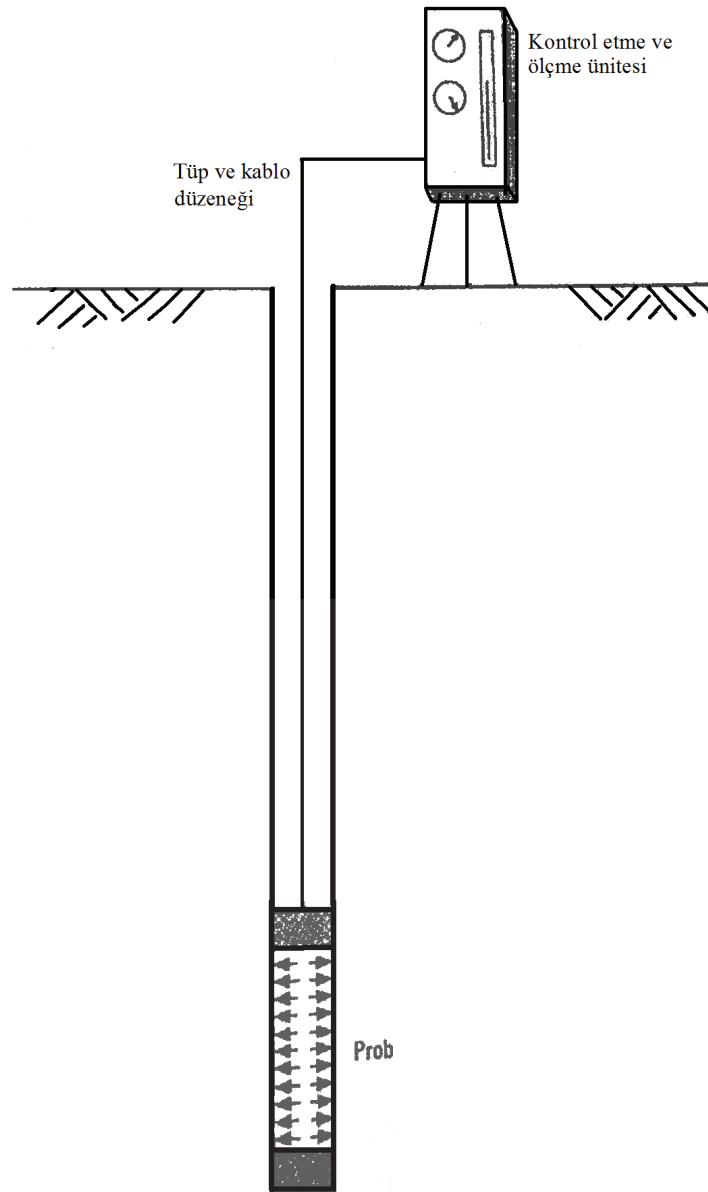
Standart penetrasyon deneyinin gevşek malzemelerdeki hassaslığının az oluşu, diğer yanda Hollanda konisinin sıkı zeminlerde girişinin sınırlı oluşu nedeniyle bu iki deneyi birleştiren statik–dinamik sondalama deneyleri geliştirilmiştir. Deneyin statik kısmında mekanik Hollanda konisi ucu o deneydeki gibi zemine sokulmakta, dinamik kısmında SPT deki ağırlık ve düşüş yüksekliğinde çakılmaktadır.

Hollanda koni deneyi boruları, deneyin dinamik kesimi için dayanıklı olmadığından, sonda boruları 35 mm çaplı yüksek kalitede çelikten yapılmaktadır. Deneyde koni direkt olarak zemine çakılmakta, her 75 mm giriş için gerekli vuruş sayısı kayıt edilmektedir. 300 mm ara ile statik deney yapılmaktadır. Statik deney yapılan kesimde vuruş sayıları, enerji yalnız sondalama borularını çakmakta harcandığından, düşmektedir. Bu vuruş sayıları bilinen anlamda vuruş sayıları olarak değerlendirilmez, ancak çevre sürtünmesinin iyi bir göstergesi olabilir. Genelde 75 mm giriş için 50 vuruş aşıyorsa deney, ucun hasar görmemesi için sona erdirilir. Sonuçlarda statik deney kesimleri Hollanda koni deneyi sonuçları gibi değerlendirilirken dinamik kesim verileri o sahada yapılan statik deneylerle korale edilir. Alternatif olarak o sahada yapılan SPT deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak statik–dinamik deneyin dinamik kesim verisinden yararlanılabilir (Sanglerat, 1982).

2.2.3. Presiyometre (basınçmetre) deneyi (PMT)

Basınçmetre, sondaj deliğine sondayla itilen ve genişlemeye zorlanan membran için kullanılmaktadır. İlk kullanıldığı zamanlardaki (ve şimdiki) şekliyle presiyometreler rutin incelemelere iyi uyarlanmış sağlam bir gereçtir. İlk tasarlandığı günden bu yana kullanımda olan presiyometre sayısı oldukça artmıştır. Presiyometre deneyi ile ilgili çeşitli araştırmalar ve kullanımı ile ilgili değerlendirmeler yapılmaktadır. Örnek bir değerlendirme (Mair ve Wood, 1987) ve temel tasarımı ile ilgili bir araştırma (Baguelin, 1982) tarafından yapılmıştır.

Presiyometre deneyleri hem zeminlerde hem de kayalarda yapılabilir. Esnek bir membran ile yere üniform bir basınç uygulanmak üzere tasarlanan silindirik şekilli tasarlanan presiyometre probu düşey pozisyonda yerleştirilir ve yatay yönde yükleme yapar. Bir boru ve kablo yardımıyla zemin yüzeyindeki tüp ve ölçüm ünitesine bağlanır (Şekil 2.55). Zemine yerleştirilen presiyometre şişirilir ve bu sırada basılan sıvı miktarı ve basınç değerleri kaydedilir. Bu verilerden zemin özelliklerinin ve tasarım parametrelerinin belirlendiği gerilme-deformasyon eğrilerinin çizilmesine yarayan, uygulanan basınca karşılık deformasyon değerleri zemin yüzeyinden izlenerek kayıt altına alınmaktadır. Hacim ve basınç ölçümleri arazi gerilmesi, sıkışabilirlik ve komşu zeminin dayanımı ve böylece de temelin davranışını değerlendirmek amacıyla kullanılabilir (Clayton vd., 1995).



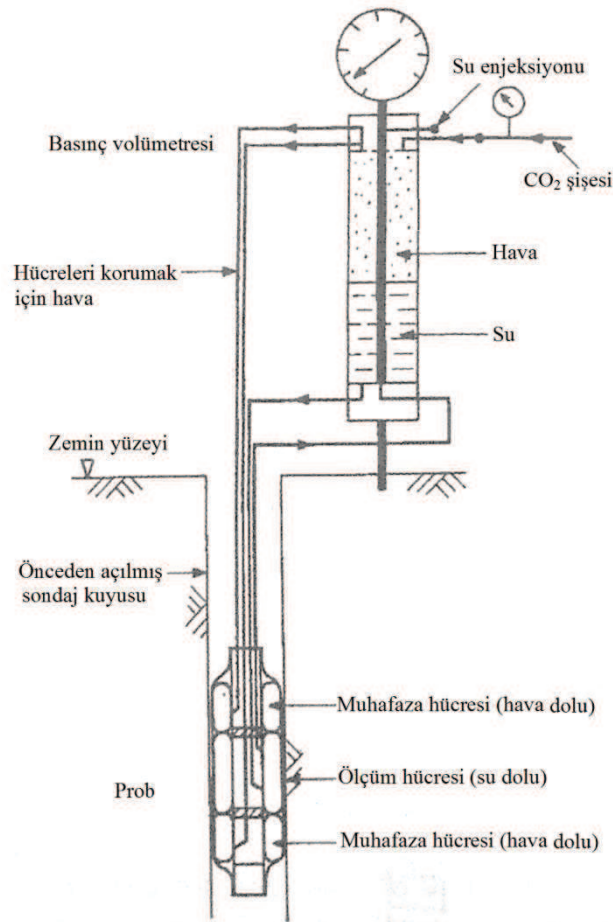
Şekil 2.55. Presiyometrenin ana bileşenleri (Clayton vd., 1995)

Basınçmetreler (presiyometreler) ile ilgili ilk çalışmalar 1930 yılında Kogler tarafından başlatılmıştır. Kogler 1930'larda ilk basınçmetre çalışması yapmışsa da uygulamaya sokamamıştır. 1954'te Purdue Üniversitesinde Fang ve Illinois Üniversitesinden Menard bağımsız olarak modern basınçmetreleri geliştirmeye başlamıştır. Menard'ın geliştirdiği alet 1955'te Menard Pressurmeter olarak patent almıştır. İlk olarak 1957 yılında Chicago'da, zemin özelliklerini belirlemede kullanılmış ve yaygın kullanılan ilk basınçmetre olmuştur (Clayton vd., 1995). Günümüzde presiyometre deneyinin kullanımında olan üç çeşidi bulunmaktadır.

2.2.3.1. Kuyu presiyometreleri

Louis Menard'ın geliştirdiği tipe verilen addır. Deneysel temiz açılmış bir sondaj deliğinde yapılabilir ya da kendinden delen bir hale getirmek için bir burgu düzeneği ile birleştirilebilir (Şekil 2.56). Kendinden delen tipte, zemin örselenmesi daha az olup, presiyometre ile zemin arasında daha iyi temas sağlanır. Sondaj deliğinde uygulanan tipte ise, açılan kuyu biraz geniş açılır ve presiyometre istenilen derinliğe indirilerek şişirilir.

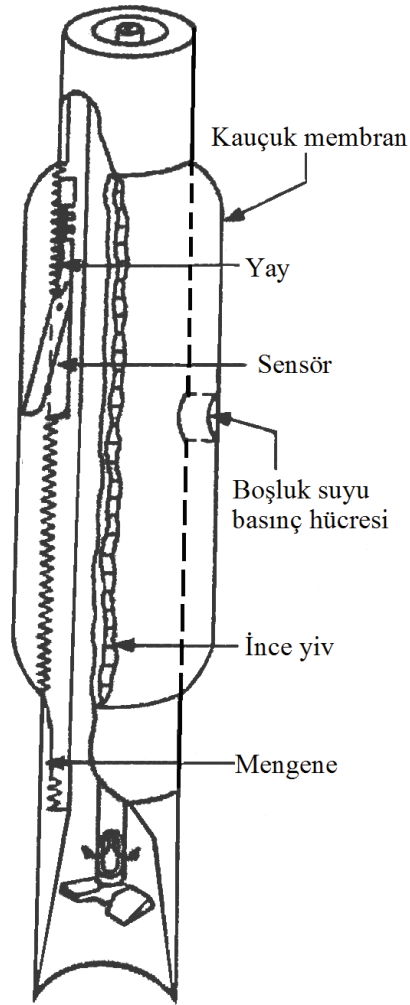
İki ölçüm sistemi kullanılmaktadır. Menard sisteminde su ile dolu bir kaptan verilen suyun hacmi ve basınç ölçülür. Sonraları geliştirilen yöntemde ise basılan gazın basıncı ve çaptaki genişleme membran içine yerleştirilen elektronik sensörler yardımıyla ölçülmektedir. Bu yöntem daha hassas ölçüm yapmaktadır fakat daha karmaşıktır.



Şekil 2.56. Menard presiyometresinin şematik diyagramı (Gibson ve Anderson, 1961)

2.2.3.2. Kendinden delgili presiyometre

Kuyu açma sırasında zemin örselenmesini azaltmak için tasarlanan bu deney, İngiltere'de Hughes ve Fransa'da Baguelin tarafından geliştirilmiştir. İç tarafında kesici bulunan içi boşluklu prob, zemin yüzeyinden hidrolik olarak zemine itilirken kesici ucun parçaladığı zemin parçacıkları basılan basınçlı çamur ile zemin yüzeyine itilmektedir. Dünyada değişik modelleri geliştirilmiştir; tam yüzeyli delme matkabı kullanan ve zayıf kayaları delebilen, kayada kendinden delgili presiyometre (Clarke ve Allan, 1989), orijinal kendinden delgili Fransız presiyometresi (PAF) (Baguelin vd., 1972) ve Cambridge kendinden delgili presiyometresi (Cambridge Insitu, 2011) (Şekil 2.57).



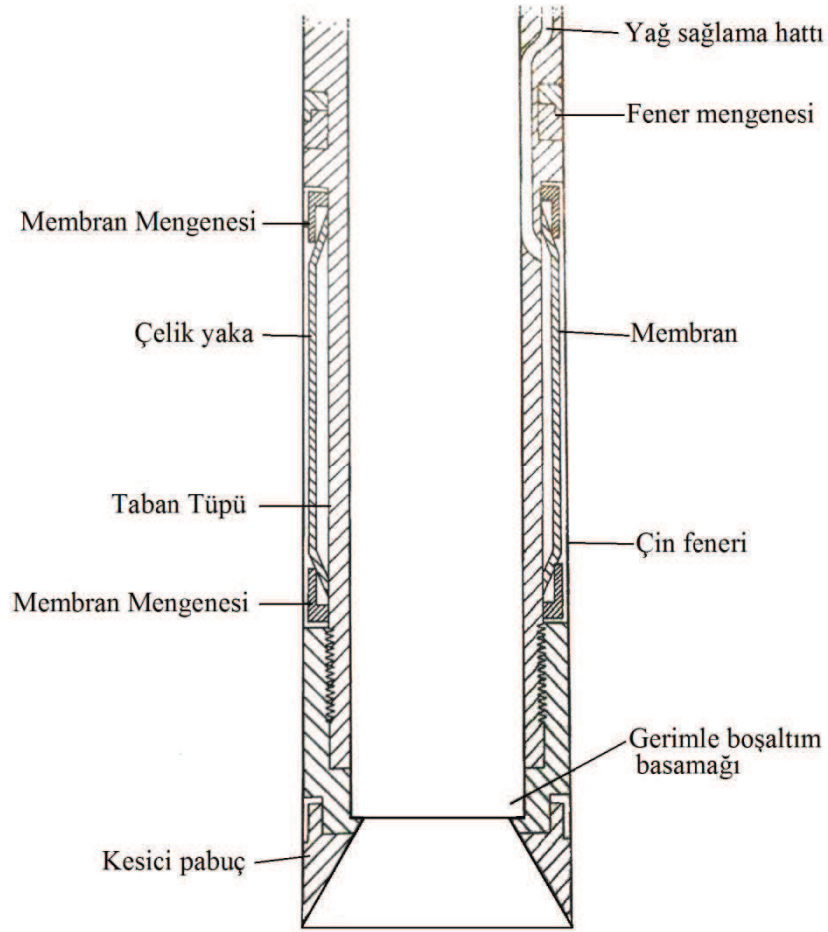
Şekil 2.57. Cambridge kendinden delgili presiyometresi (Windle ve Wroth, 1977)

(SBPT) temel teorileri kullanılarak analiz edilebilir zemin parametrelerinin doğrudan ölçümünü sağlayan tek arazi deney yöntemidir (Robertson, 1982). Prosedür ile ilgili değişkenlik ölçümlerinin kıyaslanmasından, CPT ve SBPMT deneylerinin benzer sonuçlar verdiği bildirilmiştir (Roy vd., 1999).

2.2.3.3. Yerdeğiştirme presiyometreleri

Teorik olarak SBP ile zemini neredeyse hiç örselenmeden deney yapmanın mümkün olduğu söylenebilir. Ancak, SBP'nin bu önemli üstünlüğü tamamen bu deney cihazının nispeten örselenmemiş zeminleri test etme potansiyeline dayanmaktadır. SBP karmaşık bir cihaz olup, kuyuya yerleştirme işleminin doğru bir şekilde yapılabilmesi için yetenekli ve tecrübeli operatör gereklidir. Daha az tecrübe ve beceriye sahip operatörlerin SBP'yi kuyuya yerleştirmesi durumunda zeminde meydana gelen örselenme, daha basit bir düzenek (kuyu presiyometresi) kullanıldığı durumdaki kadar olabilir. Becerikli operatörler kullansa bile bir miktar örselenme kaçınılmazdır. (Mair ve Wood, 1987) presiyometrenin sürülmesi sırasındaki örselenme miktarını etkileyen faktörleri; zemin türü, kesici pabucun alt ucundan kesicinin arkasına olan mesafe, presiyometre membranının şişmemiş durumdaki dış çapına kıyasla kesici pabucun çapı, sondaj sırasında aşağı doğru uygulanan kuvvet ve sondaj sırasındaki titreşim miktarı şeklinde sıralamıştır.

Deney programının başlangıcında bu faktörlerin her birine gerekli özen gösterilmek suretiyle örselenme derecesi azaltılabilir. Ticarî incelemelerde ne yazık ki bu işlemler çoğu zaman yapılmamaktadır. Bugüne kadar yapılagelen uygulamalarda, yer değiştirme presiyometreleri sadece kıyılardaki saha incelemelerinde ve nadiren kullanılmıştır. Belli başlı iki çeşitleri vardır. Sürmeli tip presiyometre (PIP), (Henderson vd., 1979) tarafından İngiltere'de Yapı Araştırma İstasyonu'nda geliştirilmiştir. Düzenegın şematik görünümü Şekil 2.58'de verilmiştir. Kablolu sondaj düzenegınının kullanıldığı kıyı ötesi araştırmalarda kullanılmak üzere özel olarak geliştirilmiştir. Konik presiyometre (Withers vd., 1986), bir CPT'ye monte edilmiş tam yer değiştirme ölçüm düzenegıdır.



Şekil 2.58. Sürmeli tip presiyometre (Henderson vd., 1979)

2.2.4. Dilatometre deneyi

Pek çok alet basınç metre olarak anılmıştır fakat kaynaklar onlardan basınç metre olarak bahsetmemiştir. Günümüzde kullanılan pek çok alete basınçmetreden farklı isim verilmiştir. Yüksek basınç dilatometresi buna örnektir (Hughes ve Ervin, 1980), (Clarke, 1995). Sert zeminler ve kayalarda kullanılmak üzere tasarlanan yüksek basınçlı cihazlar bazan dilatometre olarak adlandırılmıştır.

En son geliştirilen arazi deney tekniklerinden biri olan dilatometre, İtalya'da 1970'lerin sonuna doğru Silvano Marchetti tarafından geliştirilmiştir (Marchetti,

1980). Düz dilatometre veya Marchetti dilatometresi olarak bilinen alet; 96 mm genişliğinde, 15 mm kalınlığında bir metal bıçak ile Şekil 2.59'da görüldüğü gibi bir tarafında yer alan ince, düz, dairesel ve şişebilir bir metal membrandan oluşmaktadır. Aletin iki çeşit membranı bulunmaktadır. Biri kontrolsüz dolgularda diğeri ise yumuşak zeminlerde kullanılabilir. Standart kontrol ünitesi 40 bar kapasitelidir.

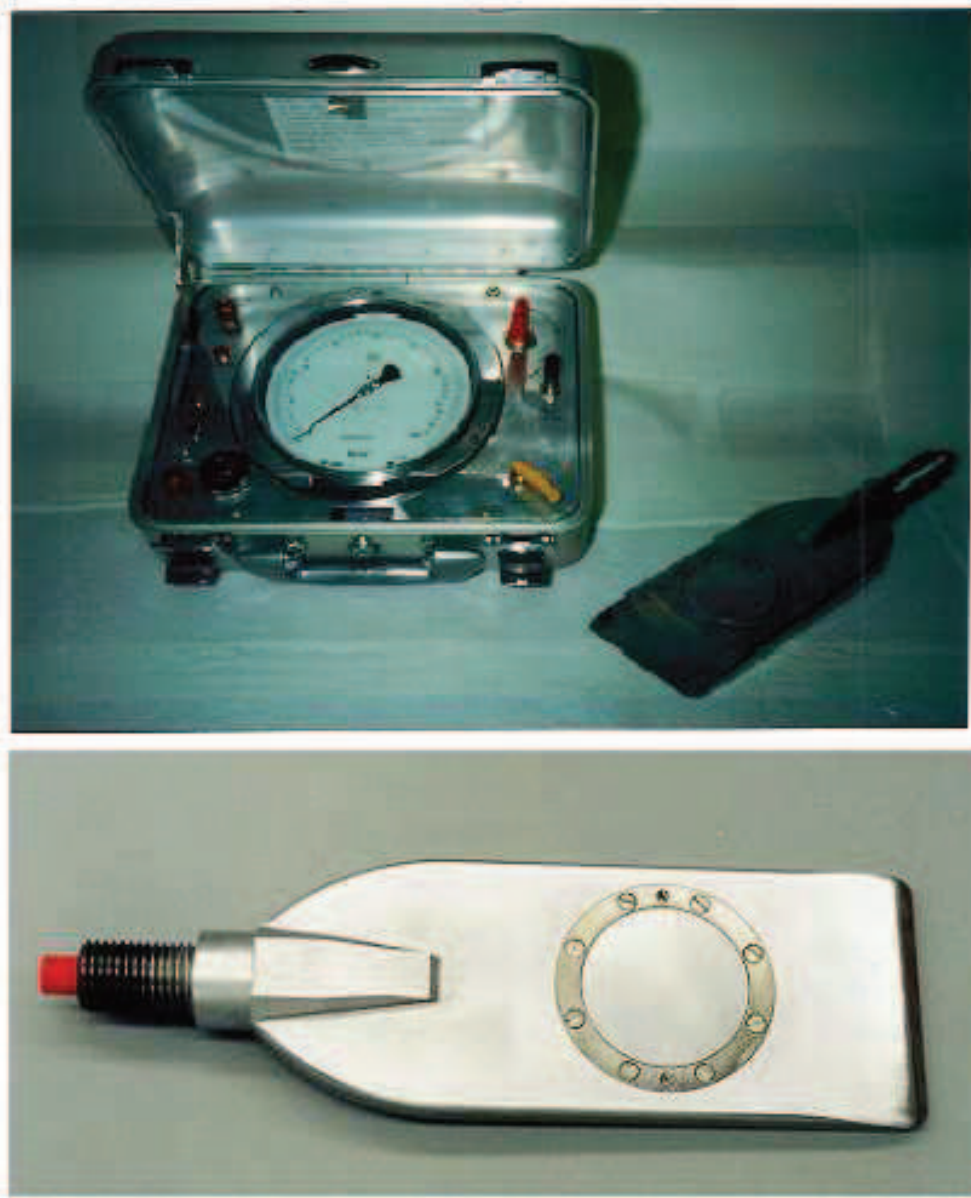
Dilatometre deneyi (DMT); dilatometre bir CPT sonda düzeneği veya uygun başka bir aygıt yardımıyla zemin içinde arzu edilen derinliğe sürülerek yapılır. Dışarı doğru basınç uygulayacak şekilde membrana azot gazı ile basınç uygulanır. Membranın merkezinin zemin içine 0,05 mm doğru hareket etmesi için gereken basınç (A basıncı) ve zemin içine 1,10 mm hareket etmesi için gerekli basınç (B basıncı) kaydedilir. Membrandaki basınç düşürülür ve membran orijinal haline dönüştüğü zaman üzerine etkiyen basınç kaydedilir. Bu C basıncı olup, zemindeki boşluk suyu basıncının bir ölçüsüdür. Dilatometre zeminde 15 ile 30 cm daha derine sürülerek deney tekrarlanır. Planlanan derinliğe ulaşıncaya kadar deney tekrarlanır. Bu deneyin her bir aşamasının tamamlanması tipik olarak 1-2 dakika sürer ve böylece tipik bir profilin çıkarılması (zemin yüzeyi ile arzu edilen derinlik arasında gerçekleştirilen DMT deneylerinin tamamı) yaklaşık olarak 2 saat sürer. Benzer bir derinlik için CPT ile profil çıkarma işlemi ise yaklaşık olarak yarım saatte tamamlanır. Deneyde zemin malzemesinin üç parametresi belirlenebilmektedir; malzeme indeksi, düşey basınç ve dilatasyon modülü (marchetti-dmt, 2008).

DMT'nin başlıca faydası, zemindeki yanal gerilme şartını ve sıkışabilirliği ölçmesidir. Bunlar A, B ve C basınçlarından ve DMT indislerindeki gibi ekipmanın bazı kalibrasyon faktörlerinden bulunur.

I_D - materyal indeksi (normalize edilmiş modül)

K_D - yatay gerilme indeksi (normalize edilmiş yanal gerilme)

E_D - dilatometre modülü (teorik elastisite modülü)



Şekil 2.59. Marchetti Dilatometresi (Marchetti, 2008)

Araştırmacılar zeminin bazı mühendislik özellikleri; sınıflama, yanıl zemin basınç katsayısı (K_0), aşırı konsolidasyon oranı (OCR), Elastisite modülü (E veya M); ile bu indisler arasında korelasyonlar geliştirmiştir (Schmertmann, 1982), (Schmertmann, 1986), (Kulhavy ve Mayne, 1990) ve (Marchetti, 1997).

Marchetti Dilatometresi ile zemin özelliklerini belirleme üzerine araştırmalar devam etmektedir. Zeminlerin sıvılaşma özelliği ile ilgili bir araştırma (Marchetti, 1982) tarafından verilmiştir.

BÖLÜM 3. PENETROMETRENİN İMALİ

Penetrometrenin tasarımı ve imalatı aşamalarında, daha önce kullanılmış malzeme, yöntem ve sistemler araştırılarak çalışmanın amacına en uygun seçimler yapılmaya çalışılmıştır. Geçmişte penetrometreler ve diğer zemin araçlarında kullanılacak malzeme, tasarımın önünde enbüyük engel olmuştur. Günümüzde malzeme biliminde yaşanan gelişmelere rağmen, tasarımları sınırlandıran en önemli unsurlardan biri malzeme özellikleridir.

Zemin inceleme araçlarında kullanılan malzemelerde iki etken belirleyici olmaktadır. Bu etkenlerden biri, zeminlerde yüksek oranda bulunan neme ve zeminin kimyasal yapısına bağlı olarak korozyon etkisi, diğeri ise aletin zeminde hareketi sırasında etkili olan aşındırma etkisidir. Bu iki etkiyi birlikte paslanmaz çelik en iyi karşılamaktadır. Kalitesine göre oldukça düşük maliyeti, kolay işlenebilirliği, korozyon dayanımı ve aşınma dayanımının yüksekliği nedeniyle penetrometrede çoğunlukla paslanmaz çelik kullanılmıştır.

Penetrometrelerde, yük ölçümünde uzun zamandır strain gauge kullanılarak yapılmaktadır. Bu teknolojinin kullanılmaya başlamasıyla birlikte mekanik penetrometreler yerini elektrikli penetrometrelere bırakmıştır. Bu çalışmada da yük ölçümü strain gauge kullanılarak yapılmıştır.

Günümüzde strain gauge kullanılarak ölçüm yapma, veri toplama sistemi kullanımını zorunlu kılmaktadır. Yük ölçümleri strain gauge kullanılarak yapıldığından çalışmada veri toplama sistemi kullanılarak veriler alınmıştır ve alınan veriler bilgisayara aktarılarak kaydedilmiştir.

3.1. Paslanmaz Çelik

Aşınma ve korozyona dayanıklı olması için penetrometrenin paslanmaz çelikten üretilmesi tasarlanmıştır. Normal, alaşımsız ve az alaşımlı çelikler korozif etkilere karşı dayanıklı olmadıklarından, bu tür uygulamalar için genellikle paslanmaz çeliklerin kullanılması gerekmektedir.

Paslanmaz çelikler normal atmosfer şartlarına ve sulu ortamlarda dayanıklıdır. Asidik ve korozif ortamlara da dayanıklılık göstermektedir. Paslanmaz çeliklerde en önemli alaşım elementi kromdur. Kromun oksijene karşı olan aktivitesi demirden fazla olduğu için mevcut oksijenle kendisi birleşerek 20-30 µm kalınlığında pasif Cr₂O₃ tabakası oluşturur (Yüksel, 2002).

Paslanmaz çeliğin korozyon direncinin oluşabilmesi için en az %12 Cr içermesi ve ortamda da oksijen bulunmasına gerek vardır (Colombier ve Hochmann, 1965). Paslanmaz çeliğin yüzeyinde pasif bir tabakanın oluşabilmesi için mutlaka bir kimyasal işleme gerek yoktur. Bu film, yüzeyin oksijen ile teması halinde aniden oluşur. Kendiliğinden oluşan, paslanmaz çelik yüzeyine kuvvetle tutunmuş saydam oksit tabakası yüksek korozyon dayanımı sağlamaktadır. Çok ince olsada, kimyasal reaksiyonlara karşı pasif davranan bu amorf tabaka sayesinde paslanmaz çelikler korozyona karşı dayanım kazanmaktadır. Oksijenli ortamlarda kendini yenileme özelliği bulunan oksit tabakası, imalat sırasında ya da kullanım sırasında dış etkilerle aşınsa ya da çizilse dahi eski özelliğini yeniden kazanmaktadır.

Paslanmaz çelikler, korozyona karşı dayanımlarının yanında birçok yönden üstün özelliklere sahiptir. Paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerinin hem yüksek hemde düşük sıcaklıklarda iyi olması, şekil verme kolaylığı, estetik görünümü nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Paslanmaz çelik tüketimi, toplumlarda kolaylık ve yaşam kalitesi getirdiğinden refah seviyesinin bir göstergesi sayılmaktadır. Kalkınmış ülkelerde, çok çeşitli sanayi alanlarında ve çok yüksek miktarlarda paslanmaz çelik malzeme kullanılmaktadır (Fırat, 1998).

Paslanmaz çelikler, pahalı olmasına rağmen, bakımlarının kolay ve fiyatlarının ucuz olması, kullanım ömrünün uzun olması nedeniyle birçok kullanım alanında tercih edilmektedir. Diğer yandan geri kazanım oranı çok yüksek bir malzeme olması paslanmaz çelikleri, çevre dostu bir malzeme yapmaktadır.

3.1.1. Paslanmaz çeliklerin üstünlükleri

Korozyon dayanımı: Paslanmaz çeliklerin en önemli özelliği korozyon dayanımlarının yüksek olmasıdır. Düşük alaşımlı türleri atmosferik korozyona, yüksek alaşımlı türleri ise birçoğu korozif ortama dayanıklıdır.

Yüksek ve düşük sıcaklıklar: Paslanmaz çeliklerin bazı türleri yüksek sıcaklıklarda, bazıları da düşük sıcaklıklarda dahi özelliklerini önemli ölçüde korumaktadır. Bazı paslanmaz çelik türlerinde, yüksek sıcaklıklarda dahi malzemenin mekanik dayanımında önemli bir düşme görülmez. Bazı türleri ise çok düşük sıcaklıklarda dahi gevrekleşmezler ve tokluklarını korurlar.

İmalat kolaylığı: Kesme, kaynak, sıcak ve soğuk şekillendirme ve talaşlı imalat gibi şekillendirme işlemleri, tüm paslanmaz çeliklere kolaylıkla uygulanabilmektedir.

Mekanik dayanım: Paslanmaz çeliklerin çoğunun dayanımı soğuk şekillendirme ile artırılabilir. Bazı paslanmaz çelik türlerinde de ısı işlem uygulanarak dayanım artırılabilir. Dayanım yüksekliği sayesinde, malzeme kalınlıkları azaltılarak parça ağırlığı ve fiyatta önemli düşüşler sağlanabilir.

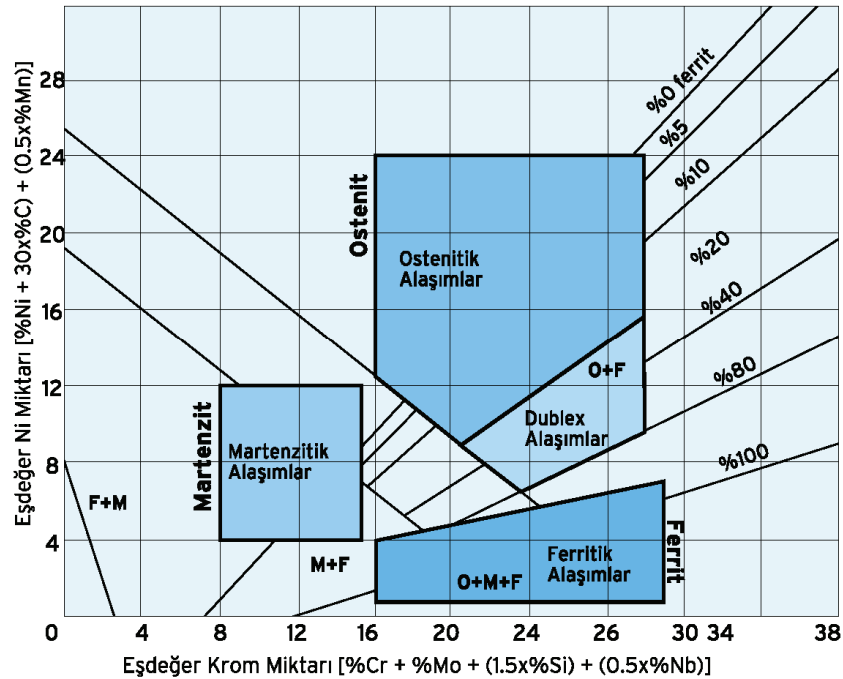
Görünüm: Paslanmaz çelik, yüzeyinde oluşan saydam tabakanın etkisiyle iyi bir görünüme sahiptir. Paslanmaz çelik yüzeyleri farklı şekillerde işlenerek kullanım alanlarına daha uygun seçenekler oluşturulabilmektedir. Yüzeylerin görünümü kolaylıkla uzun süreler korunabilmektedir.

Hijyenik özellik: Paslanmaz çelikler zor kirlenen ve kolay temizlenebilen malzemeler olduğundan hijyen gerektiren ortamlarda (hastane, mutfak, gıda ve ilaç sanayi) yaygın olarak kullanılmaktadır.

Uzun ömür: Paslanmaz çelikler, mekanik özellikleri iyi olduğundan ve korozyona dayanıklı olduklarından uzun yıllar zarar görmeden kullanılabilirler. Uzun ömrü sayesinde paslanmaz çelikler bazen hurdaya ayrıldıktan sonra yeniden kullanılabilirler.

3.1.2. Paslanmaz çelik türleri

Paslanmaz çelik türünü belirleyen kimyasal bileşimdir. Kimyasal bileşim (krom, nikel, karbon, mangan, molibden vb. oranları) değiştirilerek çelik türü oluşturulmaktadır. Diğer yandan bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niyobyum, azot, kükürt ve selenyum gibi bazı elementler eklenerek ilave özellikler oluşturulmaktadır. Paslanmaz çelik özellikleri değiştirilerek, kullanımda ve imalatta istenen faydalar sağlanmaktadır. Paslanmaz çeliklerde krom, nikel, molibden ve mangan, özelliği belirleyen esas elementlerdir. Bunlardan öncelikle krom ve nikel, iç yapının ferritik veya östenitik olmasını belirlemektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Paslanmaz çelik türleri için Schaeffler Diyagramı (Sarıtaş Çelik, 2004)

Paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri Tablo 3.1’de verilmektedir. Bileşimlere göre değişik sınıf ve özelliklere sahip olan paslanmaz çelikler 5 ana grupta toplanmaktadır;

- 1) Ferritik,
- 2) Martenzitik,
- 3) Östenitik,
- 4) Ferritik-Östenitik (dubleks),
- 5) Çökeltme sertleşmesi uygulanabilen alaşımlar.

3.1.2.1. Ferritik paslanmaz çelikler

Bunlar düşük karbonlu ve %12 - 18 krom içeren paslanmaz çeliklerdir. Ferritik çelikler hem oda sıcaklığında hem de daha yüksek sıcaklıklarda demir elementinin sahip olduğu hacim merkezi kübik kristal yapısına sahiptirler ve östenit ferrit dönüşümü göstermezler. Dolayısıyla içyapılarını ve mekanik özelliklerini ısı işlemlerle etkilemek mümkün değildir. Tavllanmış halde akma gerilmeleri 275 ile 350 MPa arasındadır. Düşük toklukları ve gevrekleşme hassasiyetleri nedeniyle, makine parçası olarak kullanımları özellikle kaynaklı montajlar ve kalın kesitler için sınırlıdır. Atmosferik korozyona ve oksidasyona karşı olan dayanımları ise önemli avantajlarıdır. Ferritik çelikler %10,5 ile 30 arasında krom ve az miktarda karbon, azot ve nikel gibi östenit yapıcı elementler ihtiva ederler. Kuvvetli östenit yapıcı olan karbon belirli bir miktara ulaştıkça kromun ferrit yapıcı etkisi ortadan kalkar, dolayısıyla östenitik veya martenzitik paslanmaz çelikler ortaya çıkar (Aran ve Temel, 2004).

Tablo 3.1 Bazı paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri (Euroinox, 2011)

ASTM	EN Malz. No.	Kimyasal bileşim, ağırlık % (max)									
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Diğer
Feritik paslanmaz çelikler											
409	1.4512	0.08	1.0	1.00	0.045	0.03	10.5-11.75	-	-	-	(6xC)Ti
430	1.4016	0.12	1.0	1.00	0.04	0.03	16.0-18.0	-	-	-	-
430Ti	(1.450)	0.10	1.0	1.00	0.04	0.03	16.0-19.5	0.75	-	-	(5xC)Ti
439	1.4510	0.07	1.0	1.00	0.04	0.03	17.0-19.0	0.5	-	-	0.2+4(C+N)Ti
Martenzitik paslanmaz çelikler											
410	1.4006	0.15	1.0	1.00	0.04	0.03	11.5-13.0	-	-	-	-
420	1.4021	0.15 min	1.0	1.00	0.04	0.03	12.0-M.O	-	-	-	-
440A	-	0.6-0.75	1.0	1.00	0.04	0.03	16.0-19.5	-	0.75	-	-
440C	1.4125	0.95-1.2	1.0	1.00	0.04	0.03	16.0-18.0	-	0.75	-	-
Dublex paslanmaz çelikler											
2205*)	1.4462	0.03	2.0	1.0	0.03	0.02	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.2	-
329	1.4460	0.20	1.0	0.75	0.04	0.03	23.0-28.0	2.5-5.0	1.0-2.0	-	-
Östenitik paslanmaz çelikler											
201	1.4372	0.15 *	55-75	1.00	0.06	0.03	16.0-18.0	3.5-5.5	-	0.25	-
301	1.4310	0.15	2.0	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	6.0-8.0	-	-	-
304	1.4301	0.08	2.0	1.00	0.045	0.03	18.0-20.0	8.0-10.5	-	-	-
304L	1.4306	0.03	2.0	1.00	0.045	0.03	18.0-20.0	8.0-12.0	-	-	-
304LN	1.4311	0.03	2.0	1.00	0.045	0.03	18.0-20.0	8.0-12.0	-	0.1-0.16	-
309	1.4828	0.20	2.00	1.00	0.045	0.03	22.0-24.0	12.0-15.0	-	-	-
309S	1.4833	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	22.0-24.0	12.0-15.0	-	-	-
310	1.4841	0.25	2.00	1.50	0.045	0.03	24.0-26.0	19.0-22.0	-	-	-
310S	1.4845	0.08	2.00	1.50	0.045	0.03	24.0-26.0	19.0-22.0	-	-	-
316	1.4401	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	-	-
316L	1.4404	0.03	2.00	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	-	-
316LN	1.4406	0.03	2.00	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	0.1-0.16	-
316Ti	1.4571	C.08	2.00	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	-	5x(C+N)Ti
321	1.4541	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	17.0-19.0	9.0-12.0	-	-	(5xC)Ti
347	1.4550	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	17.0-19.0	9.0-13.0	-	-	(10xC)Nb
Çökeltme sertleşmesi uygulanabilir paslanmaz çelikler											
631	1.4568	0.09	1.0	1.0	0.04	0.04	16.0-18.0	6.5-7.5	-	-	0.75-1.5 Al
632	1.4532	0.09	1.0	1.0	0.04	0.03	14.0-16.0	6.5-7.5	2.0-3.0	-	0.75-1.5 Al

*) Ticari isim

3.1.2.2. Martenzitik paslanmaz çelikler

Martenzitik kromlu paslanmaz çelikler % 11,5'ten fazla krom içeren ve yüksek sıcaklıklarda östenit yapısına sahip olan ve uygun bir soğutma işlemi ile de içyapıları, oda sıcaklığında martenzitik olan paslanmaz çeliklerdir. Bu tür paslanmaz çeliklerde, krom miktarı alttan % 11,5 ve üstten de % 18 ile sınırlanmıştır. Burada; alt sınırı korozyon direnci, üst sınırı ise yüksek sıcaklıkta çeliğin tamamen östenitik yapıya dönüşebilme özelliği belirlemektedir (Davis, 1994).

Martenzitik çelikler yüksek çekme, sürünme ve yorulma dayanımı gerektiren bıçaklar, ameliyat aletleri, miller, pimler gibi malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır.

3.1.2.3. Östenitik paslanmaz çelikler

Paslanmaz çeliğin bileşiminde yeterince nikel bulunursa, içyapısı oda sıcaklığında dahi östenitik olur. Östenitik çeliklerin temel bileşimi %18 krom ve %8 nikeldir. Östenitik paslanmaz çelikler, biçimlendirme, mekanik özellikler ve korozyon dayanımı bakımından çok uygun bir kombinasyon sunarlar. Süneklikleri, toklukları ve biçimlendirilme kabiliyetleri düşük sıcaklıklarda bile mükemmeldir. Manyetik olmayan bu çeliklere, östenitik içyapıları dönüşüm göstermediği için normalleştirme veya sertleştirme ısıl işlemleri uygulanmaz, mekanik dayanımları ancak soğuk şekillendirme ile artırılabilir.

Östenitik paslanmaz çeliklerin korozyon direnci, martenzitik ve ferritik paslanmaz çeliklerden daha yüksektir. Yapının östenitik olmasından dolayı, ferritik paslanmaz çeliklerde karşılaşılan çok önemli sorun olan, geçiş sıcaklığı altında gerçekleşen gevrekleşme bu çeliklerde görülmemektedir. Gerek sıfır altı ve gerekse yüksek sıcaklıklardaki korozyon dirençleri ve mekanik özelliklerin üstünlüğü bu çelik grubunun birçok alanda rakipsiz bir yapı çeliği olarak kullanılmasını sağlamıştır. Bu nedenle östenitik paslanmaz çelikler Amerika Birleşik Devletlerinde paslanmaz çelik üretiminin % 70'ini oluşturmaktadır. Bu malzemeler yüksek korozyon direncinden ve şekillendirilebilme kabiliyetlerinden dolayı birçok mühendislik uygulamaları için arzu edilen özelliklere sahiptir (Smith, 2000).

Östenitik paslanmaz çeliklerden X5CrNi1810 (304) östenitik paslanmaz çeliği, korozyon direnci ve şekillendirilebilme kabiliyeti gibi üstünlüklerinden dolayı en çok bilinen ve en yaygın kullanılan östenitik paslanmaz çelik olup plastik şekil değiştirme sertleşmesi ile mukavemet arttırılabildiğinden yüksek mukavemet gerektiren makine parçalarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. AISI 304 paslanmaz çeliğin içerisinde karbon miktarı azaltıldığında, elde edilen ürün AISI 304L olmaktadır. Bu tür çok düşük karbonlu östenitik paslanmaz çeliklerin

geliştirilmesinin amacı, kaynak esnasında, ısı tesiri altında kalan bölgede oluşan ve taneler arası korozyona neden olan karbür çökmesinin önlenmesidir. % 2 molibden içeren AISI 316 tipi östenitik paslanmaz çelik, yüksek korozyon direncine ve iyileştirilmiş yüksek korozyon direncine sahiptir. Paslanmaz çelik içerisindeki krom miktarı % 23-25 arttırılmış olan AISI 309 ve AISI 310 tipi östenitik paslanmaz çelikler yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır. AISI 316L tipi düşük karbon içeren östenitik paslanmaz çelikler, taneler arası korozyonu önlemek amacıyla üretilmiştir. X6CrNiTi1810 (321) ve X6CrNiNb1810 (347) östenitik paslanmaz çelikleri titanyum ve niyobyum ile stabilize edilerek yüksek sıcaklıklarda kaynak bağlantılarındaki taneler arası korozyonun önlenmesi amaçlanmıştır (Kaluç ve Tülbentçi, 1995).

Östenitik paslanmaz çeliklerde en yaygın olarak kullanılan, 304 (AISI 304) tipi östenitik paslanmaz çelikler, %0,06 karbon içermekte olup bu çelikler aşağıda sıralanan özelliklere sahiptir;

- Mükemmel korozyon dayanımına,
- Mükemmel kaynak edilebilme kabiliyetine,
- Sünek olduklarından kolay şekillendirilebilme kabiliyetine,
- Hijyenik olduklarında, temizlik ve bakım kolaylığına,
- Yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere,
- Düşük sıcaklıklarda mükemmel mekanik özelliklere,
- Manyetik değildirler (tavlanmış halde),
- Dayanımlarının sadece pekleşme ile artırılabilmesi özelliğine.

Östenitik, krom-nikelli paslanmaz çelikler genellikle nemli ortamlarda kullanılır. Çelikte yüksek nikel içeriği, gerilmeli korozyon çatlamaına karşı riski azaltır. Bu çeliklerin, katılan molibden ve krom alaşım elementlerinin miktarına bağlı olarak, genel korozyonu, çukurcuk ve aralık korozyon dirençleri artar. Östenitik paslanmaz çelikler, soğuk haddelenmiş veya çekilmiş halde yüksek mukavemetli ve yüksek korozyon dirençli çeliklerdir (Nickel Development Institute, 1974).

3.1.2.4. Östenitik-ferritik (dubleks) paslanmaz çelikler

Bunlar, yüksek oranda krom (%18-28) ve orta miktarda nikel (%4,5-8) içeren çeliklerdir. Nikel miktarı en çok %8 olup, bütün içyapının östenitik olması için yetersizdir. Ferrit ve östenit fazlarından oluşan içyapı nedeniyle bu çelikler dubleks olarak adlandırılır. Bunlar, hem iyi mukavemet hem de iyi süneklik özelliklerini birlikte sağlarlar. Ayrıca korozif ortamlarda dahi çok uygun yorulma dayanımları vardır. Tavsiyelere dikkat ederek uygulanması halinde, kaynak yapılması kolaydır. Genellikle kimyasal aparat imalatında, arıtma tesislerinde ve deniz veya deniz altı teknolojisinde kullanılır (Aran ve Temel, 2004).

3.1.2.5. Çökeltme sertleşmesi (yaşlandırma) uygulanabilir paslanmaz çelikler

Bunların ana içyapıları östenitik, yarı östenitik veya martenzitik olabilir. Çökeltme olayını gerçekleştirebilmek için, bazen, önce soğuk şekil vermek gerekebilir. Çökelti oluşumu için alüminyum, titanyum, niyobyum ve bakır elementleri ile alaşımlama yapılır. Bu sayede mukavemetleri 1700 MPa'a kadar çıkan paslanmaz çelikler elde edilebilir. Piyasada çözme tavı görmüş halde satılır; malzeme bu durumda yumuşak olup, imalat işlemleri uygulanabilir ve daha sonra tek kademeli bir düşük sıcaklık yaşlandırması ile sertleştirilebilir. Bu çeliklere çökeltme sertleşmesi (yaşlandırma) uygulanabilir. Bunların esas içyapıları östenitik, yarı-östenitik veya martenzitik olabilir. En yaygın olarak kullanılan türü 630 kalite olan bu grubun kullanım alanı uçak-uzay ve diğer yüksek teknoloji alanlarıdır (Aran ve Temel, 2004).

3.1.3. Paslanmaz çeliklerle imalat

Paslanmaz çelik malzeme ile yapılan imalat, diğer çeliklerden daha farklı özellikler taşır. Bu farklılık, genellikle malzemelerin akma dayanımı ile pekleşme davranışlarının değişik olmasından kaynaklanır ve her bir paslanmaz çelik türü için ayrı ayrı ele alınması gerekir. Tablo 3.2'de başlıca paslanmaz çelik kalitelerinin imalat özellikleri toplu olarak verilmiştir.

Tablo 3.2. Paslanmaz çeliklerin imalat özellikleri (Aran ve Temel, 2004)

Grup	Östenitik					Ferritik		Martenzitik		
	201,202, 302,302, 304,304L, 305	303 ^{b)}	309 310	316 316L 317 317LMN	321 347	430 439	405 442 446	403 410	420	440A 440C
Kalite	*	*	*	*	*	***	***	***	***	**
Pul kesme	*	*	*	*	*	**	**	**	**	**
Delme	*	*	*	*	*	**	**	**	**	*
Kesme soğuk	***	-	**	***	**	**	*	*	0	0
Derin çekme	**	*	**	**	**	**	**	**	**	**
Sıcak şekillendirme	**	*	**	**	**	**	**	**	*	0
Soğuk şekillendirme	**	-	**	**	**	**	**	**	0	0
Tornada sıvama	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
Isıl işleme sertleştirme	*	**	*	*	*	*	*	**	***	***
Taşıma	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
Manyetik taşıma	**	-	**	**	**	**	**	**	**	**
Keçeleme	**	**	**	**	*	**	**	**	**	**
Parlatma	**	*	**	**	**	**	**	**	**	**
Sıcak perçinleme	**	*	**	**	**	**	**	**	**	**
Soğuk perçinleme	**	**	**	**	**	**	**	**	**	0
Lehimleme	**	**	**	**	**	**	**	**	**	0
Sert lehim	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Sert lehim (gümüş)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Kaynaklama	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Talaşlı imalat	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**

1) Talaşlı imalat için geliştirilmiş malzeme (benzerleri arasında 416, 420F, 430F ve 440F sayılabilir)
Kısaltmalar: ***: Çok İyi, **: İyi, * Orta, O: Zayıf(tavsiye edilmez), -:Mümkün değil, +: Mümkün

Paslanmaz çelik parçalara uygulanan işlemler, aşağıda açıklanmaktadır;

Talaşlı imalat: Paslanmaz çeliklerin talaşlı imalatı, şekillendirilmelerinde olduğu gibi yüksek mukavemetleri, pekleşme özellikleri ve sünekliklerinden dolayı karbon çeliklerine oranla daha zordur. Türler arasında büyük farklılıklar bulunmakla beraber, daha yüksek güç, daha düşük kesme hızı ve daha kısa takım ömrü yanında, kesme sırasında ortaya çıkan yüzey kalitesi sorunları ve kesici takım üstünde malzeme birikmesi problemleri ortaya çıkabilmektedir.

Paslanmaz çeliklerin kesme işleminde, titreşimlerin önlenmesi için takım tezgâhı ve kesici takımın rijitliği büyük önem taşımaktadır. Özellikle östenitik ve yüksek

alaşımli türlerde sert ve sürekli talaş oluştuğu için, talaş kırıcısı veya kıvrıcısı taşıyan takımlar veya plaketer tavsiye edilmektedir.

Kesilmekte olan malzeme yüzeyinde oluşabilecek pekleşmenin önlenmesi için bazı hususlara dikkat etmek gerekmektedir. Takımın kesme öncesinde yüzey üstünde hafif temas ile hareketi, yüzeyin hemen altındaki tabakada ezilmeye ve pekleşmeye, yüzeyin parlatılmasına ve takımın, daha yüzeye dalmadan yanmasına yol açabilir. Ayrıca iş parçasında, bir önceki işlemde (şekillendirme veya talaşlı imalat) gelen sertleşmenin, talaş kaldırmaya etkisi hesaba katılmalıdır. Kesme sırasında oluşabilecek pekleşme, karbon çeliklerinkine göre daha düşük besleme ve kesme hızları ile önenebilir. 304 ve 316 gibi östenitik çelikler tavllanmış halde 550-620 MPa çekme dayanımına sahiptir. Bu malzemelerde akma ile çekme dayanımları arasındaki büyük fark ve aradaki pekleşme sonucu, kesme zorlaşır.

Kaynak: Tüm paslanmaz çelikler herhangi bir ark kaynağı yöntemi ile birleştirilebilir. Ancak, kaynak metali ve ısı tesiri altında olan bölgedeki korzyon dayanımı, artık gerilmeler, çarpılma ve dikiş çatlaması gibi hususlara dikkat edilmelidir. Paslanmaz çeliklerin direnç kaynağı da oldukça yaygındır. Karbon çeliğinden sonra, en çok direnç kaynağı uygulanan malzeme paslanmaz çeliklerdir. Östenitik çeliklerin düşük ısı iletimi, yüksek elektrik direnci ve manyetik olmamaları sonucu, kaynak sırasında karbon çeliklerden daha düşük kaynak akımları yeterlidir. Ancak, ısıl genleşme katsayıları yüksek olduğundan çarpılma sorunu vardır. Kaynak süreleri çok kısa olduğundan karbür çökmesi nedeniyle korozyon dayanımında önemli bir düşüş olmaz. Ancak, bindirme şeklinde yapılan nokta kaynaklarında, belirli ortamlarda aralık korozyonu problem yaratabilir. Çok yaygın olmasa da martenzitik ve ferritik türlerde de direnç kaynağı yapılabilir. Kaynak sonrası soğumada martenzit oluşumu söz konusu ise temperleme için ikinci bir akım uygulaması gerekebilir. Paslanmaz çeliklerde genellikle gaz altı ergitme kaynağı hemen hiç uygulanmaz. Gaz kaynağında kaynak metalini oksidasyondan veya karbürasyondan koruyan bir kaynak atmosferi oluşturmak oldukça güçtür.

Paslanmaz çelikler arasında en çok kaynakla birleştirilen tür östenitik çeliklerdir. Ancak bunlar diğer karbon ve az alaşımli çeliklerden farklı kaynak davranışına

sahiptirler. En çok dikkat edilmesi gereken husus, orta sıcaklıklarda tane sınırlarında karbür çökmesinin önlenmesidir. Dikişe komşu ve 650-870 °C sıcaklıklarına ısınan bölgede, süre kısa da olsa karbür çökebilir. Bu durum birçok ortamda, özellikle oksit gidermede kullanılan asidik ortamlarda, korozyon direncini düşürür. Ancak bu bölge çok dar olduğundan, çoğu kez parçalar kaynak edildikleri şekilde kullanılırlar.

3.1.4. Kullanılan çelik sınıfı ve özellikleri

Türkiye, Avrupa kıtasındaki en önemli paslanmaz çelik tüketicilerden biridir. Ülkemizde gerek uzun gerekse yassı mamul olarak paslanmaz çelik üretimi yoktur. İhtiyaç tamamen yurt dışından ithalatla karşılanmaktadır (Fırat, 1998). Avrupa'da sadece Türkiye ve Arnavutluk'un paslanmaz çelik tesisi yoktur. Ancak Türkiye, 2002 yılında, dünya demir çelik üreticisi ülkeler sıralamasında 13. büyük üretici olmuştur. Ülkemiz demir ve çelik üretiminde birikim ve deneyim sahibidir. Türkiye için paslanmaz çelik üretimi kritik bir teknolojidir (Kayır, 2003).

Yukarda açıklanan paslanmaz çeliklerin özellikleri ve ülkemizin şartları birlikte değerlendirildiğinde 304 çeliğinin kolay temin edilebilen, uygun özellikli ve kolay işlenebilen bir çelik olması nedeniyle tasarlanan penetrometrede kullanılmasının uygun olduğu anlaşılmaktadır. Ülkemizde, paslanmaz çelik mamullerinin tamamını bulmak mümkün olmamaktadır. Özellikle profil olarak bulunabilecek ürün çeşidi de sınırlı durumdadır. Penetrometre imalinde kullanılan boruların, küçük çaplarında büyük cidar kalınlığı, büyük çaplarında ise küçük cidar kalınlığına sahip ürünlerin bulunması zorlaşmaktadır. Paslanmaz çelikten imal edilmiş, bazı boru ve kütük profiller Şekil 3.2'de görülmektedir. Ülkemizde istenilen çaplar ve cidar kalınlıklarının en kolay temin edilebildiği çelik sınıfı 304 sınıfıdır. Çünkü bu sınıf çelikler,

işlenmesi kolay ve özellikleri yeterince iyi olduğundan birçok sektörde kullanılmaktadır. Bu şartlar göz önünde bulundurularak, tasarlanan penetrometrenin imalinde 304 çeliği kullanılmıştır.

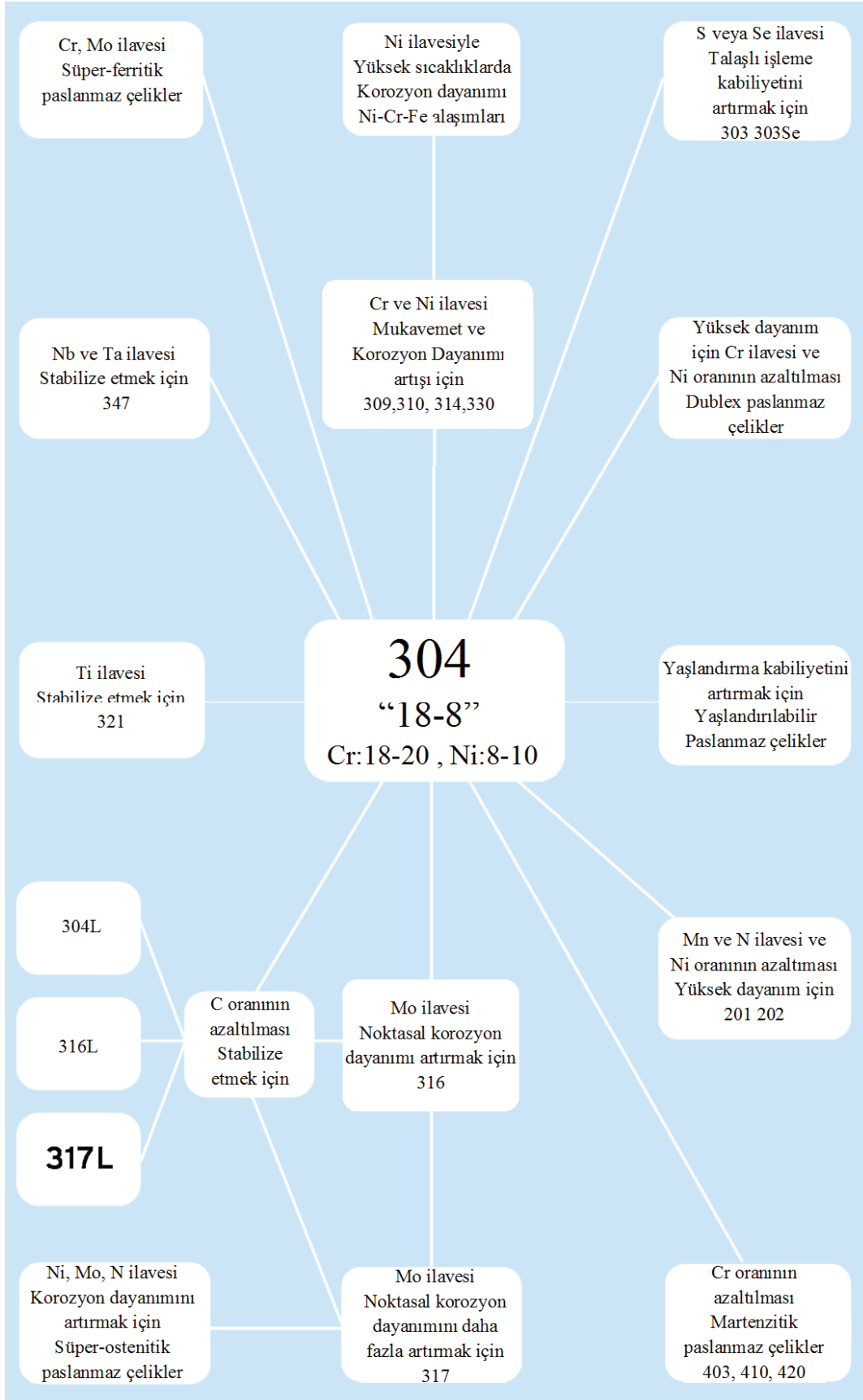


Şekil 3.2. Paslanmaz çelikten imal edilmiş bazı boru ve kütük profiller

Paslanmaz çelik sınıflarının fiziksel özellikleri Tablo 3.3’de topluca gösterilmektedir. Şekil 3.3’te ise temel bir referans kabul edilen 304 çeliğiyle diğer bazı çeliklerin özellik değerlendirmesi yapılmıştır.

Tablo 3.3. Paslanmaz çeliklerin fiziksel özellikleri (Aran ve Temel, 2004)

İsimler EN AISI/ASTM No	Özgül Ağırlık 20°Cde kg/dm ³	Elastiklik Modülü 20°Cde GPa	Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ *K ⁻¹) 20°-200°C 20°-400°C		Isı İletkenliği 20°Cde W/m*K	Özgül Isı 20°Cde J/kg*K	Elektrik Direnci 20°Cde (Q*mm ²)/m	Manye tiklik	
1.4512 ⁽¹⁾	409	7,70	220	11	12	25	460	0,6	var
1.4003 ⁽¹⁾		7,70	220	10,8	11,6	25	430	0,6	var
1.4000 ⁽¹⁾	410S	7,70	220	11	12	30	460	0,6	var
1.4016 ⁽¹⁾	430	7,70	220	10	10,5	25	460	0,6	var
1.4509 ⁽¹⁾		7,70	220	10	10,5	25	460	0,6	var
1.4521 ⁽¹⁾	444	7,70	220	10,8	11,6	23	430	0,8	var
1.4006 ⁽¹⁾	410	7,70	215	11	12	30	460	0,6	var
1.4021 ⁽¹⁾	420	7,70	215	11	12	30	460	0,6	var
1.4028 ⁽¹⁾	420	7,70	215	11	12	30	460	0,65	var
1.4313 ⁽¹⁾		7,70	200	10,9	11,6	25	430	0,6	var
1.4418 ⁽¹⁾		7,70	200	10,8	11,6	15	430	0,8	var
1.4362 ⁽¹⁾	2304	7,80	200	13,5	14	15	500	0,8	var
1.4462 ⁽¹⁾	2205	7,80	200	13,5	14	15	500	0,8	var
1.4501 ⁽¹⁾		7,80	200	13,5		15	500	0,8	var
1.4410 ⁽¹⁾	2507	7,80	200	12,5	13,5	15	500	0,8	var
1.4310 ⁽¹⁾	301	7,90	200	17	18	15	500	0,73	yok
1.4318 ⁽¹⁾	301LN	7,90	200	16,5	17,5	15	500	0,73	yok
1.4372 ⁽¹⁾	201	7,80	200	15,7	17,5	15	500 ^(e)	0,7	yok
1.4568 ⁽¹⁾	631	7,80	200	11	11,6	16	500	0,8	yok
1.4301⁽¹⁾	304	7,90	200	16,5	17,5	15	500	0,73	yok
1.4307 ⁽¹⁾	304L	7,90	200	16,5	18	15	500	0,73	yok
1.4311 ⁽¹⁾	304LN	7,90	200	16,5	17,5	15	500	0,73	yok
1.4541 ⁽¹⁾	321	7,90	200	16,5	17,5	15	500	0,73	yok
1.4550 ⁽¹⁾	347	7,90	200	16,5	17,5	15	500	0,73	yok
1.4305 ⁽¹⁾	303	7,90	200	16,5	17,5	15	500	0,73	yok
1.4303 ⁽¹⁾	305	7,90	200	16,5	17,5	15	500	0,73	yok
1.4306 ⁽¹⁾	304L	7,90	200	16,5	17,5	15	500	0,73	yok
1.4401 ⁽¹⁾	316	8,00	200	16,5	17,5	15	500	0,75	yok
1.4404 ⁽¹⁾	316L	8,00	200	16,5	17,5	15	500	0,75	yok
1.4436 ⁽¹⁾	316	8,00	200	16,5	17,5	15	500	0,75	yok
1.4432 ⁽¹⁾	316L	8,00	200	16,5	17,5	15	500	0,75	yok
1.4429 ⁽¹⁾	316LN	8,00	200	16,5	17,5	15	500	0,75	yok
1.4406 ⁽¹⁾	316LN	8,00	200	16,5	17,5	15	500	0,75	yok
1.4571 ⁽¹⁾	316Ti	8,00	200	17,5	18,5	15	500	0,75	yok
1.4435 ⁽¹⁾	316L	8,00	200	16,5	17,5	15	500	0,75	yok
1.4439 ⁽¹⁾	317LMN	8,00	200	16,5	17,5	14	500	0,85	yok
1.4466 ⁽¹⁾	310MoLN	8,00	195	15,7	17,0	14	500	0,80	yok
1.4539 ⁽¹⁾	904L	8,00	195	16,1	16,9	12	450	1,00	yok
1.4529 ⁽¹⁾		8,10	195	16,1	16,9	12	450	1,00	yok
1.4547 ⁽¹⁾		8,00	195	17	18	14	500	0,85	yok
1.4565 ⁽¹⁾		8,00	190	15,5	16,8	12	450	0,92	yok
1.4713 ⁽²⁾		7,70		11,5	12	23	450	0,70	var
1.4724 ⁽²⁾		7,70	-	10,5	11,5	21	500	0,75	var
1.4762 ⁽²⁾		7,70		10,5	11,5	17	500	1,10	var
1.4948 ⁽³⁾	304H	7,90	200	16,9	17,8	17	450	0,71	yok
1.4878 ⁽²⁾	321H	7,90	200	17	18	15	500	0,73	yok
1.4818 ⁽²⁾		7,80	-	16,5	18	15	500	0,85	yok
1.4833 ⁽²⁾	309S	7,90	200	16	17,5	15	500	0,78	yok
1.4828 ⁽²⁾		7,90	200	16,5	17,5	15	500	0,85	yok
1.4835 ⁽²⁾		7,80		17	18	15	500	0,85	yok
1.4845 ⁽²⁾	310S	7,90	200	15,5	17	15	500	0,85	yok
1.4841 ⁽²⁾	314	7,90	200	15,5	17	15	500	0,9	yok



Şekil 3.3 Temel 304 çeliğiyle diğerlerinin özellik değerlendirilmesi (Sarıtaş Çelik, 2004)

Östenitik paslanmaz çeliklerde soğuma sırasında östenit - ferrit dönüşümü olmadığından su verme yolu ile sertleştirilemezler. Antimanyetik olan bu tür paslanmaz çelikler AISI 3XX serisi içinde gruplandırılmalarının yanı sıra DIN 17440, EN 88, EN 95 ve TS 2535'e göre yüksek alaşımlı çeliklerde olduğu gibi simgelenirler. TS 2535 östenitik paslanmaz çelikleri, bileşiminde korozyona karşı krom ve östenitik bir yapı sağlamak amacı ile de nikel bulunan, oda sıcaklığında manyetik olmayan, ısı işlemi ile sertleştirilemeyen soğuk biçimlendirmeye elverişli paslanmaz çeliktir, diye tanımlar (Avner, 1974).

Östenitik krom - nikelli paslanmaz çeliklerin korozyon dirençleri, martenzitik kromlu ve ferritik kromlu paslanmaz çeliklerden daha yüksektir. İçyapının östenitik olması nedeniyle de ferritik paslanmaz çeliklerde karşılaşılan, çok önemli bir sorun olan, geçiş sıcaklığı altındaki gevrekleşme, bu çeliklerde görülmez. Gerek sıfır altı (-270 °C ye kadar) ve gerekse yüksek sıcaklıklardaki korozyon dirençleri ve mekanik özelliklerin üstünlüğü bu çelik grubunun birçok alanda rakipsiz bir yapı çeliği olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır (Arkun, 2006).

304 (X5CrNi1810) paslanmaz çeliği, korozyon direnci ve iyi biçimlendirebilme kabiliyeti bakımından çok yaygın kullanılan bir östenitik paslanmaz çeliktir. Bu tür çeliğin şekil değiştirme sertleşmesi de arttırılmış olduğundan yüksek mukavemet gerektiren makine parçalarının yapımında oldukça sık kullanılır.

Östenitik paslanmaz çelikler içyapılarına göre stabil veya metastabil östenitik paslanmaz çelikler olarak iki grupta incelenir. Metastabil östenitik paslanmaz çelikler soğuk şekillendirme sonucu iğnemsiz veya martenzitik türde bir içyapı gösterirler. Stabil östenitik paslanmaz çelikler ise oldukça yüksek derecede soğuk şekil değiştirme sonucunda bile östenitik içyapılarını korurlar. Bu iki tür arasındaki belirgin fark, gayet açık bir biçimde bunların çekme diyagramlarından görülebilir. Stabil östenitik paslanmaz çeliklere iyi bir örnek AISI 304 çeliğidir. AISI 304 çeliği normal gerilme-genleşme diyagramında bir östenitik davranış gösterir. Çekme eğrisinin parabolik değişimi gerilme uygulandıkça şekil değiştirme sertleşmesinin devam ettiğinin işaretidir. Buna karşın, AISI 301 östenitik paslanmaz çeliği

metastabil östenitik paslanmaz çeliklere güzel bir örnek olmaktadır. Yaklaşık olarak %10-15 lik bir uzamadan sonra şekil değiştirme sertleşmesi, hızlanan bir şekilde kendini belli eder. Metastabil östenitik paslanmaz çeliklerde, şekil değiştirme sertleşmesinde görülen bu artış doğrudan östenitin dengesizliğinin bir göstergesidir. Burada plastik şekil değiştirme sonucu martenzit oluşmaya başlamıştır (Avner, 1974).

Stabil ve metastabil östenitik paslanmaz çelikler arasındaki farkı kesin bir biçimde çekme mukavemeti belli eder. Burada AISI 201, 202 ve 301 ile stabil gruptaki 304 ve 310'un çekme mukavemetlerini karşılaştırdığımızda metastabil östenitik paslanmaz çeliklerin daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduklarını görürüz. Östenitik paslanmaz çeliklerin uzama ve büzülme değerleri incelendiğinde de bu çeliklerin çok şiddetli deformasyonlara yatkın oldukları görülmektedir. Daha önceden de belirtilmiş olduğu gibi, bu tür çeliklerin çentik-darbe mukavemetleri de oldukça iyidir. Östenitik paslanmaz çeliklerin elastiklik modülleri yalın karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin elastiklik modüllerinden biraz daha küçüktür. Bu da, bunların verilmiş olan bir gerilme için daha fazla elastik deformasyon göstereceklerinin delilidir (Colombier ve Hochmann, 1965).

3.1.5. 304 (1.4031) çeliğinin özellikleri

304 kalite dünyada en sık ve çok yönlü kullanılan paslanmaz çelik sınıfıdır. Mükemmel şekillenebilme ve kaynak kabiliyeti vardır. 304'ün östenitik yapısı ara tavlama yapmadan derin sıvama yapılabilmesini sağlar, dolayısıyla evye, doğalgaz bacaları ve kulplu tencere gibi derin sıvama gerektiren üretimlerde tercih edilir. Endüstri, mimari, ulaşım gibi sektörlerde değişik amaçlarla kullanılır.

Oda sıcaklığında mekanik özellikler: 304 çeliğinin oda sıcaklığında mekanik özellikleri (ASKZN, 2011) tarafından Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4. Oda sıcaklığında 304 çeliklerinin mekanik özellikleri (ASKZN, 2011)

304 (1.4031) çeliği		Birim
Çekme Mukavemeti	515 min	MPa
Ezilme Mukavemeti (%0,2 yük)	205 min	MPa
Uzama (50 mm 'de)	40 min	%
Brinell Sertliği	170 max	Brinell
Dayanıklılık (yorgunluk) sınırı	240max	MPa

Yorgunluk değerlendirmeleri: Paslanmaz çeliklerin yorgunluk mukavemeti değerlendirilirken, yorgunluk sonucu oluşabilecek mahsurlara katkı sağlayan temel faktörlerin malzeme sınıfı değil, pratikteki tasarım ve üretim uygulamaları olduğu unutulmamalıdır (Aran ve Temel, 2004).

Yüksek sıcaklıkta mekanik özellikler: 425°C üzerindeki sıcaklıklarda 304 sınıfı için mukavemet değerleri hızlı düşer. Tablo 3.5'de 304 çeliğinin tipik kısa süreli yüksek ısıda çekme mukavemeti verilmiştir. Değerler su verilmiş malzeme içindir. Bunlar tipik değerler olup tasarım amaçlı kullanılmamalıdır.

Tavsiye edilen azami hizmet sıcaklığı: Oksitlendirici şartlar için azami hizmet sıcaklıkları Tablo 3.6'da verilmiştir (Atlas Çelik, 2011).

Tablo 3.5. Tipik kısa süreli yüksek ısı çekme mukavemeti (ASKZN, 2011)

Sıcaklık °C	600	700	800	900	1000
Çekme Mukavemeti MPa	380	270	170	90	50

Tablo 3.6. Tavsiye olunan azami hizmet sıcaklığı (Atlas Çelik, 2011)

Sürekli Hizmet °C	925
Aralıklı Hizmet °C	870

Sıfır altı sıcaklıklarda tipik özellikler: 304 çeliğinin sıfır altı sıcaklıklarda tipik özellikleri Tablo 3.7’de verilmiştir.

Korozyon dayanımı: 304 kalite paslanmaz çeliği, çok geniş bir alanda mükemmel bir korozyon dayanımına sahiptir. Organik kimyasallara, çok geniş bir alanda inorganik kimyasallara ve renkli boya maddelerine karşı dayanıklıdır. 304 kalite, orta sıcaklıklardaki klorit ortamlarda, 50 °C üzerindeki sıcaklıklarda çekme kuvvetinin uygulandığı stres korozyonu kırılması ve çekirdeklenme ve çatlama korozyonuna maruz kalmaktadır. Bunun yanında, kısa süreli aralıklarla ve temizliğin düzenli yapılıp, uygulandığı (örneğin tencerelerde ve bazı yat bağlantılarında) yerlerdeki ılık klorik ortamlarda başarıyla uygulanabileceği bildirilmiştir (Pasiad, 2011).

Standart sıcaklıkta kullanım suyunda 200 mg/L, 60 °C nin üzerinde 150 mg/L mevcut klora dayanıklıdır. Bazı saf ve asit - su karışımları için kaba bir kılavuz olarak Tablo 3.8’de ki örnekler verilmiştir (ASKZN, 2011).

Tablo 3.7 Sıfır altı sıcaklıklarda 304 çeliğinin tipik özellikleri (Aran ve Temel, 2004)

Sıcaklık°C	-78	-161	-196
Çekme Mukavemeti (MPa)	1100	1450	1600
0,2 % Ezilme Mukavemeti (MPa)	300	380	400
Charpy Darbe Mukavemeti (J)	180	160	155

Tablo 3.8. 304 çeliğinin bazı çözeltilere karşı korozyon dayanımı (ASKZN, 2011)

Sıcaklık °C	20	80
Konsantrasyon (kütlece %)	10 20 40 60 80 100	10 20 40 60 80 100
Sülfürik Asit	2 2 2 2 1 0	2 2 2 2 2 2
Nitrik asit	0 0 0 0 2 0	0 0 0 0 1 2
Fosforik Asit	0 0 0 0 0 2	0 0 0 0 1 2
Formik asit	0 0 0 0 0 0	0 1 2 2 1 0

Değerler: 0=dayanıklı - korozyon oranı 100 µm/yıl dan az

1=kısmen dayanıklı - korozyon oranı 100 µm/yıl ile 1000 µm/yıl arasında

2=dayanıklı değil- korozyon oranı 1000 µm/yıl dan fazla

Sıcaklık mukavemeti: 304 çeliği, aralıklı hizmet altında 870 °C ye kadar, sürekli hizmette ise 925 °C ye kadar iyi bir oksidasyon direncine sahiptir. Ancak malzemenin bu aralığın altında ve üstünde değişen sıcaklıklarda iyi randıman vermediği bildirilmiştir (Aran ve Temel, 2004).

Sıcak işleme: 304 çelik malzeme kolayca dövülebilir, 1150 ila 1250 °C arasında yekpare ısıtılarak sıcak şekillendirilebilir. Devirme ve dövme işlemleri 930 ila 980 °C arasında bitirilmelidir. Dövme işlemi hava ile soğutulmalıdır. Bütün sıcak işleme çalışmalarını su verme işlemi takip etmelidir.

Soğuk işleme: 304 sınıfı son derece sağlam ve işlenebilir olduğundan kolayca baskı yapılabilir, derin çizilebilir ve dövülebilir. Şiddetli soğuk işleme operasyonlarını su verme işlemi takip etmelidir.

Tezgahta işleme: Bütün östenitli çelikler gibi 304 çeliği de sağlam ve güçlü bir tezgahla işlenebilir. Sırlanmayı önlemek için sabit şekilde desteklenmiş, derin kesikli aletler kullanılmalıdır. Devirli işlemlerde 12 - 18 devir/dakika (rpm) kullanılmalıdır.

Kaynaklama: 304 sınıfı paslanmaz çelik alaşımı iyi kaynaklanabilme özelliklerine sahiptir ve hemen tüm kaynak yöntemlerine izin verir.

Yüksek sıcaklık içeren tüm işlemler (yani termal işleme ve kaynaklama) etkilenen bölgeler üzerinde dekapaj ve pasifleştirme işlemi ile izlenerek tam korozyon direnci eski haline getirilmelidir. Mekanik işleme (tezgâh ve taşlama) ile yaratılan taze yüzeyler azami korozyon direnci için pasifleştirilmelidir.

3.1.6. Kullanılan çelik profiller

Penetrometrenin tüm metal parçaları 304 paslanmaz çeliğinden üretilmiştir. Penetrometrenin iç cidarında, önce dış çapı 42 mm ve cidar kalınlığı 2,4 mm olan boru profil, sürtünme ceketlerinde ise dış çapı 50 mm ve 70 mm borular kullanılmıştır. Araştırma süresince, sürtünme ceketleri için 0,8 mm, 1,0 mm, 1,2 mm ve 1,5 mm et kalınlıklarında borular kullanılmıştır.

İlk üretilen penetrometrenin sürtünme ceketlerinde 1,5 mm et kalınlığında borular kullanılmıştır. İlk arazi denemesinde (Good Year bahçesinde, yumuşak kil zeminde) hassaslığın yetersiz olduğu görülmüştür ve hassaslığın artırılması için boruların et kalınlığı tornada inceltilerek (talaş kaldırılarak) 0,8 mm ye düşürülmüştür.

0,8 mm et kalınlığında sürtünme ceketiyile de istenilen hassaslık elde edilememiş ve sürtünme ceketinde yarıklar açılmıştır. Yarıklı sürtünme ceketiyile yapılan arazi denemesinde (Karacasu Jandarma Komutanlığı bahçesinde, orta sıkı kum zeminde) sürtünme ceketlerinin yetersiz kaldığı ve sıkı zeminde deforme olduğu görülmüştür. Sürtünme ceketlerinde oluşan sürtünme kuvvetinin artması ve ölçümün daha kaliteli olmasını sağlamak amacıyla ceketler pürüzlendirilmiştir. Sürtünme ceketlerinin, pürüzlendirildikten sonra 1,0 mm et kalınlığına sahip olması için 1,2 mm et kalınlıklı borular kullanılmıştır ve tornada 1,0 mm et kalınlığı kalacak şekilde pürüzlendirilmiştir. Penetrometrenin bağlantı (konnektör) bölümleri ve ucu 70 mm çapında 304 paslanmaz çelik kütükten üretilmiştir.

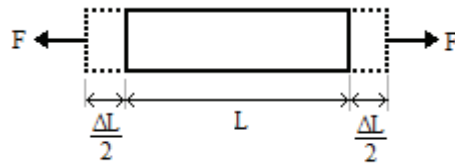
3.2. Strain Gauge (Gerinim Pulu)

Strain gauge (gerinim pulu) mekanik, denizcilik, havacılık ve inşaat mühendisliği uygulamalarında fiziksel kuvvetlerin ölçümünde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu malzemeler kullanılarak, yapı elemanında kuvvet ya da basınç yükleri etkisiyle oluşan mekanik gerilmeden kaynaklanan şekil değişikliğinin derecesi ve bu şekil değişikliğinin, malzemede karşılık geldiği gerilme düzeyinin hesaplanmasında kullanılabilir. Birim şekil değiştirmeyi mekanik ve elektriksel olarak ölçmenin bir kaç yolu vardır. Strain gauge ile ölçmek, kolaylığı ve sağladığı verilerin kalitesinin yüksekliğinden dolayı en çok tercih edilen yöntemdir. Bu yüzden zeminden gelen etkilerin penetrometrede oluşturduğu şekil değiştirmelerin ölçülmesi için strain gauge ile ölçüm tekniği kullanılmıştır.

Çekme ya da basınç kuvveti etkisinde kalan bir malzemenin iç kesitlerinde oluşan gerilmeler, şekil değiştirmelere neden olur. Eksenel çekmeye maruz, L uzunluğundaki bir çubukta ΔL kadar boy uzaması oluşur (Şekil 3.4). Birim şekil değiştirme, (3.1) denkleminde verildiği gibi, eleman boy uzaması miktarının (ΔL), boyuna (L) oranı kadar oluşur.

$$\varepsilon = \Delta L / L \quad (3.1)$$

Uygulanan yük etkisiyle şekil değişikliği oluşan bir malzeme üzerine iyice yapıştırılan parçacıklarda da aynı birim şekil değiştirme oluşmaktadır. Tek doğrultuda şekil değişikliğine uğrayan iletken çubuklarda, birim boy değişimiyle (uzama ya da kısalma) orantılı olarak elektriksel direnç değişimi (artma ya da azalma) oluşmaktadır.



Şekil 3.4. Eksenel çekmeye maruz çubukta boy uzaması

Bu prensipten faydalanılarak, üzerine yapıştırıldığı elemanın tek doğrultuda birim şekil değiştirmesini (uzama ya da kısalma), boyunda oluşan birim şekil değişimi nedeniyle elektriksel direncinde oluşan farkdan, dolaylı olarak ölçmeye yarayan, strain gauge keşfedilmiştir.

Strain gaugeler çok farklı amaçlar için kullanılabilir, fakat kullanım sınırlarını belirleyen limitleri vardır. Her strain gauge için birim şekil değiştirme, kullanım sıcaklığı, uygun malzeme, ölçüm hassaslığı vb. gibi kullanım sınırları bulunmaktadır. Strain gauge, elektriksel izolasyonu tam olarak sağlayan bir koruyucu malzeme içine yerleştirilmiş direnç tellerinden ibarettir. Strain gauge yapıştırılmış bir elemanda yük etkisiyle oluşan birim şekil değiştirmeler strain gauge içindeki direnç tellerinde de aynı oranda boy değişimine ve dolayısıyla telleri elektriksel direncinde değişime neden olmaktadır. Bu değişim (3.2) denkleminle belirlenebilir;

$$\varepsilon K = \Delta R / R \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte;

ε – Birim şekil değiştirme

R – Strain gauge direnci

ΔR – Strain gauge direncindeki değişim

K – Gauge faktörü (üretici tarafından verilmektedir)

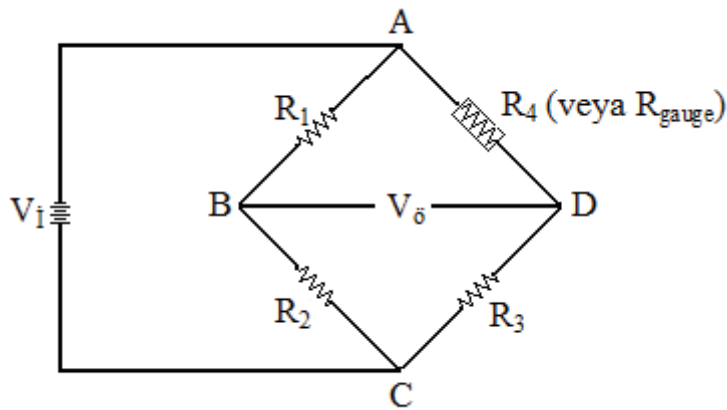
Bu eşitlikte, strain gaugein elektriksel direnci ve gauge faktörü bilinmektedir. Birim deformasyon oluşması durumunda, strain gaugedeki elektriksel direnç değişiminin ölçülmesi durumunda birim şekil değiştirme (ε), (3.2) denkleminde hesaplanabilir. Birim şekil değiştirme ise, strain gaugenin yapıştırıldığı elemana ait gerilme - birim şekil değiştirme grafiğinin elastik bölgesinde elemana uygulanan yükle doğru orantılıdır. Birim şekil değiştirmesi belirlenen malzemenin, gerilme değeri de belirlenebilir. Gerilme (σ) ve kesit alanı (S) değerleri, (3.3) denkleminde yerine konularak elemana uygulanan kuvvet belirlenebilir.

$$\sigma = F / S \quad (3.3)$$

Şekil değişimi oluşan strain gaugede oluşacak elektriksel direnç değişimi, strain gauge direncine göre çok küçük değerlerde olduğu için strain gauge direncini ölçmek için seçilen boyut ve hassaslık ayarlarıyla yeterli hassaslık ve doğrulukta ölçülememektedir. Elektriksel direncine göre çok küçük değerlerde oluşan elektriksel direnç değişimlerini (ΔR) ölçmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Strain gaugelerde oluşan elektriksel direnç değişimlerini ölçmek için kullanılan en yaygın yöntem, Wheatstone Köprüsü denilen bir elektronik devre kurularak elektriksel direnç değişiminin ölçüldüğü yöntemdir. Wheatstone Köprüsünde dört adet direnç Şekil 3.5’de ki gibi bağlanmıştır.

Eğer köprü A ve C noktalarından bir ikaz gerilimi (V_i) ile beslenirse B ve D noktalarındaki gerilim farkı, ayrı ayrı her iki kolda bağlanılan dirençlerin elektriksel direnç toplamlarının farkı ile orantılı olacaktır. Devrenin kolları arasında elektriksel direnç farkı olmaması durumunda ($R_1=R_4$ ve $R_2=R_3$) B ile D noktaları arasında bir gerilim farkı oluşmayacaktır. Devrenin kollarından herhangi birinin elektriksel dirençleri toplamının, diğer kolun elektriksel dirençleri toplamından farklı olması durumunda B ile D noktaları arasında bir gerilim farkı oluşacaktır. Wheatstone köprüsünde A - C arasına ikaz gerilimi (V_i) uygulanması durumunda B - D arasında ölçülecek çıkış gerilimi (V_o), (3.4) formülü ile hesaplanabilir.

$$V_o = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_i \quad (3.4)$$



Şekil 3.5. Wheatstone köprüsü devresi

Strain gauge ile birim şekil değiştirme ölçümü yapmak amacıyla Wheatstone köprüsü kurulması durumunda, dirençlerden biri, ikisi ya da dördü de strain gauge olarak tasarlanabilmektedir. Wheatstone köprüsü devresinde, dirençlerden birinin birim şekil değiştirmeye maruz aktif strain gauge olması ve devrenin diğer üç direncinin ölçüm ünitesinde tamamlanması durumunda bu tip devreye çeyrek köprü denilmektedir. Eğer iki strain gauge kullanılarak devre oluşturulmuşsa bu devre tipine, yarım köprü denilmektedir. Devre tamamen strain gaugelerden oluşuyorsa bu tip devreye, tam köprü denilmektedir. Wheatstone Köprüsü devresinin çeyrek, yarım ya da tam köprü şeklinde teşkil edilmesinin avantajları, sınırlamaları, köprü faktörü ve kullanım alanları Tablo 3.9’da verilmektedir.

Tasarlanan penetrometrede sıcaklık değişimlerinden etkilenmemek ve ölçümlerde yüksek hassaslık elde edebilmek için yarım Wheatstone Köprü devresi kullanılmıştır. Bu tip köprü devresinde, strain gaugelerin ikisi yapı elemanının üzerinde diğer iki direnç (bu iki direnç de strain gauge olarak kullanılabilir) ölçüm ünitesi içinde ya da yanında konumlandırılmıştır. Eleman üzerindeki strain gaugelerden biri, elemana yapıştırılarak aktif çalışması sağlanırken diğeri serbest bırakılarak manken davranması sağlanmıştır. Bu şekilde devrenin kolları arasında sıcaklık farkından bir direnç değişiminin oluşması önlenmektedir. Bu şekilde hazırlanan devrede sıcaklık düzeltilmesi yapılmasına gerek kalmamaktadır (Dunnicliff, 1998).

Bu çalışmada tasarlanarak üretilen penetrometrede, TML Marka, FLA-6-11 ve FLA-10-11 tipi 120Ω elektriksel dirençli strain gaugeler kullanılmıştır. Bu tip simgesinde, “F” genel amaçlı kullanımı, “LA” tekil olduğunu, “6 veya 10” uzunluğun 6 mm veya 10 mm (genişlikler 2 mm) olduğunu ve “11” metallerde kullanılmaya uygun olduğunu ifade etmektedir. Simgede; strain gauge standart elektriksel dirence sahip olduğunda (120 ohm) direnç değeri simgesine ve normal tip olduğunda tip simgesine yer verilmemektedir.

Yapıştırma işleminde kolaylık ve işlevinde kalite sağlayabilmek amacıyla boru profillerin çevresi doğrultusunda 6 mm strain gaugeler ve boruların boyları doğrultusunda ise 10 mm strain gaugeler kullanılmıştır.

Tablo 3.9. Wheatstone köprüsü devre çeşitleri (Dunnicliff, 1998)

Köprü Tipi	Avantajları	Sınırlamaları	Köprü Faktörü	Kullanım Alanı
Çeyrek Köprü (İki kablolu sistem)	En ucuz Kullanımı en kolay	Sıcaklık değişimine duyarlı, yüksek şekil değiştirmelerde doğrusal değil	1.0	Laboratuvarda kullanılır, zemin uygulamalarında kullanılamaz
Çeyrek Köprü (Üç kablolu sistem)	Lehim hatalarını iyi tolere eder	Sıcaklık değişimine duyarlı, yüksek şekil değiştirmelerde doğrusal değil	1.0	Yapıda gerilme analizlerinde en yaygın uygulama
Yarım Köprü (Biri sağır)	Sıcaklık değişiminden etkilenmez	Sağır gauge yapıştırılmaz ve aynı malzemeye tutturulur	1.0	Yüksek sıcaklık olan ve yüksek hassaslık istenen işlerde
Yarım Köprü (İkisi de aktif ve birbirine 90 ⁰ açıyla yapıştırılır)	Sıcaklık değişiminden etkilenmez	İki eksenli gerilmelerde kullanışlı değildir	1.3	Uzun kolonlarda yada kirişlerde tek eksenli gerilme ölçmede kullanışlı
Yarım Köprü (Eşit ve ters gerilmeye ikiside aktif)	Sıcaklık değişiminden etkilenmez	Köprü devresi kurmak her zaman mümkün değil	2.0	Eğilmeye çalışan kirişlerde ve yük hücrelerinde
Tam Köprü (Sağır gaugeli)	Sıcaklık değişiminden etkilenmez	Pahalı	2.0	Seyrek kullanılır
Tam Köprü (Tümü aktif ve iki birbirine 90 ⁰ açıyla yapıştırılır)	Sıcaklık değişiminden etkilenmez	Pahalı, İki eksenli gerilme alanlarında kullanılmaz	2.4	Mafsallarda, basınç kolonlarında örneğin yük hücrelerinde kullanılır
Tam Köprü (İkisi basıç, ikisi çekmede eşit gerilmeye maruz)	Sıcaklık değişiminden etkilenmez	Pahalı	4.0	Eğilmeye çalışan kirişlerde

3.2.1. Strain gauge uygulamada kullanılan alet ve malzemeler

Strain gaugelerin hazırlanması, yapıştırılması ve kontroller için; 16 Watt gücünde ve ince uçlu havya, üzerinde strain gauge kablo bağlantılarını yapmak için cam levha, 0,6 mm ve 1,0 mm çaplarında lehim telleri, lehim pastası, kablo ucu açmak için küçük pense, kablo kesmek için küçük yan keski, farklı derecelerde büyüteç takımı, 0,1 Ω hassasiyetle direnç ölçebilen dijital avometre, biri eğri ağızlı iki farklı cımbız, 60, 180 ve 240 numara kağıt zımpara, silinmez işaretleme kalem, kurşun kalem, boruların içine strain gaugeleri iyi konumlandırma bilmek için dişçi aynası, genel amaçlı ve orta viskoziteli cyanoacrylate hızlı yapıştırıcı, makas, yapıştırılan strain gauge üzerine bastırmak için teflon kağıtlar, köprü tamamlama kablosuna bağlantıda ve sıfırlama trimpodu ayarında küçük tornavida ve yüzey temizliği için aseton kullanılmıştır.

3.2.2. Bağlantı terminalleri

Strain gaugelerin kablolarına bağlantısı bağlantı terminalleri ile yapılmıştır. Bağlantı terminalleri, çok nazik yapıda olan strain gaugelerin ve bağlantı tellerinin, yapıştırıldıktan sonra, kabloların hareketinden etkilenerek zarar görmemeleri için gerekli olmaktadır. Bu araştırmada TML marka, TF-2SS model ve 5 mm x 4 mm x 0,2 mm boyutlarında bağlantı terminalleri kullanılmıştır.

3.2.3. Bağlantı kabloları

Strain gauge ve veri toplama sisteminin üretici firmaları, bağlantılarda en az 0,2 mm² kesit alanlı, çok çekirdekli ve flambajlı kablolar önermektedir.

Çekirdek alanının 0,2 mm den küçük olması, özellikle uzun mesafelerde sorun (direnç artışı) oluşturmakta ve kablonun hareketi yada dış ortamdaki etkilerden (mağnetik alan) dolayı veri transferinin kalitesini düşürmektedir.

Çok çekirdekli olması kablonun hem daha esnek (fleks) olmasını sağlamakta ve kolayca çatlayarak kırılmasını önlemektedir. Tek çekirdekli kablolar, fazla

eğildiğinde veya büküldüğünde sorun çıkarmakta ve kolayca çatlayarak kırılmaktadır. Daha da olumsuz bir durum olarak; çatladığı veya çekirdek kırıldığı halde anlaşılammakta ve hareket ettikçe az bir akım ileterek direnç değişimlerine neden olmaktadır. Tespit edilemeyen kablo hataları, Wheatstone köprüsü kurarak strain gauge ile ölçüm yapılan sistemlerde çok ciddi, can sıkıcı ve çoğunlukla tespit edilmesi çok zor sorulara neden olmaktadır. Bu çalışmada birim boy direnci düşük olduğundan veri iletimi iyi olacağı için, ilk olarak CAT5 internet kablosu kullanılmıştır ve söz edilen sorunlar yaşanmıştır.

Flambaj ise veri aktarımında kablonun dış kaynaklı parazitlerden korunması için zorunlu olarak bulunması gereken bir özelliktir. Flambaj tellerinin bir ucunun penetrometrenin gövdesi, diğer ucunun ise veri toplama sisteminin şasesine bağlanması gerekmektedir.

Penetrometre iç kısmında strain gaugeler ikişerli kablolarla ilerletilerek, çıkmadan önce 24 damarlı tek kabloyla dışarıya çıkarılmıştır. Toplamda 18 damar kullanılmıştır, diğer damarlar hatalar için yedekte tutulmuştur. Çalışma da yaşanan iki farklı kablo hatasında yedek damarlardan ikisi kullanılarak hata giderilmiştir.

3.3. Veri Toplama Sistemi

Strain gauge ile ölçüm yaparken Wheatstone köprüsü devresinde direnç değişiminden kaynaklanan elektriksel gerilim farkı çok küçük değerlerde oluşmaktadır. Bu küçük elektriksel gerilim farklarının ölçülebilmesi için hassas ölçü aletlerine gerek duyulmaktadır. Deneylerde çok sayıda verinin aynı anda ve sürekli olarak alınması gerekmiştir. Farklı kaynaktan alınan, çok sayıda verinin aynı anda ve sürekli toplanmasına ve çeşitli kazanım değerlerinde ayarlanarak hassas olarak ölçüm yapılmasına imkân sağlayan “veri toplama sistemi” kullanılmıştır.

3.3.1. TESTBOX1001 veri toplama sistemi

Deneylerde Teknik Destek Grubu marka, TESTBOX1001 model, veri toplama sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. TESTBOX1001 veri toplama sistemi (Teknik Destek Grubu, 2011)

TESTBOX1001, temel olarak masa üstü volt ölçüm cihazıdır. TESTBOX1001 veri toplama sistemi, ek bir elektronik donanıma ihtiyaç duymadan sensörlerden kolayca ölçüm yapmayı sağlamak üzere tasarlanmıştır. TESTBOX1001 veri toplama sistemi ile değerleri zamana göre çok hızlı değişmeyen (statik) sensörlerin çıkış gerilimleri ölçülerek bilgisayara aktarmak mümkün olmaktadır (Teknik Destek Grubu, 2011).

TESTBOX1001 veri toplama sistemi, üzerine bağlanan sensörlerden yaptığı ölçümleri, aygıt geçidi yardımı ile USB portu üzerinden bilgisayara aktarmaktadır. Bilgisayarda, USB port üzerinden gelen veriler, TESTLAB Basic Veri Toplama Yazılımı yardımıyla gerçek zamanlı olarak kaydedilmiştir. Yapılan veri toplama işinde tek bir TESTBOX1001 veri toplama sisteminin kanal sayısının yetmediği durumlarda en fazla 8 adet olacak şekilde TESTBOX1001 veri toplama sistemleri seri şekilde bağlanabilmektedir (Teknik Destek Grubu, 2011).

3.3.1.1. TESTBOX1001 veri toplama sistemi teknik özellikleri

TESTBOX1001 veri toplama sistemi çoğu araştırma için ideal ve pratik çözüm niteliğinde bir veri toplama sistemidir.

TESTBOX1001 veri toplama sisteminin temel fonksiyonu, sensörlerden gelen, yavaş değişen (statik/yarı-statik) sinyallerin dijital veriye çevrilerek bilgisayar ortamına aktarılmasıdır. Tümüleşik sinyal işleme ünitesi sayesinde aşağıda listelenmiş çok

sayıda sensor türü ile hiç bir ek parçaya ihtiyaç duymadan ölçüm alınabilir (Teknik Destek Grubu, 2011).

USB bağlantı ve artırılabilir kanal kayısı: TESTBOX BRIDGE ürünü ile cihazları tek USB girişi üzerinden 8 kanaldan 64 kanala kadar bilgisayara bağlayarak kullanmak mümkündür. Ek USB girişlerinden 8-64 kanallık gruplar halinde eklemeler yapılarak da kanal sayısı arttırılabilir. Böylelikle veri toplama hızı ve diğer parametrelerde değişiklik olmadan toplamda 64 kanala kadar aynı anda ölçüm alınabilir. Sistem kanal sayısı artışına ve genişlemeye uygundur (Teknik Destek Grubu, 2011).

TEKNİK DESTEK GRUBU veri toplama sistemleri'nin en önemli özelliklerinden bir tanesi de deneye hazır tasarımlarıdır. Bunun için cihazlara uygun yazılımlar sunulmuştur. TESTBOX1001 veri toplama sistemi, Windows XP, Windows 7 işletim sistemleri üzerinde çalışabilen TESTLAB - Basic yazılımı ile kullanılabilir. Ayrıca farklı deney türleri için daha özel amaçlı yazılım paketleri de oluşturulabilmekte, kullanıcılara kendi yazılımlarını oluşturmaları amacıyla gerekli sürücü ve iletişim protokolleri de sağlanmaktadır (Teknik Destek Grubu, 2011).

Doğrudan sensör bağlantısı: TESTBOX1001 veri toplama sistemi, bütünleşik olarak sunduğu sinyal işleme devreleri ile en düşük gürültü oranını ve en yüksek ölçüm performansını vermektedir (Teknik Destek Grubu, 2011).

Analog sinyal işleme ve filtreleme: Her bir kanal kendi içinde yüksek doğrulukta ve düşük gürültülü analog sinyal işleme birimi ve filtreleme sahiptir (Teknik Destek Grubu, 2011).

16 bit ölçüm çözünürlüğü: Kullanılan yüksek performanslı analog/dijital çevirici sayesinde +/- 10 V giriş bölgesinde 1 / 65536 adım çözünürlükte ve 0,000305 Voltluk değişim adımlarıyla veri alınabilmektedir (Teknik Destek Grubu, 2011).

Kanal başına saniyede 8 örnek bağımsız veri toplama hızı: Kanal sayısından bağımsız olarak her kanal 125 msn (milisaniye) de birden, saatte 1'e kadar

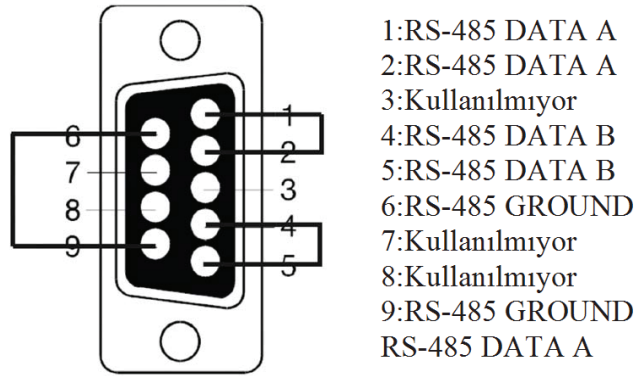
değiştirilebilen veri toplama hızında veri toplayabilmektedir (Teknik Destek Grubu, 2011).

Elektriksel izolasyon ve sigortalar: Haberleşme birimleri sürekli olarak dışarıdan gelebilecek yüksek gerilime karşı korunmaktadır. Cihazın güç kaynağı ani güç kesintilerine ve kısa devreye karşı sigorta sistemiyle korunmaktadır. Kanallar arası elektriksel izolasyon mevcuttur. Her kanal girişi ve ikaz gerilimi kısa devre ve yüksek güç çekilmesine karşı 300 mA polifuse sigorta sistemi ile korunmaktadır. Beklenmedik durumlarda sigorta devreye girerek sistemi koruma altına alır. Sistem soğutulduğunda eski haline döner (Teknik Destek Grubu, 2011).

Kanal sayısını artırma: Sensörler ile veri toplama donanımı arasındaki mesafenin uzaması gürültü ve ölçüm kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Birden fazla TESTBOX1001 veri toplama sistemi cihazının bir arada ya da belli bir alana dağıtılarak kullanılması mümkündür. Laboratuvarlardaki ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak tasarlanmış bu kullanım esnekliği sayesinde, ihtiyaç duyan kullanıcılar TESTBOX1001 veri toplama sisteminden sensörlere giden analog kablo boyunu ve karmaşasını en aza indirebilirler. Böyle bir ihtiyaç yok ise cihazlar masaüstünde bir araya toplanarak 64 kanala kadar birlikte de kullanılabilir (Teknik Destek Grubu, 2011).

3.3.1.2. TESTBOX1001 veri toplama sisteminin bölümleri

RS485 haberleşme konektörü: 9 pinli DSUB9 erkek tipinde iki adet konektör vardır (Şekil 3.7). Birden fazla TESTBOX1001 veri toplama sistemini zincir şeklinde, hatta bağlamak için, elektriksel olarak birbiriyle özdeş, bu konektörden iki tandir. Bağlantıda biri giriş diğeri çıkış olarak kullanılır (Teknik Destek Grubu, 2011).

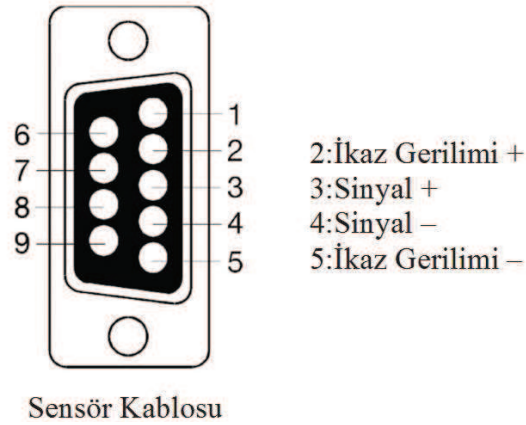


Şekil 3.7. RS-485 haberleşme konektörü bağlantı şeması

Adres değiştirme düğmesi: TESTBOX1001 veri toplama sisteminin çalışabilmesi için bir adrese sahip olması gerekmektedir. Adreslerin diğer TESTBOX1001 veri toplama sistemleri ile aynı olmaması için butona basarak değiştirilebilmektedir. Değiştirilen adresler cihaz tarafından hafızasına alınacaktır böylelikle bu işlem sadece gerek duyulduğunda yapılabilir. Bir ağ içerisinde bu adresler kesinlikle 1'den başlamalı ve ardışık olarak devam etmelidir. Ağ içerisinde iki şasenin aynı adrese sahip olması kesinlikle istenmeyen bir durumdur; çünkü böyle bir durum sistemin fiziksel olarak hasar görmesiyle sonuçlanabilir. Gerekli olduğunda her şasenin adresi, adres seçim butonundan ayarlanabilir (Teknik Destek Grubu, 2011).

Adres görüntüleme ekranı: Adres değiştirme butonu ile değiştirilen adresler görüntülenir. TESTBOX1001 veri toplama sistemine ilk elektrik verildiğinde sırayla seri numarası ve ardından kanalın ayarlanan en son adresi görüntülenir. Ekranın sağ alt köşesindeki led ise haberleşme anında yanıp sönmektedir. Adres değiştirme düğmesine basıldıkça ekrandaki adres ardışık olarak 1 den 8'e kadar değişecektir. İstenilen adrese gelindiğinde o adreste bırakılması yeterlidir (Teknik Destek Grubu, 2011).

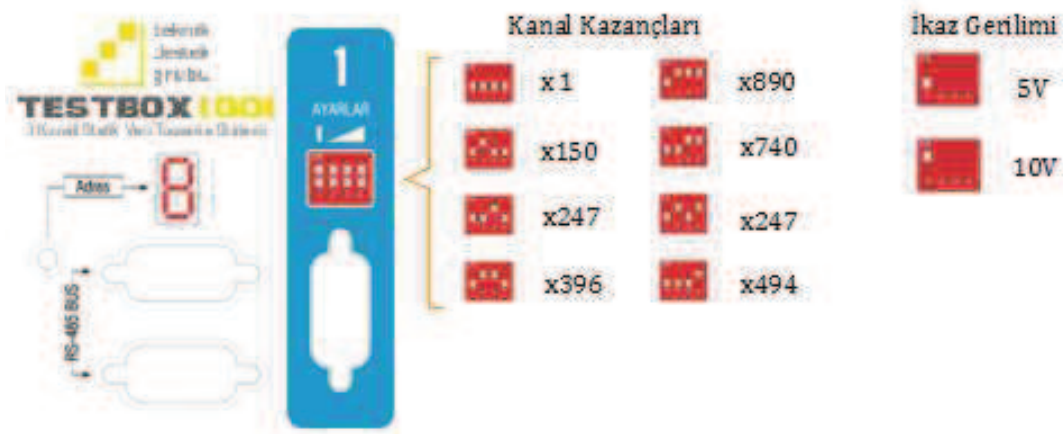
Sensör bağlantı konektörü: TESTBOX1001 veri toplama sistemlerine sensör bağlantıları bu konektör yardımı ile yapılmaktadır. Vidalı tipte olan bu sensör konektörü her türlü sensöre adapte edilebilmektedir (Şekil 3.8.). Sensör konektörü DSUB9 dişi biçimindedir (Teknik Destek Grubu, 2011).



Şekil 3.8. Sensör kablosu konnektörü bağlantı şeması

Kanal kazanç ve ikaz ayarları: TESTBOX1001 veri toplama sistemlerine bağlanan sensörlerden doğru ölçümler yapılabilmesi için o kanala ait bir takım ayarlar yapılması gerekmektedir. Ayarlanabilir değerler, anahtarlar yardımıyla ikaz gerilimi ve kanal kazancıdır. Şekil 3.9 da gösterilen kazanç değerleri (x1, x150, x247...) yaklaşık değerlerdir tam değerler için TESTBOX1001 veri toplama sistemi kalibrasyon sertifikasına bakılmalıdır.

Açma/kapama düğmesi: TESTBOX1001 veri toplama sistemine elektrik vermek için kullanılır. Bu anahtar kapatıldığında TESTBOX1001 veri toplama sistemlerinin elektrikle bağlantısı tamamen kesilir. Cihazın uzun süre kullanılmayacağı durumlarda sistemin kapatılması önerilmektedir (Teknik Destek Grubu, 2011).



Şekil 3.9. Kanal kazanç ve ikaz ayarları şeması

Güç kablosu girişi: TESTBOX1001 veri toplama sisteminin ihtiyaç duyduğu elektrik buradan uygulanır. Kullanılacak gerilimin, şebeke gerilimi olan 220V +/- %5 lik sınırlar dahilinde olması gerekmektedir (Teknik Destek Grubu, 2011).

3.3.2. TESTBOX-BRIDGE aygıt geçidi

TESTBOX-BRIDGE bir iletişim aparatıdır (Şekil 3.10). Aygıt geçidi niteliğinde olan TESTBOX-BRIDGE, bilgisayarın USB portu ile TESTBOX1001 veri toplama sistemi ve 1100 serisi cihazlar arasında bir köprü görevi görmektedir. TESTBOX-BRIDGE, TESTBOX1001 veri toplama sistemi ve 1100 model veri toplama sistemlerini RS485 bağlantı noktası üzerinden bilgisayara bağlamak üzere tasarlanmıştır. Bu serideki veri toplama sistemi cihazları, 8 ayrı şaseye kadar RS485 kablosu ile birbirine bağlanmakta ve daha sonra bir adet TESTBOX-BRIDGE aygıt geçidi ile USB üzerinden verilerini bilgisayara transfer etmektedir (Teknik Destek Grubu, 2011).

3.3.3. TESTBOX-QCABLE devre tamamlama kablosu

TESTBOX-QCABLE, Teknik Destek Grubu tarafından geliştirilmiş ve çok yaygın olarak kullanılan inovatif bir "wheatstone" köprü tamamlama kablosudur (Şekil 3.11).



Şekil 3.10. TESTBOX-BRIDGE aygıt geçidi



Şekil 3.11. TESTBOX-QCABLE devre tamamlama kablosu (Teknik Destek Grubu, 2011)

İnşaat, makine, malzeme, maden ve diğer mühendislik dallarında sıklıkla kullanılan gerinim pullarının (strain-gauge), çeyrek ya da yarım köprü konfigrasyonunda ölçüm yapılması gerektiğinde wheatstone köprüsünün dışarıdan yüksek doğrulukta dirençler ile tamamlanması gerektiğinden, geliştirilmiş pek çok veri toplama cihazı bu sinyal işleme özelliğini kendi içinde barındırmaktadır (Teknik Destek Grubu, 2011).

3.4. TESTLAB Basic Yazılımı

TESTLAB Basic, Teknik Destek Grubu tarafından hazırlanmış, genel amaçlı bir veri toplama yazılımıdır. Statik ve yarı statik olarak tanımlanabilecek testlerde veri toplama, veri kaydı, anlık veri görüntüleme, grafik oluşturma vb. temel işlevlerin basit ve akıcı bir ara yüzle gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Test öncesinde, sensör tipine özel kalibrasyon olanaklarıyla, hesaba gerek kalmadan, kalibrasyon yapma imkanı tanımaktadır. TESTLAB Basic yazılımı aşağıdaki özelliklere sahiptir (Teknik Destek Grubu, 2011);

- Kanallar arası matematiksel işlemler oluşturarak genişletilmiş kanal ekleyebilme
- Çok noktalı kalibrasyon, $Ax+B$ doğrusallaştırması veya sertifika bilgileri girilerek kalibrasyon yapabilme
- Yük hücreleri ve gerinim pullarını sadece sertifika bilgileri girerek kalibre edebilme
- mV çıkışlı algılayıcıların kalibrasyonunda girilen değerlere göre otomatik kanal kazancı hesaplama
- Kanallara ait ham verilerin ve yapılan kalibrasyona göre kalibreli verilerin anında görüntülenebildiği test paneli

- Zamana bağı grafiklerde, zaman ekseninin boyunu, dinamik olarak değiştirebilme
- Oluşturulan kalibrasyonlar ve testleri, veritabanından dışarı verme ve içeri alma yöntemiyle kolayca diğer bilgisayarlara taşıyabilme (import-export)
- Çoklu kanal sıfırlama
- Aynı bilgisayar üzerinde çalışan bir yazılımdan ortak hafıza paylaşımı ile veri alabilme (sanal kanal) özelliği
- Türkçe ve İngilizce dil seçeneği
- Çizdirilen grafiği istenildiği anda bilgisayara bmp dosyası olarak kaydedebilme
- TESTBOX-1000 serisi cihazlarla uyumluluk
- Bir TESTBOX Bridge üzerinden 64 kanala kadar haberleşebilme imkânı
- Kanal başı 8 örnek/saniye hızında veri toplama hızı
- Kanal başı 8 örnek/saniye'den 1 örnek/saat'e kadar ayarlanabilen ve dinamik olarak değiştirilebilen kayıt aralığı
- Veri kaydını durdurmaya gerek kalmadan o ana kadar toplanan verileri csv (virgülle ayrılmış değerler Microsoft Excel v.b. programlarda doğrudan açılabilir) formatında kaydedebilme
- Program kapanıp yeniden açıldıktan sonra dahi aktarılmamış verileri aktarabilme
- Kanal okumalarını kanal adı, okunan değer ve birim şeklinde, yeniden boyutlandırılabilir göstergelerde görüntüleme
- Kanal değerinin yanı sıra kanal değişim değeri ve kanal değişim oranını da görüntüleyebilme

TESTLAB Basic yazılımının kullanım alanları: TESTLAB Basic, TESTBOX 1000 serisi cihazlar ile birlikte, pek çok mühendislik dalında, izlenen verilerin çok hızlı değişmediği (statik, yarı-statik) akademik testlerde kullanılmaktadır. Özellikle İnşaat Mühendisliği, Yapı Mekaniği, Zemin Mekaniği, Makine Mühendisliği, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, Maden Mühendisliği, Kaya Mekaniği, Jeoloji Mühendisliği testlerinde ve benzer testler yapan fabrika, enstitü veya etüt laboratuvarlarında kullanılmaktadır (Teknik Destek Grubu, 2011).

3.5. Penetrometrenin Tasarımı

Ülkemizde zemin etüdü sırasında numune alınması yönetmeliklerin zorunlu tuttuğu bir işlemdir. “Bina ve Bina Türü Yapılar için Zemin ve Temel Etüdü Raporu Genel Formatı”, hem “Gözlemsel Zemin Etüdü Raporunda” hem de “Sondaja Dayalı Zemin ve Temel Etüdü Raporunda” numune alınarak laboratuvarında deneye tabi tutulmasını talimatlandırmaktadır (Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2005).

Bina ve Bina Türü Yapılar için Zemin ve Temel Etüdü Raporu Genel Formatında, sondaja dayalı zemin etüdü çalışmalarında arazi deneylerinden en az birinin yapılması zorunlu tutulmaktadır. Ülkemizde çok yaygın olması ve çoğu zemin etüdü yapan şirkette başka arazi deney ekipmanı olmaması nedeniyle sondaja dayalı zemin etütlerinde SPT deneyleri yapılmaktadır. Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) deneyinin TS-5744'e göre yapılması gerekmekte olup, deney sonuçlarının (darbe sayılarının) gerekli bütün düzeltme faktörlerine (şahmerdan tipi ve şahmerdan bırakma mekanizması, kedi başı sarım sayısı, yer altı suyu, enerji, kuyu çapı, iç tüp kullanılıp kullanılmadığı, tij uzunluğu, tij tipi vb.) tabi tutularak düzeltilmesi gerekmektedir (Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2005).

SPT deneyinin kullanıcı hatalarından çok etkilenen bir deney olması ve birçok düzeltmeye ihtiyaç duyması nedeniyle elde edilen verilerin uzman kişilerce değerlendirilmesi gerekmektedir. Ülkemizde, arazi deneylerinin icrası konusunda eğitim veren kurum bulunmaması nedeniyle uzman personel (sondör) sıkıntısı yaşanmaktadır. Uzman personelin sınırlı olması, personel başına düşen iş miktarını artırmakta, bu iş artışı ise uzun ve yorucu sondaj işlerinin prosedüre uygun yapılmamasına yol açmaktadır. Bu olumsuz şartlarda, arazi özelliklerinin zemin etüt raporlarına doğru aktarılması konusunda ciddi sorunlarla karşılaşmaktadır. Sondaj kuyusundan hem numune alınması hem de SPT yapılması uzun süren ve yorucu bir iş olarak, veri toplama işinin sağlıklı bir şekilde yürütülmesini olumsuz etkilemektedir. Bu konuda, ülke şartlarını dikkate alan, yönetmelik şartlarını yerine getiren ve çalışanların işini kolaylaştıracak araştırma ve tasarımlara ihtiyaç bulunmaktadır. Bu ihtiyacı göz önünde bulundurarak, numune alma sırasında

zeminin özelliklerini belirlemeye yönelik olarak yapılan bu çalışmada bir penetrometre (zemin kaşığı) tasarlanmıştır. Hidrolik olarak zemine itildiği sırada, numune alırken, üzerine gelen zemin etkileriyle veri toplama sistemine (bilgisayara) elektronik sinyal şeklinde veri aktaran bir penetrometrenin tasarlanarak üretilmesi hedeflenmiştir.

Penetrometre, çift cidarlı ve alt yarısı SPT kaşığına benzer şekilde ($D=51\text{mm}$) tasarlanmıştır. Üst yarısı ise yine çift cidarlı fakat, dış çapı daha geniş ($D=70\text{ mm}$) tasarlanmıştır. Bu tasarımda penetrometre, hidrolik sistemle zemine itilirken uç direnci, daha geniş bölümde genişletme direnci ve her iki bölümde de dış çepere gelen sürtünme kuvveti ile çevre basıncını ölçecek şekilde projelendirilmiş ve imal edilmiştir.

3.5.1. Tasarımın teorik alt yapısı

İki cidarlı, SPT kaşığına benzer şekilde tasarlanan yeni penetrometrenin uç direncinden faydalanarak zeminin fiziksel parametrelerinin tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, iki farklı cidarda, iki farklı basınç altında, iki farklı sürtünme kuvveti oluşmasından faydalanılarak da c ve ϕ nin hesaplanması hedeflenmiştir.

Üzerinde çalışılması planlanan yöntem, çok iri tanecikler içermeyen tüm zeminlerde kullanılabilecektir. Özellikle, bozulmamış numune almanın zor olduğu kum, silt, kumlu ve siltli zeminlerde kabul göreceği düşünülmüştür. Hazırlanacak korelasyon formül ve abaklarla, hem SPT hem de CPT için hazırlanmış formül, değer ve tahminlerin de kullanılabilir olma ihtimali yanında numune alınmasına da olanak sağlaması cihazı ve çalışma prensibini etkili ve kullanışlı kılmıştır.

Çift cidarlı olarak hazırlanmış ve her iki cidarında ve iki doğrultuda gerilmelerin strain gaugelerle ölçüldüğü penetrometre, zemine yaklaşık sabit hızda ($1 - 3\text{ mm/sn}$) itilmiştir. Penetrometrenin zemine girmesi sırasında; ucun hemen arkasına yerleştirilen strain gaugeler ile iç cidara gelen aksenal kuvvetten, zeminin penetrometreye uyguladığı uç direnci ölçülmüştür. Sürtünme ceketlerine yerleştirilen strain gaugelerle de kesitlerde oluşan gerilmeler ölçülmüştür. Ölçülen gerilmelerden

penetrometrenin dıştan maruz olduğu sürtünme ve basınç kuvvetleri hesaplanmıştır. Sürtünme ceketini ortasında, cidara yatay olarak yerleştirilen starin gaugelerle penetrometre gövdesinin maruz olduğu çevre basıncı hesaplanmıştır. Yatayda çevre basıncı ve düşeyde bu çevre basıncı altında zeminle penetrometre arasında oluşan sürtünme gerilmesinin (sürtünme kuvvetlerinden hesaplanan) işaretlendiği grafikte, iki değer arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır.

3.5.2. Zemin-metal arasındaki etkileşim

Tasarlanan penetrometrenin, farklı iki çevre basıncı altında, penetrometreyle zemin ara yüzeyinde oluşacak kesme kuvvetinin ölçülmesi amaçlanmıştır. Zeminle farklı malzemeler arasında oluşan sürtünme hakkında (Potyondy, 1961) ve zeminle yapı malzemeleri arasında oluşan sürtünme hakkında (Bosscher ve Ortiz, 1987) çalışmalar yapmıştır. (Littleton, 1976) killi metal arasındaki sürtünmeyi araştırmıştır. Kohezyonlu zeminle metal arasındaki sürtünme başlıkları, (Tsubakihara vd., 1993) tarafından yapılan araştırma özeti şöyledir;

- 1) Farklı kum karışım oranları ile yapılan deneylerde maksimum sürtünme katsayıları arasında farklılıklar oluşmuştur. Maksimum sürtünme katsayıları, kaymadan sonra metalle yüksek kil oranına sahip zemin arasında oluşmuştur, fakat 15 mm lik yer değiştirmede kalıcı sürtünme katsayısı maksimumdan çok daha küçük oluşmuştur.
- 2) Metal pürüzlülüğünün kritik değeri, kayma yüzeyi oluşup oluşmadığının belli olmadığı sınır değeridir. Metal pürüzlülüğünün kritik değeri, kum oranı daha yüksek olan bir zeminde daha yüksek oluşmuştur.
- 3) Kum - kil karışımı ile 0,2 mm aralıkla 20-30 μm R_{max} lık pürüzlülüğü olan metal sürtünmesi için kayma yüzeyi ve zemin numunesindeki kayma deformasyonu eşzamanlı oluşmaktadır
- 4) Sürtünme davranışı üç çeşit yenilme şeklinde sınıflandırılmıştır. Şöyle ki; yüzeyde tam kayma, zemin içinde kesilme (kayma gerilmesine yenilme) ve yüzey kayması ile zeminde kesme deformasyonunun birlikte olduğu karışık davranış şeklinde olmuştur.

(Yoshimi ve Kishida, 1981) tarafından zeminlerle metal arasındaki sürtünme davranışının belirlenmesine yönelik yapılan araştırmada, normal konsolide Kawasaki killeri ile yumuşak çelik arasındaki sürtünme, iki tip doğrudan kesme tipi deney aletiyle (basit kesme tipi ve kesme kutusu) belirlenmiştir. Ara yüzeyde oluşan fazla boşluk suyu basıncı ölçülmüştür. Araştırmada şu şekilde sürtünme davranışı elde edilmiştir;

- 1) Yaklaşık 10 μm R_{max} ($L=0,2$ mm) olan bir kritik yüzey pürüzlülüğü belirlenmiştir. Çelik yüzeyi kritik değerden daha düz ise yüzeydeki kayma direncinde bir düşüş oluşmaktadır. Çelik yüzeyi kritik değerden daha pürüzlü ise kırılma yüzeyi malzeme içinde oluşmaktadır ve böylece maksimum kayma direnci kilin kayma direnci ile uyumlu olmaktadır.
- 2) Efektif gerilme şartlarında arayüzey kayma açısı kilin drenaj koşulları ve konsolidasyon basıncına bağlı olmamaktadır.
- 3) Yükleme hızı, pürüzsüz çelik yüzeyi durumunda az etkili olurken maksimum kayma direncine etkili olmaktadır ve 10 mm lik yer değiştirme sırasındaki kalıcı kayma direncine küçük etkisi olmaktadır.
- 4) Kesme kutusu için kırılma yüzeyinin kil numunenin içinde oluşması durumunda, kilin kayma direnci maksimum kayma direncinin üst sınırıyla uyum göstermemektedir. Bu kesme kutusundaki kil numunenin farklı şekil değişiklikleri için gereklidir.

Metal ve kuru kum arasındaki sürtünmenin belirlenmesine yönelik olarak (Uesugi vd., 1986) tarafından çalışma yapılmıştır. Kırılma yüzeyi davranışı, tek doğrultuda ve çift doğrultuda yükleme ile normal yükleme durumu için karşılaştırılmıştır. Tekrarlı yükler altında kum-metal ara yüzeyinde normal yüklemekten elde edilen sonuç değerlerine yakınsayan sürtünme katsayısı elde edildiği bildirilmiştir.

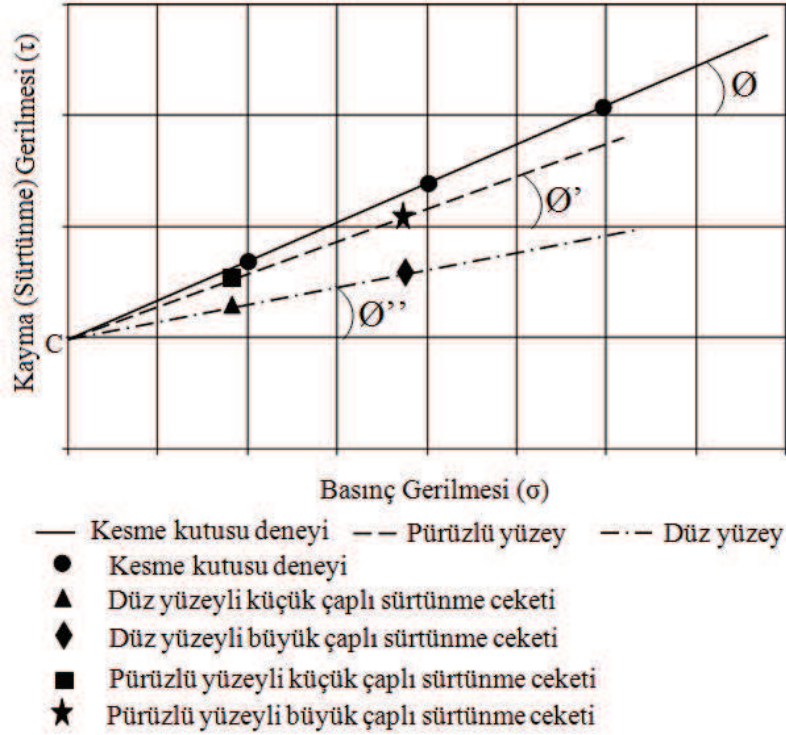
(Al-Mhaidib, 1995) tarafından, düz ve pürüzlü olmak üzere iki çeşit çelik kullanılarak kumun içsel sürtünme açısı ile kum-metal arası yüzeyde oluşan sürtünme açıları karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan düz yüzeyli metal $R_a = 1,06$ μm , pürüzlü yüzey metal $R_a = 33,4$ μm pürüzlülük değerlerine sahiptir. Bu çalışmada elde edilen sürtünme açısı değerleri ve oranlar Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10. Kum-metal arasında oluşan sürtünme açısı (Al-Mhaidib, 1995)

Kesme hızı mm/dak.	Düz Yüzey δ_s	Pürüzlü Yüzey δ_r	İçsel Sürtünme Açısı ϕ	δ_s / ϕ	δ_r / ϕ
0,0048	16	37	38,7	0,413	0,957
0,048	18,8	38,1	40,1	0,469	0,950
0,08	19,5	40	42,5	0,459	0,941
0,4	21,5	42,3	44,6	0,482	0,948
0,9	23,2	44,5	46,5	0,499	0,957
			Ortalama	0,464	0,951

Yukarıdaki çalışmalar ışığında tasarlanan penetrometrenin sürtünme ceketleri, zamanla oluşacak aşınmalarda dikkate alınarak $R_a=100 \mu\text{m}$ değerinde pürüzlendirilmiştir. Bu değerde pürüzlendirilmiş yüzeyin yaklaşık zeminin içsel sürtünme açısına yakın bir sürtünme açısı ($\phi' = 0,951 \phi$) vereceği düşünülmüştür. Pürüzlendirilmemiş sürtünme ceketleri kullanılması durumunda ise içsel sürtünme açısının yaklaşık yarısına yakın ($\phi' = 0,464 \phi$) bir sürtünme açısı vermesi beklenebilir.

Kum-metal arasındaki, basınç-sürtünme ilişkisinin doğrusal olması nedeniyle, penetrometrenin farklı iki çaptaki sürtünme ceketleri yüzeylerinde oluşacak, farklı iki çevre basıncı - sürtünme gerilmesi değerinin grafikte oluşturduğu iki noktadan geçen doğrunun, düşey eksenini kestiği noktanın kohezyonu, doğrunun eğiminin ise içsel sürtünme açısını ya da içsel sürtünme açısının bir oranını vermesi beklenmiştir. Şekil 3.12'de tipik kesme kutusu deneyi üzerine, sürtünme ceketlerinde oluşması muhtemel iki çevre basıncı - sürtünme gerilmesi çiftlerinin işaretlenmesi ile oluşturulmuş bir grafik verilmiştir. Grafikte pürüzlü ve pürüzsüz metal yüzeyi için oluşması beklenen durumlar gösterilmiştir. İçsel sürtünme açısı ϕ olan bir malzeme için, pürüzlü sürtünme ceketinde $\phi' (= 0,951 \phi)$ ve pürüzsüz sürtünme ceketinde ise $\phi' (= 0,464 \phi)$ oluşacağı varsayımı, grafik üzerinde işaretlenerek gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Tasarlanan penetrometrede deney verilerinden (çevresel basınç ve sürtünme gerilmelerinden) c ve ϕ 'nin grafik yolla belirlenmesi için geliştirilen yöntem

3.5.3. Penetrometrenin tasarım aşamaları

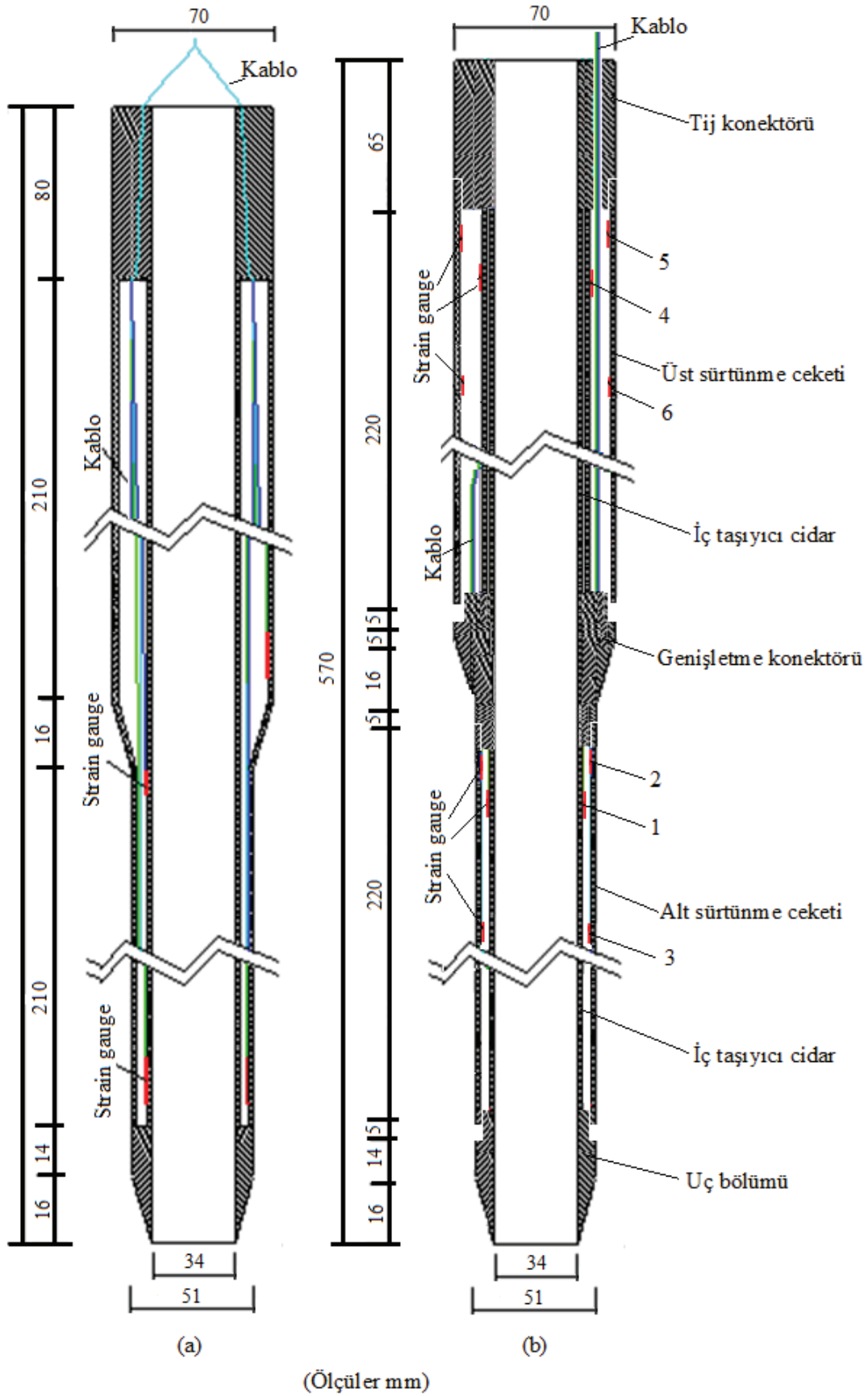
Numune alınırken, zeminin bazı fiziksel parametrelerinin belirlenmesi, içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerinin belirlenmesine yönelik olarak, SPT kaşığının şeklini baz alarak bir penetrometre tasarlanmıştır. Tasarlanan penetrometrenin ilk tasarım şekli Şekil 3.13 (a)'da verilmiştir. Fakat üretim aşamasına geçildiğinde bu kadar uzun bir malzemenin tornada işlenemeyeceği anlaşıldığından tasarım değiştirilmiştir. Çözüm olarak penetrometrenin parçalar halinde üretilmesine karar verilmiştir ve tornada işlenebilecek boyutlu parçalara bölünmüştür. İnce bir borunun tornada içten rahat işlenebilmesi için boyunun 20 cm yi geçmemesi önerilmiştir.

Penetrometrenin cidarlarının tek parça üretilmemesi nedeniyle tekrar tasarlanmıştır. Penetrometre beş bölüm ve yedi parça olarak yeniden tasarlanmıştır. Penetrometrenin ikinci tasarım şekli, Şekil 3.13 (b)'de verilmiştir.

Penetrometrenin alt ve üst bölümleri iç taşıyıcı ve dış sürtünme ceketleri olmak üzere ikişer bölümden oluşmaktadır. İç bölüm, uç ve ara konnektör bölümlerine gelen yükleri karşılayacağından kalın cidarlı ($t=2,4$ mm), dış sürtünme ceketleri ise sürtünme kuvvetlerini hassas ölçebilmek için ince cidarlı ($t=1,2$ mm) olarak boyutlandırılmıştır. Son boyutlandırmada sürtünme ceketlerinin cidar kalınlığı ($t=0,8$ mm) düşürülmüştür.

Penetrometrede uç direncinin ölçümü, iç cidarın dış yüzeyine yapıştırılan (Şekil 3.13'de 1 numarayla gösterilen) strain gauge ile ölçülmüştür. Bu strain gauge ile penetrometrenin batması sırasında ucuna gelen zemin direnci ölçülmüştür. Alt sürtünme ceketleri ile zemin arasında oluşan sürtünme gerilmelerinin değeri, sürtünme ceketinin içine eksen doğrultusunda yapıştırılan (Şekil 3.13'de 2 numarayla gösterilen) strain gauge ile ölçülmüştür. Alt sürtünme ceketine zeminin uyguladığı basınç gerilmelerinin değeri, sürtünme ceketinin içine eksene dik doğrultuda yapıştırılan (Şekil 3.13'de 3 numarayla gösterilen) strain gauge ile ölçülmüştür.

Penetrometre zemine batarken, dar çaptan ($D=51$ mm) sonra geniş çapın ($D=70$ mm) zemine girmesi yada ilerlemesi sırasında, penetrometre çevresindeki zeminin sıkışmasının da etkisiyle, penetrometrenin çap değişiminin olduğu orta bölümündeki konnektöre yaptığı dirence genişletme direnci adı verilmiştir. Penetrometrede genişletme direncinin ölçümü, iç cidarın üst bölümünün dış yüzeyine yapıştırılan (Şekil 3.13'de 4 numarayla gösterilen) strain gauge ile yapılmıştır. Bu strain gauge ile penetrometrenin batması sırasında genişletme konnektörüne gelen zemin direnci yanında alt sürtünme ceketine gelen toplam sürtünme kuvveti de ölçülmüştür. Üstte sürtünme ceketleri ile zemin arasında oluşan sürtünme gerilmelerinin değeri, sürtünme ceketinin içine eksen doğrultusunda yapıştırılan (Şekil 3.13'de 5 numarayla gösterilen) strain gauge ile ölçülmüştür. Üst sürtünme ceketine zeminin uyguladığı basınç gerilmelerinin değeri, sürtünme ceketinin içine eksene dik doğrultuda yapıştırılan (Şekil 3.13'de 6 numarayla gösterilen) strain gauge ile ölçülmüştür.



Şekil 3.13. Tasarlanan penetrometre, (a)-ilk ve (b)-son

İkinci tasarımda penetrometrenin bölümleri şunlardır;

- 1) Uç bölümü (Şekil 3.14)
- 2) İç taşıyıcı bölüm ve genişletme konnektörü (Şekil 3.15)
- 3) Alt sürtünme ceket (51 mm çapında) (Şekil 3.16)
- 4) Üst sürtünme ceket (70 mm çapında) (Şekil 3.17)
- 5) Tij konnektörü bölümü (Şekil 3.18)

Sürtünme ceketlerinde, 304 çeliğinden üretilmiş borular kullanılmıştır. Uç (Şekil 3.14), genişletme konnektörü (Şekil 3.15) ve tij konnektörü (Şekil 3.18) 304 çeliğinden üretilmiş kütük malzemenin tornada talaş kaldırarak işlenmesi ile üretilmiştir.

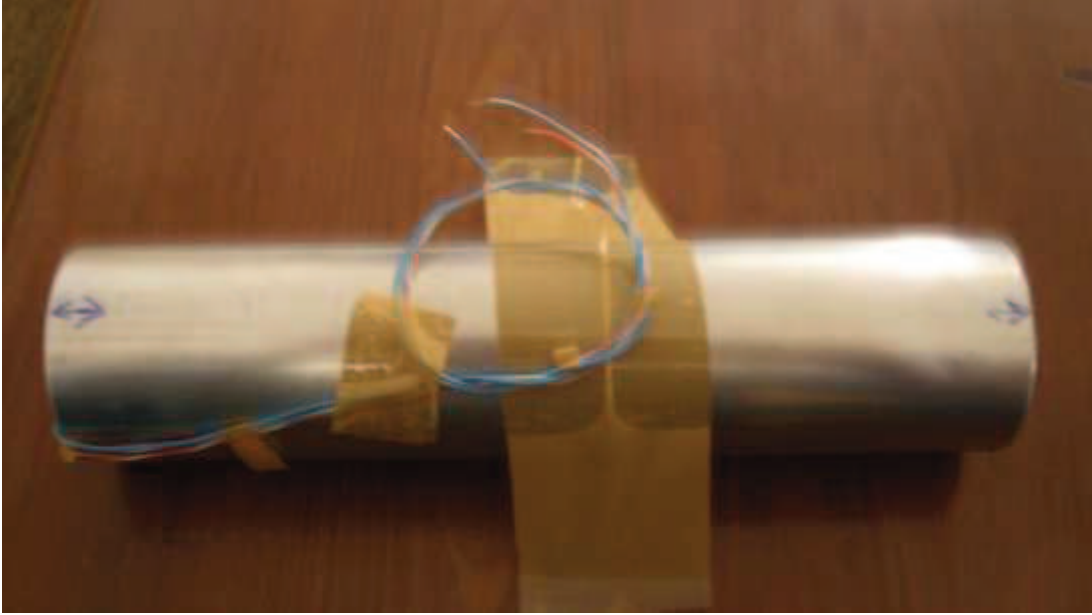


Şekil 3.14. Uç bölümü



Şekil 3.15. Penetrometrenin taşıyıcı iç bölümü

İç taşıyıcı bölüm genişletme konnektörüne vidalı, dış sürtünme ceketlerinin alt uçları serbest kayacak şekilde ve üst uçları 2 mm çapında dört adet vidayla konnektöre vidalanarak sabitlenmiş şekilde üretilmiştir.



Şekil 3.16. 50 mm çapında alt sürtünme ceketi (strain guge bağlanmış)



Şekil 3.17. 70 mm çapında üst sürtünme ceketi



Şekil 3.18. Tij konnektörü bölümü

İkinci tasarım, üretilerek arazide denenmiştir. Penetrometrenin montajından sonra dayanıklılık ve hassaslığının ölçülmesi ve kullanımı sırasında oluşacak olumsuzlukların belirlenebilmesi amacıyla penetrometre farklı üç sondaj kuyusu tabanında zemine itilmiştir. Denemelerde çeşitli sorunlar çıkmıştır. Çıkan sorunları gidermek için tasarım gözden geçirilerek penetrometre yeniden düzenlenmiştir. Çıkan sorunlar ve uygulanan çözümler şunlardır:

Good Year Lastik fabrikası bahçesinde yumuşak kil zeminde yapılan uygulamada;

- 1) Penetrometrenin kullanımı sırasında veri iletim kablosunun yeteri kadar korunmadığı ve tij bağlantılarına engel olduğu fark edilmiştir. Tij konektörü bölümü uzatılıp, kablonun çıkış noktası merkezden uzaklaştırılarak tijin kabloya teması önlenmiştir.
- 2) Kullanım sırasında su ve toz izolasyonu için, sürtünme ceketleri uç kısımlarının altına yerleştirilen (kalın sürtünme ceketinin) izolasyon contası yerinden çıkmıştır. Contanın yerinden çıkmasıyla açılan boşluktan penetrometrenin iç boşluğuna kil ve su karışımı kaçtığı gözlemlenmiştir. Hazır silikon contalar yerine sıvı contayla izolasyonun yapılmasına karar verilmiştir ve sonraki uygulamalarda sıvı conta uygulaması yapılmıştır.

- 3) Toplanan verilerin incelenmesinden ölçümlerin yeteri kadar hassas olmadığı görülmüştür. Sürtünme ceketleri et kalınlığının fazla olmasından kaynaklandığı düşünülen bu sorun; sürtünme ceketleri pürüzlendirilerek, sürtünme ceketleri et kalınlığı azaltılarak ve sürtünme ceketlerinde yarıklar açılarak çözülmeye çalışılmıştır. Dış sürtünme ceketlerine pürüzlendirme işlemi, dıştan boruların tornada aşındırılmasıyla yapılmıştır. Dış sürtünme ceketlerinin zemine sürtünen yüzeyi, 1 cm arayla ve $Ra = 100\mu m$ olacak şekilde pürüzlendirilmiştir. Yarıklar ise diş protez üretiminde kullanılan kesme makinesiyle açılmıştır. Kesitlerde, strain gaugelerin geldiği bölümler dışında kalan kısımları kesilerek açılmıştır. Yarıklar strain gauge doğrultusunda da strain gauge boyunca uzatılmıştır.

Karasu Jandarma Karakolu bahçesinde sıkı kum zeminde yapılan uygulamada;

- 1) Sürtünme ceketlerinin, yarıklar nedeniyle deforme olduğu gözlenmiştir. Sonraki sürtünme ceketlerinin yarıksız üretilmesine karar verilmiştir.
- 2) Verilerin hassaslığı yine sağlanamamıştır. Hassaslık, ölçüm sistemi ve veri toplama sisteminde yapılacak değişikliklerle artırılmaya çalışılmıştır. Bunun için, ısı duyarlılığı fazla normal dirençler yerine, strain gaugelerle Wheatstone köprüsü tamamlanmıştır. Fakat strain gaugeleri yapıştırırken oluşan kalıcı dirençler (direnç değişimleri) yüksek kazanç değerleri kullanılmasına imkan vermemiştir. Yüksek kazanç değerleriyle çalışabilmek için Wheatstone köprüsü, devre tamamlama kablosuyla tamamlanmıştır. Böylece daha hassas ölçümler elde edilebilmiştir.

Adapazarı merkezinde, özel bir arsada, silt zeminde yapılan uygulamada;

- 1) Ölçüm düzenlerinin hassaslıklarının artması, oluşan gerilme düzeylerinin izlenmesine imkân tanımıştır. Gerilme düzeyleri incelendiğinde iç taşıyıcı borunun üst kısmının (genişletme direncini de taşıyan bölüm) yetersiz kaldığı anlaşılmıştır. Bu sorunun önlemi olarak, penetrometrenin bu bölümü, dıştan doygun geçirilen ikinci bir boruyla takviye edilmiştir.
- 2) Ölçüm sisteminin ısı değişiminden etkilendiği fark edilmiştir. Isıl etkiyi bertaraf etmek için yarım köprü kullanılmasına karar verilmiştir. Bir çift strain gauge, üst üste birlikte bağlanmıştır. Alttaki strain gauge yapıştırılırken,

üstteki strain gauge serbest kalacak şekilde (teflon kağıtla korumaya alınmıştır) hazırlanmıştır. Bu yöntemle ısı etkileri kısmen bertaraf edilmiştir fakat tam başarı sağlanamamıştır.

Kayseri Meslek Yüksek Okulu Laboratuvarında yapılan deneylerde;

- 1) Penetrometreye gelen eğilme etkilerinin de önemli hatalara yol açtığı, hem iç taşıyıcı boruların, hem de sürtünme ceketlerinin, eğilme etkilerine karşı hassas olduğu anlaşılmıştır. Eğilme etkisini etkisizleştirmek için, boru kesitinin karşılıklı iki tarafına birer strain gauge yapıştırılarak ikisi seri bağlanmıştır. Böylece penetrometrenin taşıyıcı bölümüne ve sürtünme ceketlerine gelen eğilme etkileriyle oluşan ölçüm hataları giderilmiştir.
- 2) Laboratuvar deneylerinde, ısı etkilerinin tamamen bertaraf edilmediği ve bunun ölçümlerde etkili olduğu anlaşılmıştır. Bunun çözümü olarak, sürtünmeyi ölçen strain gaugelerin taklitleri (dummy) karşılıklarına borunun alt kısmına simetrik olarak yapıştırılmıştır. Basıncı ölçen strain gaugelerin taklitleri (dummy) ise, ince bir alüminyum levhaya yapıştırılmıştır ve bu metal, strain gauge olmayan tarafında ki (bağlantı terminalinin olduğu) ucundan sürtünme ceketinin içine yapıştırılmıştır.
- 3) Mevcut tasarımda penetrometrenin montajının zor olduğu, montaj sırasında arızalar olduğu ve özellikle kablo sisteminin montaj sırasında çok sorun çıkardığı görülmüştür. Ayrıca en fazla eğilme etkisine maruz kalan tij konektörüne yakın bölgenin zayıf kaldığı anlaşılmıştır. Bu durumu düzeltmek amacıyla, penetrometrenin iç taşıyıcı bölümünün tek parça üretilmesi için yeniden tasarım yapılmıştır. Yeni tasarımda, tij konektörü sabit, genişletme konektörü vidalı projelendirilmiştir.
- 4) Son tasarımla yeniden üretilen penetrometrenin demontaj halde fotoğrafı Şekil 3.19'da verilmiştir. Penetrometrenin kalibrasyon sonrası veri toplama sistemi üzerinden bilgisayara bağlanmış hali Şekil 3.20'de verilmiştir. Bu tasarımda iç taşıyıcı bölüm ve tij konektörü birlikte tasarlanmıştır. Bu tasarımda iş makinelerinin pistonlarında kullanılan, et kalınlığı fazla çelik borular kullanılmıştır. Son tasarımda, iç taşıyıcının üst bölümünde et kalınlığı daha fazla ($t=2,4$ mm) olacak şekilde tasarım yapılmıştır.



Şekil 3.19. Penetrometrenin son tasarım şekli



Şekil 3.20. Penetrometre ve veri toplama sistemi

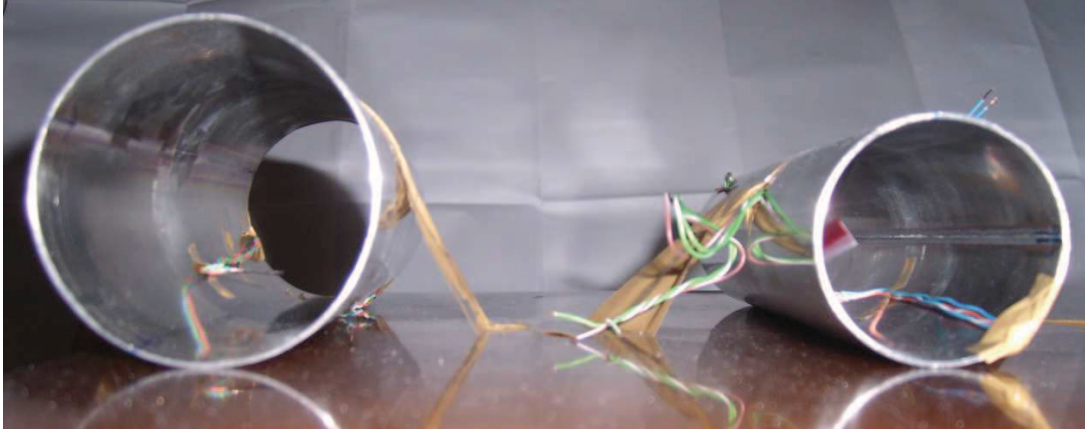
3.6. Penetrometrenin Ölçüm Düzeneklerinin Oluşturulması

3.6.1. Ön hazırlık

Yapıştırılacak strain gaugeler önce bağlantı terminaline bağlanarak hazırlanmıştır. Yapıştırma sonrası, boru içine yapıştırılacak strain gaugelere lehim işlemi yapılamayacağından, bağlantı kabloları önceden terminallere lehimlenerek yapıştırılmaya hazır hale getirilerek koruma altına alınmıştır.

Borularda strain gauge yapıştırılacak noktalar belirlenerek silinmez kalemle işaretlenmiştir. İşaretlenen noktalarda yeteri kadar geniş bir yüzeyde yapıştırma hazırlığı yapılmıştır. Yüzey hazırlığı için; tüm parçalar, önce yağ ve tozdan arındırmak için su ve temizlik maddeleriyle yıkanmıştır. Yıkandıktan sonra kurulan yapıştırma bölgeleri, 60, 180 ve 240 numara zımparalarla zımparalanarak hem kir, pas ve çapak gibi fazlalıklar varsa giderilmiştir, hem de yapıştırılacak yüzey pürüzlendirilmiştir.

Zımpara sonrası yüzeyler asetonla silinerek kirden ve yağ lekelerinden temizlenmiştir. Yüzeyin tam olarak temizlenmesi yapıştırıcının iyi yapışabilmesi için önemlidir. Zımparalama ve asetonla temizleme sırasında silinen konumlandırma işaretleri yeniden çizilerek strain gaugelerin yapıştırılacağı noktalar işaretlenmiştir ve strain gaugelerin doğrultularının doğru olmasını sağlayacak işaretler konulmuştur. İşaretlerin doğruluğu tekrar kontrol edilmiştir. Borular masa üzerine koli bantla yapıştırılıp sabitlenerek strain gauge yapıştırmanın kolay ve hatasız olması sağlanmaya çalışılmıştır (Şekil 3.21).

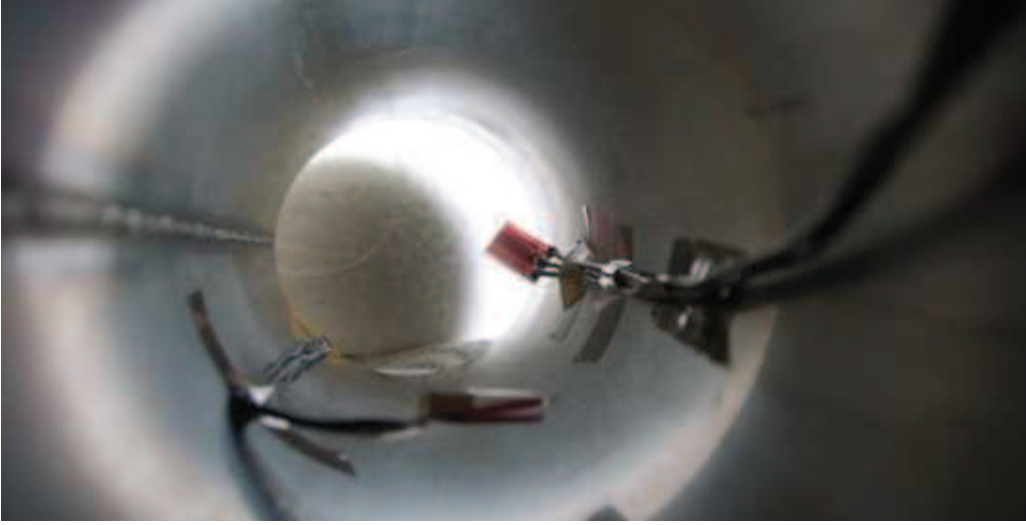


Şekil 3.21. Strain gauge yapıştırmak için bantlanarak sabitlenmiş borular

3.6.2. Strain gaugeleri yapıştırma

Strain gaugeler, sürtünme ceketlerinin iç kısmında orta noktalarına, boru eksenine dik doğrultuda (basıncı ölçmek için), boru alt ve üst kenarından 30 mm içeriye boru eksenine paralel doğrultuda (sürtünmeyi ölçmek için) karşılıklı ikişer adet yapıştırılmıştır. Yapıştırmadan önce strain gaugeler yapıştırılacağı noktalara konumlandırılarak sabitlenmiştir (Şekil 3.22). Böylece strain gaugelerin yanlış yapışmalarının önüne geçilmeye çalışılmıştır. Yinede yanlış yapışan (konumu yada doğrultusu) strain gaugeler kazınarak kaldırılmış ve yeniden yüzey hazırlığı yapılarak yeniden yapıştırılmıştır. Çünkü konumu ya da doğrultusu yanlış olan strain gaugeler yanlış ölçüme neden olabildiği gibi montaja engel olabilmektedir.

Hazırlık yapılan yüzeyler, strain gauge yapıştırılmaya hazır hale getirildikten sonra yapıştırma işlemine geçilmiştir. Yapıştırma işleminde, bir damla CN tipi Cyanoacrylate hızlı yapıştırıcı (bu strain gauge üretici firmasının metal yüzeylere yapıştırmada kullanılmasını önerdiği yapıştırıcıdır) boru yüzeyine damlatılıp yayıldıktan sonra, teflon kâğıt üzerinden yüzeye bastırılarak 5 - 6 dakika beklenmiştir.



Şekil 3.22. Yerine konumlandırılmış, yapıştırılmaya hazır strain gaugeler

Çevresel basıncı ölçmek amacıyla sürtünme ceketini eksenine dik doğrultuda yapıştırılan strain gaugeler, sürtünme ceketlerinin ortalarına; sürtünme gerilmelerini ölçmek amacıyla, sürtünme ceketini eksenine paralel doğrultuda yapıştırılan strain gaugeler sürtünme ceketinin uç kısmından 2 cm içeriye yapıştırılmıştır. Strain gaugeler, iç cidar borularının dışına (Şekil 3.23) ve dış sürtünme ceketlerinin içine gelecek şekilde (Şekil 3.24) yapıştırılmıştır.



Şekil 3.23. İç boru dışına yapıştırılmış strain gauge



Şekil 3.24. Boru içine yapıştırılmış strain gaugeler

Yapıştırma işleminden sonra strain gaugelerin yüzeyi silikonla kapatılmıştır. Bu işlem hem strain gaugeleri olası dış etkilerden (saklama, montaj gibi) korumakta hem de hızlı yapıştırıcının zaman içinde içeriğindeki incelticinin buharlaşması sonucu gevrekleşmesini önlemektedir.

3.6.3. Strain gauge kontrolleri

Strain gaugeler hazırlandıktan sonra, saklama sonrası kullanımdan önce, konumlandırılmadan sonra, yapıştırmadan önce ve yapıştırıldıktan sonra kontroller yapılmıştır. Strain gauge kontrollerinde, kablo bağlantılarının doğru ve kaliteli yapılıp yapılmadığı ve strain gaugelerin işlemler sırasında zarar görüp görmediği kontrol edilmiştir. Bunun için avometre ile iki çeşit kontrol yapılmıştır (Şekil 3.25).

1-Strain gauge direncinin korunduğunun kontrolü: Lehim, konumlandırma ya da yapıştırma sırasında hatalardan dolayı strain gauge çıkışları arasında kısa devre yada kopma olup olmadığının kontrolü yapılmıştır. Bu kontrolde strain gauge kolları arasında oluşan gerilimin 120 ± 1 ohm olduğunun kontrolü yapılmıştır. Bir miktar sapma (özellikle artış) yapılan lehimlerin kalitesinden, yapıştırma sırasında strain

gauge verilen ön gerilmeden ya da kablonun elektriksel dirençlerinden kaynaklanabilmektedir.

2- Strain gauge yalıtımının korunduğunun kontrolü: Lehim, konumlandırma ya da yapıştırma sırasında ki hatalardan dolayı strain gauge çıkışları ile metal borular arasında kısa devre olup olmadığının kontrolü yapılmıştır. Strain gauge kolları ile metal yüzeyler arasında oluşan gerilimin 10.000 ohm dan fazla olması gerekmektedir. Daha düşük değerler yalıtım sorunu olduğunu göstermektedir, kesinlikle düzeltilmesi gerekmektedir.

Montajdan önce, strain gauge kontrolleri tekrar yapılarak montaj öncesi ve montaj sırasında oluşabilecek hataların montajdan sonra sorun teşkil etmesinin önüne geçilmeye çalışılmıştır. Son kontroller de yapıldıktan sonra penetrometrenin montajına geçilmiştir. Önce penetrometrenin montajı yapılmış ve bu sırada iç donanımdan gelen kablolar dışa alınmıştır. Daha sonra, iç donanımdan dışa çıkan kabloların ucuna sinyalleri veri toplayıcıya iletecek kablolar eklenmiştir.



Şekil 3.25. Strain gauge bağlantılarının kontrolünde kullanılan avometre

3.6.4. Kablo bağlantıları ve köprü tamamlama

İlk olarak bağlantılarda CAT5 internet kablosu denenmiştir. Direnci düşük, ince telli ve temini kolay olduğu için bu kablolar tercih edilmiştir. Wheatstone Köprüsü tamamlama işlemi, kablo ara noktasında, veri toplayıcıya girmeden önce konumlandırılan elektronik plaka üzerine yerleştirilmiş strain gaugelerle yapılmıştır (Şekil 3.26). Bu bağlantı da kabloların gevrek olması nedeniyle kırıldığı ve Wheatstone Köprüsü tamamlama plakasının korunmasının zor olduğu görülmüştür. Olumsuzluklar nedeniyle bu bağlantıdan vazgeçilerek yeni malzeme ve yöntemler araştırılmıştır.

İkinci olarak bağlantılar için kamera kablosu denenmiştir. Direnci düşük, ince telli ve temini kolay olmasının yanında yumuşak ve esnek olduğu için bu kablo tercih edilmiştir. Wheatstone köprüsü tamamlama işlemi ise, veri toplayıcıya bağlantı konnektörünün içine konumlandırılan dirençlerle yapılmıştır. Bu bağlantıda, veri toplayıcıdan hemen önce kablolar da dahil, toplam elektriksel direnç değerleri ölçülerek bu elektriksel direnç değerlerine uygun dirençler kullanılmıştır. Böylece, Wheatstone köprüsü tamamlama sırasında, artık (rezidual) elektriksel dirençlerin de kısmen giderilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.26. Elektronik devreyle Wheatstone Köprüsü tamamlama

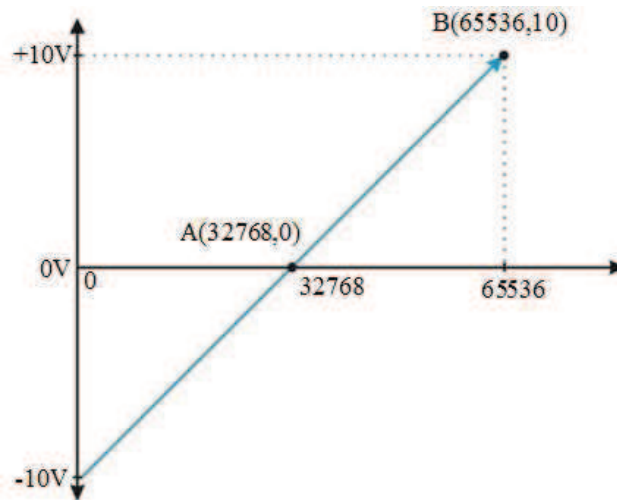
Olumsuzlukların da büyük ölçüde giderildiği bu bağlantı, kullanımda da pratik olmuştur. Fakat bu bağlantıda ise, ısı değişimleri sistemi çok etkilemiştir. Normal dirençler ısıya fazla duyarlı davranmıştır.

Önceki bağlantılarda oluşan olumsuzluklar dikkate alınarak yapılan araştırmada, ısıya az duyarlı dirençler kullanarak yarım köprü kurulması durumunda olumsuzlukların giderilebileceği belirlenmiştir. Son olarak ısı duyarlılığı az dirençlerle üretilen devre tamamlama kabloları kullanılmıştır ve yarım köprü oluşturularak ölçüm alınmıştır.

3.7. TESTBOX1001 Veri Toplama Sistemi Kurulumu

3.7.1. Analog dijital çevirim özellikleri

TESTBOX1001 veri toplama sisteminin kullandığı, sensörlerden gelen volt değerini, adım değerine çevirme transfer fonksiyonu Şekil 3.27’de verilmiştir. Adım değeri, TESTBOX1001 veri toplama sistemine uygulanan voltaj değerine göre 0-65535 arasında dijital bir kod üretmesidir. Bu kod, yazılım üzerinden sensörlerin kalibrasyonunu yapmak için kullanılmaktadır. TESTBOX1001 veri toplama sistemi 16-bit’lik bir veri toplama donanımdır, yani $2^{16} = 65536$ adımlık bir ölçüm hassasiyeti vardır.



Şekil 3.27. TESTBOX1001 veri toplama sisteminin transfer fonksiyonu

Veri toplama çözünürlüğü : $2^{16} = 65536$ Adım

Ölçülebilen toplam voltaj aralığı : $\pm 10V = 20V$

Veri toplama voltaj/adım çözünürlüğü: $20/65536 \sim 0,000305V/adım$

TESTBOX1001 veri toplama sisteminin transfer fonksiyonundan da görüldüğü gibi teorik olarak; TESTBOX1001 veri toplama sisteminin sensör girişlerine 10 volt uygulanırsa okumamız gereken adım (count) değeri 65535dir. TESTBOX1001 veri toplama sisteminin sensör girişlerine 0 volt uygulanırsa okumamız gereken adım (count) değeri 32768 ve TESTBOX1001 veri toplama sisteminin sensör girişlerine - 10 volt uygulanırsa okumamız gereken adım (count) değeri 0 olmaktadır. TESTBOX1001 veri toplama sistemi için ölçülen potansiyel farkına (volt) karşılık gelen adım (count) değeri (4) formülü ile hesaplanabilir.

$$y = \frac{10x}{32768} - 10 \quad (3.5)$$

Bu formülde; y adım değerini, x ise ölçülen gerilimi göstermektedir. Ölçü aletlerinden, kalibreli olarak okuma alınabilmesi için bağlandığı kanalda bir takım ayarlar ve hesaplamalar yapmak gerekir. Kalibrasyon için çokça kullanılan ve kabul görmüş iki adet yöntem vardır;

Birincisi; ölçüm cihazının üreticisinden gelen kalibrasyon sertifikasından ve TESTBOX1001 veri toplama sisteminin kalibrasyon sertifikasından yararlanılarak yapılan hesaplamalar sonucu yapılan kalibrasyondur. İkincisi ise; ölçüm cihazına bilinen değerler (ağırlık, uzunluk) uygulanarak yapılan kalibrasyondur. Yeni alınmış cihazlar için birinci yöntem uygun olurken, uzun zamandır kullanılan ve kalibrasyon sertifikası kaybolmuş bir cihaz için ise ikinci yöntem önerilir. Bu araştırmada bu yöntem kullanılmıştır.

Öncelikle bilinmesi gereken, bazı cihazların (yük hücresi gibi) köprü tipi sensörlerin çıkışları mV seviyesindedir. Bu sensörlerden ölçüm alınabilmesi için sensörün ikaz edilmesi (ikaz gerilimi verilmesi) ve alınan sinyalin belli oranlarda yükseltilmesi gerekmektedir. Bu yükseltme oranına kazanç değeri denilmektedir.

Kazanç ayarı; cihazın bağlandığı kanalın üzerindeki seçme anahtarları yardımıyla ayarlanabilmektedir (Bkz. Şekil 3.9). Cihazı bağladığımız TESTBOX1001 için sağlanan kalibrasyon sertifikasından o kanala ait kazanç değerine bakılabilmektedir. İkaz gerilimi; ikaz gerilimi de TESTBOX1001'in kanala ait seçme anahtarlarıyla ayarlanabilmektedir (Şekil 3.9). Bu değerler 5V/10V olabilmektedir. Yük Hücresinin bağlı olduğu kanalda bu ayarın kesinlikle 5 V konumunda olması gerekir. Seçilen ikaz geriliminin gerçek değerine cihazla birlikte verilen kalibrasyon sertifikasından bakılabilmektedir.

3.7.2. Veri toplama sisteminin kurulması

TESTBOX1001 veri toplama sisteminin devreye alınmasında izlenen yolu şu şekilde sıralanabilmektedir.

- 1) TESTBOX1001 veri toplama sisteminin elektrik kablosu prize takılır. Açma kapa düğmesinden cihaz açılır. Elektrik geldiği zaman ön taraftaki adres ekranında seri numarası bir saniye aralıklarla geçecektir daha sonra çalışma adresi görüntülenecektir. Genelde adres, 1 de olmasına rağmen başka bir adresi gösteriyor olabilmektedir. Eğer adres 1 den farklıysa, adres göstergesinin yanındaki buton yardımıyla adres 1 e getirilir.
- 2) TESTBOX-BRIDGE aygıt geçidine bağlantı yapılır. TESTBOX-BRIDGE aygıt geçidinin 3 adet girişi vardır, bunlar sırayla bağlanır; birincisi USB kablosu, USB girişine takılarak diğer ucu bilgisayarın arkasındaki USB portuna bağlanır. İkincisi, RS-485 kablosu; 9 pinli D şeklindeki konnektöre bağlanır, diğer ucu ise TESTBOX1001 veri toplama sisteminin RS485 haberleşme konnektörüne bağlanır. Üçüncüsü ise, 9V luk adaptör girişidir, adaptörün ucu bu girişe bağlanarak bütün bağlantıların tamamlandığı kontrol edildikten sonra adaptör fişe takılır.
- 3) Ölçüm ve kalibrasyon işlerine başlanmadan önce TESTBOX1001 veri toplama sistemi, 20-25 dakika çalıştırılarak şasesinin termal dengeye gelmesi sağlanmalıdır. Bu işlem yapılmadığı takdirde köprü tipi sensör okumalarında çok küçük kaymalar meydana gelmektedir.

3.7.3. TestLAB Basic programının kurulması ve çalıştırılması

TestLAB Basic paket yazılım CD'sinden bilgisayara TestLAB Basic yazılımı yüklendikten sonra kullanma klavuzunda yazan ayarlar yapılarak program kullanılabilir hale getirilmiştir. TestLAB Basic yazılımı Türkçe ve İngilizce dil seçeneklerine ayarlanabilmektedir. Dil seçeneği değiştirilmeden Türkçe olarak devam edilmiştir.

Program, bilgisayara kurulduktan sonra Configure TestLAB Basic programı çalıştırılmaktadır. Configure TestLAB Basic çalıştırıldığında bilgisayara bağlı cihazları (aygıt geçidi veri toplama sistemleri) otomatik algılamaktadır. Bağlı cihaz bulunamaması durumunda uyarı vermektedir.

TESTBOX-BRIDGE aygıt geçidinin algılanması durumunda "biip" sesi duyulmaktadır ve TESTBOX-BRIDGE aygıt geçidine bağlı cihazlar gözükmemektedir. Bu durumda veri toplama sistemi ve TestLAB Basic programı kurulma işlemi tamamlanmış olmaktadır. Kurulumun tamamlanmasının ardından Configure TestLAB Basic programı üzerinden kalibrasyonlar yapılarak deney düzenlenebilmektedir.

Araştırmanın başlarında kullanılan TDG CODA programında cihaz tanıtımı ve deneye hazırlık işlemleri uzun sürmekteydi, TestLAB Basic programının yazılmasından sonra bu program kullanılmıştır.

3.8. Kalibrasyonlar

Strain gauge kontrollerinde kablo bağlantılarının doğru ve kaliteli yapıp yapılmadığı tekrar kontrol edildikten sonra kalibrasyonlar yapılmıştır. Kalibrasyonlar, TestLAB Basic programının otomatik kurduğu yardımcı program Configure TestLAB Basic ile yapılmıştır. Configure TestLAB Basic programı açıldığında cihazları (TESTBOX-BRIDGE aygıt geçidi ve TESTBOX1001 veri toplama sistemini) otomatik algılamaktadır. Açılan kullanıcı ara yüzünde ikinci adım

kalibrasyondur. Burada veri toplama sistemine bağlanan cihazların kalibrasyonları yapılabilmektedir. Ayrıca daha önce yapılmış kalibrasyonlar görülebilmekte ve düzeltilebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, kalibrasyonlarda eski ve sertifikasız ölçüm cihazları için önerilen ikinci yöntem kullanılmıştır. Borular yük hücresi gibi düşünülmüştür. Boruya yükleme yapılmadan Whatstone köprüsünün verdiği çıkış gerilimi sıfırla, yük altında oluşan çıkış gerilimi ise yüklenen yük ile eşleştirilerek tanıtılmıştır.

Kalibrasyonları yaparken, yükleme için üç eksenli deney düzeneği kullanılmıştır. Üç eksenli deney düzeneği, hız kontrollü olduğundan çok düşük hızlarda yükleme yapılabilmekte ve istenilen yük değerinde durdurularak kalibrasyon değeri alınabilmektedir.

Uç ve genişletme direncini taşıyan iç borular, eksenel yüklenerken kalibre edilmiştir (Şekil 3.28). Penetrometre iç taşıyıcı boruları $F=39,24$ kN yük ile yüklenmiştir. Yükleme sırasında veritoplama sisteminde okunan, elektriksel gerilim değeri $39,24$ kN'a atanmıştır.

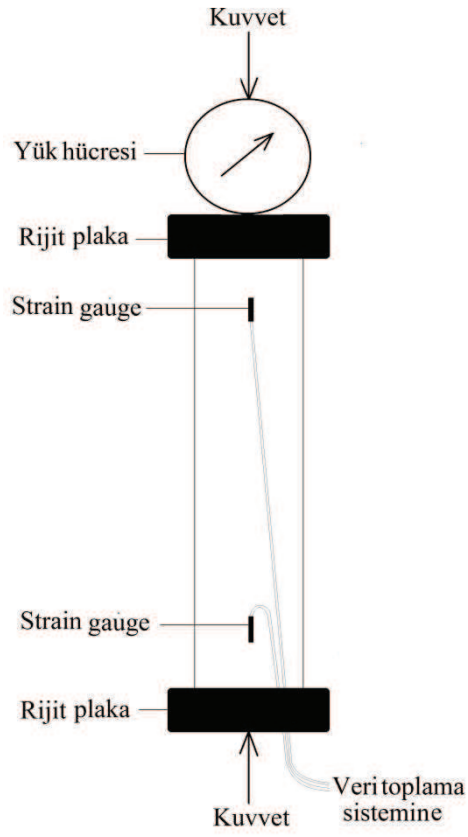
Sürtünme ceketleri, sürtünme kuvveti ölçmek için kalibre edilirken, eksenel yüklenerken kalibre edilmiştir (Şekil 3.29). Sürtünme ceketinde, sürtünme kuvveti etkisiyle, strain gaugede etki oluşturacak yüzey alanı ($A=\pi D^2 H$) hesaplanmıştır. Bu alan, esas ve ısıl etkileri bertaraf etmek için yapıştırılan strain gaugeler arasındaki yüzey alanıdır. Boru kesitinde, bu yüklemeye oluşan gerilmeyi oluşturacak sürtünme değeri hesaplanmıştır ve kalibrasyonda okunan değere hesaplanan bu sürtünme gerilmesi (sürtünme ceketinin çevresinde oluşan) değeri atanmıştır. Alt sürtünme ceketini ($D=51$ mm) eksenel olarak $F=1,696$ kN yük ile yüklenmiştir. Bu değer $\tau = F/A = 70,7$ kPa sürtünme gerilmesine karşılık gelmektedir. Üst sürtünme ceketini ($D= 70$ mm), eksenel olarak $F=3,280$ kN yüklenmiştir. Bu değer $\tau = 100,0$ kPa sürtünme gerilmesine karşılık gelmektedir.



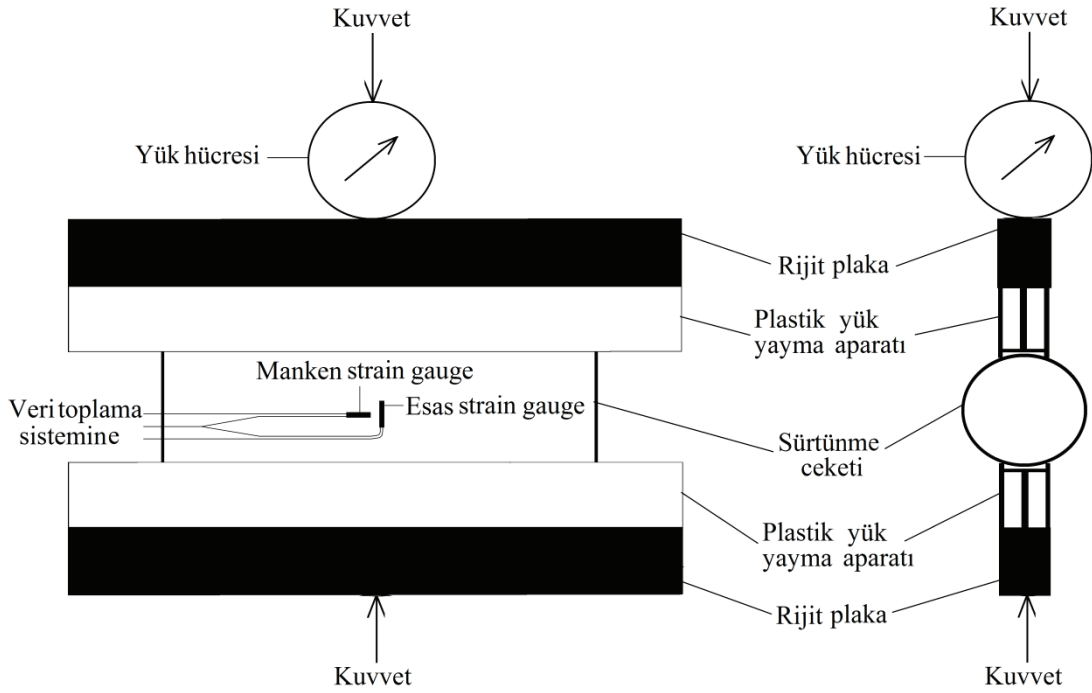
Şekil 3.28. İç taşıyıcı boruların (uç ve genişletme direnci) kalibrasyonu

Sürtünme ceketlerinin basınç değeri kalibrasyonu; borular, strain gauge düşey gelecek şekilde yatırılarak, eksene dik doğrultuda, eksen boyunca yayılı yükle yüklenerek kalibrasyon yapılmıştır (Şekil 3.30). Yatay kesitte bu yüklemeden oluşan gerilmeyi oluşturacak çevresel basınç değeri hesaplanmıştır ve kalibrasyonda, okunan değere hesaplanan bu çevresel basınç değeri atanmıştır.

Alt sürtünme ceketini ($D=51$ mm), eksene dik olarak $F=1,01$ kN kuvvetle yüklenmiştir. Bu değer $\sigma=19,61$ kPa basınç gerilmesine karşılık gelmektedir. Üst sürtünme ceketini ($D=70$ mm), eksene dik olarak $F=1,383$ kN kuvvetle yüklenmiştir. Bu değer ise $\sigma=19,61$ kPa basınç gerilmesine karşılık gelmektedir.



Şekil 3.29. Sürtünme ceketinde sürtünme kuvveti kalibrasyonu



Şekil 3.30. Sürtünme ceketinde basınç kuvveti kalibrasyonu

3.9. Montaj

Sürtünme ceketlerinin kalibrasyonları yapıldıktan sonra strain gauge kontrolleri tekrar yapılmıştır. Kontrollerden sonra, üst sürtünme ceketini (D=70 mm) kablo bağlantıları ve kablo yalıtımları yapılmıştır. Sürtünme ceketini, sıvı conta uygulanan tij konektörünün alt ucuna geçirilmiştir. Daha sonra ara konektör ekine sıvı conta işlemi uygulanmış ve yerine vidalanarak yerleştirilmiştir. Böylece üst ceket montajı gerçekleştirilmiştir. Sürtünme ceketinin yerleştirilmesi işleminin ardından strain gauge kontrolleri tekrar yapılmıştır.

Alt sürtünme ceketini (D=51 mm) kablo bağlantıları ve kablo yalıtımları yapıldıktan sonra silikon sürülen ara konektörün altına geçirilmiştir. Alt sürtünme ceketinin (D=51 mm) strain gauge kontrolleri yapıldıktan sonra, sıvı conta uygulaması yapılan uç bölümü vidalanarak yerleştirilmiştir. Sonra tüm kablo ve strain gauge kontrolleri yeniden yapıldıktan sonra sıvı contaların sertleşmesi beklenmiştir. Sıvı contaların sertleşmesinin ardından sürtünme ceketleri, üst kısımlarından ve dörder yerinden, 2 mm çapında vidalarla konektörlere vidalanmıştır. Son olarak strain gauge kontrolleri tekrar yapılarak (montaj sırasında oluşabilecek hataların giderilmesi için) devre tamamlama kabloları aracılığıyla veri toplama sistemine bağlanmıştır. Bu işlemlerle penetrometre kullanım aşamasına getirilmiştir.

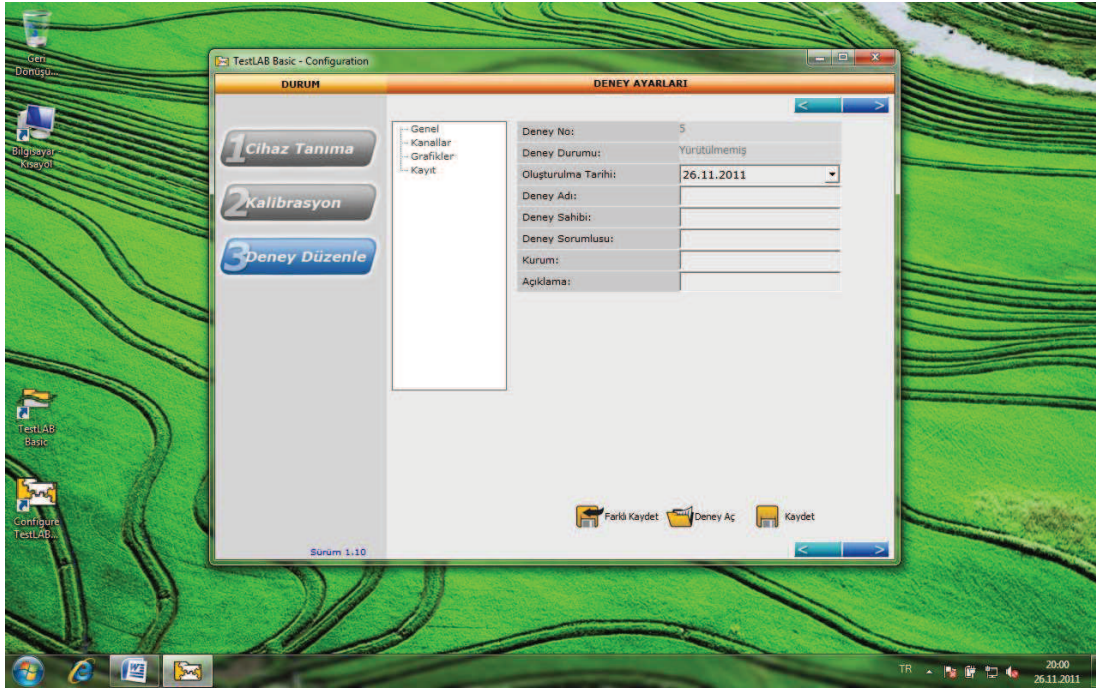
3.10. Deney Düzenleme

Kalibrasyonları yapılarak veri toplama sistemine bağlanan penetrometre için deney düzenleme işlemi yardımcı program Configure TestLAB Basic ile yapılmıştır. Configure TestLAB Basic programının açılış arayüzünde kalibrasyonlardan sonraki adım, 3. Deney Düzenle adımıdır. Bu adıma geçildiğinde Şekil 3.31’de verilen ara yüz karşımıza gelmektedir.

Bu adımda; “Genel” bölümünden düzenlenmek istenen deney bilgileri girilmiştir, “Kanallar” bölümünden istenen kanallar aktif hale getirilmiştir, kanallara önceden hazırlanan kalibrasyonlardan ilgili olanı atanmıştır ve “Kayıt” bölümünden deney kaydedilmiştir. Deney düzenlemede, 1. Kanala uç direnci, 2. Kanala genişleme

direnci, 4. kanala alt sürtünme, 5. kanala alt basınç, 7. Kanala üst sürtünme ve 8. Kanala üst basınç atanmıştır. 3. ve 6. kanal boş bırakılmıştır. Deney verilerinin izlenmesinde kolaylık sağlamak için, boş bırakılan kanallar ara kanallardan seçilmiştir.

TestLAB Basic programında deney düzenleme işlemi de yapıldıktan sonra laboratuvar deneylerine geçilmiştir.



Şekil 3.31. TestLAB Basic programı deney düzenleme arayüzü

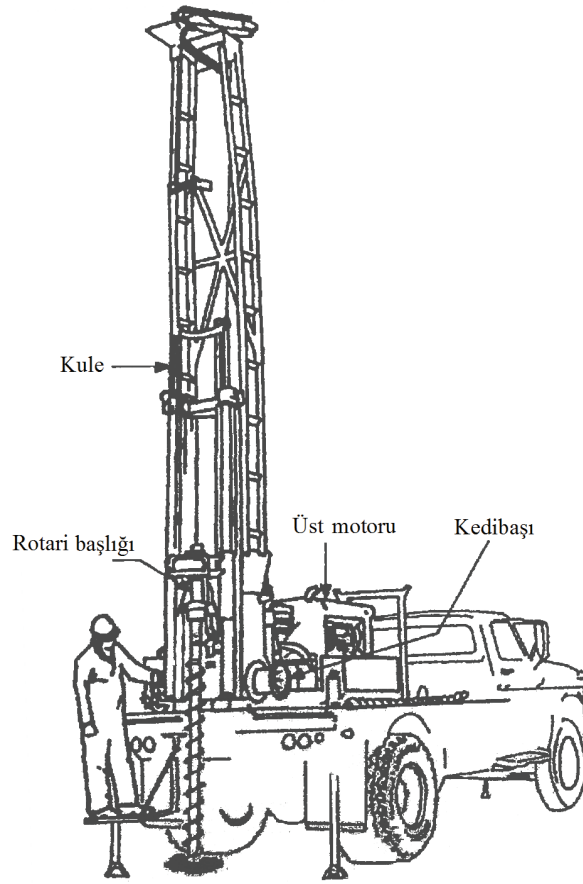
BÖLÜM 4. PENETROMETRE TEST ORTAMI

Penetrometrenin, tasarım ve hata giderme aşamalarında, zemin özellikleri yaklaşık bilinen arazilerde kullanılmıştır. Fakat, arazi şartlarında zeminler homojen olmadığından elde edilen veriler, penetrometrenin kullanım limitlerini ve kullanımda ortaya çıkan eksiklikleri belirleyerek gidermek amacıyla kullanılmıştır. Fakat, tasarımı tamamlanan ve arazide denenerek bir çoğu hatası giderilen penetrometrenin, kullanımda doğru ölçüm yaptığının belirlenebilmesi ve zemin özellikleri ile elde edilen veriler arasında ilişki kurulabilmesi için; özellikleri bilinen ve homojen zemin ortamlarına ihtiyaç duyulmuştur.

Özellikleri bilinen, homojen zemin ortamlarında penetrometrenin denenmesi amacıyla, laboratuvarında model zemin ortamları oluşturulmuştur. Model zemin ortamları, bir varil içine farklı dane çaplarına sahip zeminler, farklı sıklıklarda yerleştirilerek oluşturulmuştur. Böylece, özellikleri bilinen, düşey ve yatay doğrultuda homojen zemin ortamları oluşturulmuştur. Bu ortamlara penetrometrenin itilmesi sırasında yapılan ölçümler ile zemin ortamının bilinen özellikleri arasında ilişki kurulması imkanı elde edilmiştir.

4.1. Sondaj Ekipmanı

Penetrometrenin arazide zemine itilmesi sırasında rotari sondaj makinesi ve ekipmanından faydalanılmıştır. Sondaj makinesi genellikle bir araç üzerine monte edilmiş olarak kullanılmaktadır. Hidrolik baskı sistemi, rotari sondaj makinesinin bir parçası olan, rotari başlığının standart bir özelliğidir. Sondaj sırasında dönen sondaj takımını sondaj kuyusunun tabanına bastırmada ve numune alma sırasında numune tüplerinin zemine itilmesinde kullanılmaktadır (Şekil 4.1).



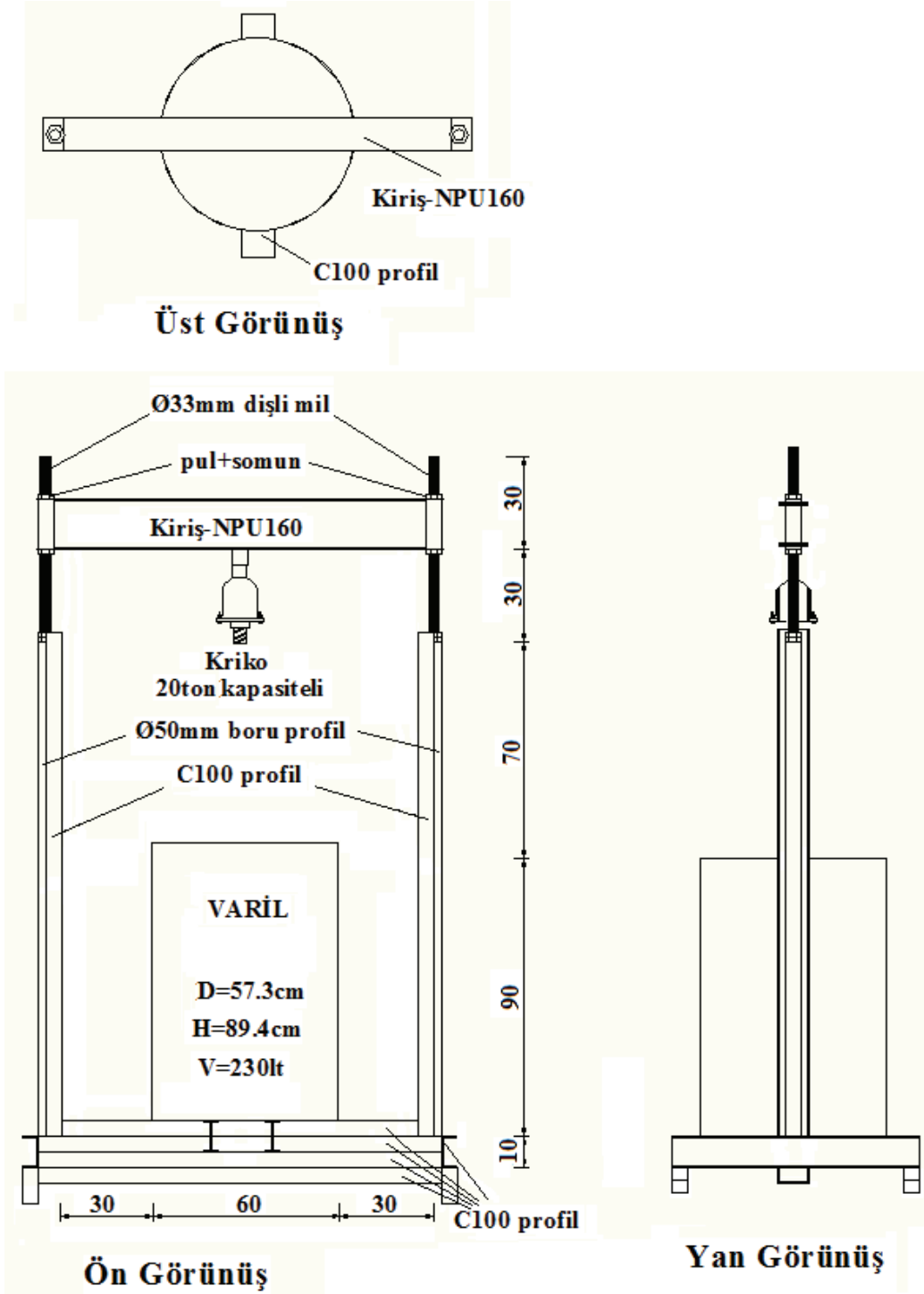
Şekil 4.1. Sondaj ekipmanı (Clayton vd., 1995)

Penetrometrenin konnektör bölümü, standart A tipi sondaj tijlerine bağlanmaya uygun şekilde tasarlanmıştır. Arazi denemelerinde penetrometre, sondaj tijine bağlanarak kuyu tabanına indirilmiş ve sondaj makinesinin baskı sistemiyle sondaj kuyusu tabanına itilmiştir.

4.2. Yükleme Çerçevesi

Laboratuvar ortamında, özellikleri bilinen kum malzemelerle, değişik sıklıklarda model zemin ortamları hazırlayarak, penetrometrenin itilmesi için özel bir deney düzeneği (yükleme çerçevesi) hazırlanmıştır. Deney düzeneği, varil içine istenilen şartlarda yerleştirilen zemin ortamlarına, yükleme çerçevesi ve kriko yardımıyla penetrometrenin itilmesini sağlayabilecek şekilde özel olarak tasarlanmıştır. Çerçevenin taban profilinde C100 profilleri, kolon taşıyıcılarda 50 mm çapında çelik boruyu destekleyen C100 profilleri ve üst yükleme kirişi olarak NPU160 profili

kullanılmıştır. Yük uygulama çerçevesi, kriko ve varilinden oluşan laboratuvar deney düzeneği Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Yükleme çerçevesi düzeneği ön, üst ve yan görünüşü

Penetrometrenin zemine itilmesi için 20 ton kuvvet öngörülerek, çerçeve 20 ton kuvveti uygulayabilecek kapasitede boyutlandırılmıştır. Penetrometrenin itilmesinde kullanılabilen yükün sınırı, pratik olarak normal boyutlarda yüklü bir kamyon baz alınarak belirlenmiştir. Penetrometrenin zemine itilmesi 20 ton kapasiteli hidrolik kriko yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Kriko, altına monte edilen penetrometreyi sabit üst kirişten kuvvet olarak itecek şekilde tasarlanmıştır.

İstenilen özelliklerin sağlanabilmesi için model zemin ortamı laboratuvarında hazırlanmıştır. Model zemin ortamı hazırlamak için, D=57,3 cm çapında ve H=89,4 cm yüksekliğinde varil kullanılmıştır.

4.3. Model Zemin Ortamı Hazırlamada Kullanılan Malzemeler

Kap: Terazinin üzerinde zeminin tartarken doldurulduğu plastik bir kap kullanılmıştır. Ağırlığı dar olarak düşülerek terazinin üzerinde kum tartmada kullanılmıştır.

Kürek: Zeminin terazi üzerindeki kaba, oradan da varile aktarılması ve deneyden sonra varildeki malzemenin boşaltılması için metal bakkal küreği kullanılmıştır.

Çelik cetvel: Varile doldurulan malzemenin sıkıştırmadan önce ve sonra düzeltildiği bir çelik cetvel kullanılmıştır.

Su terazisi: Varile doldurulan malzemenin sıkıştırmadan önce ve sonra teraziye almak için su terazisi kullanılmıştır.

Tokmak: Varile doldurulan malzemenin sıkıştırılması için 5 kg ve 10 kg ağırlığında, kulplu (tutup kaldırmak için) çelik tokmak kullanılmıştır.

Köşebent profil: Varilin üzerine konularak, varil üst yüzeyinden sıkıştırılan zeminin üst yüzeyinin mesafesini ölçmek için, 70 cm boyunda, 50 mm x 50 mm ebadlarında alüminyum köşebent profil kullanılmıştır.

Tahta cetvel: Sıkıştırılan zemin yüzeyinin varil yüzeyinden mesafesini ölçmek için 100 cm boyunda tahta cetvel kullanılmıştır. Her sıkıştırmadan sonra beş noktada zemin yüzeyinin varil yüzeyine mesafesi (derinlik) kontrol edilmiştir. Kontrol sonrası zemin yüzeyinin düzeltilecek bölgeleri belirlenmiştir.

Merkezleme aparatı: Varil doldurulduktan sonra penetrometrenin batacağı noktayı daha kolay ve hatasız belirlemek, zeminin kabarmasını önlemek ve sürşarj yükünü homojen dağıtmak amacıyla, merkezinden 100 mm çapında delik açılmış ve zemine gelecek yüzeyi formika kaplanmış bir ahşap levha kullanılmıştır.

Sürşarj ağırlıklar: Penetrometrenin zemine batması sırasında zeminin kabarmasını önlemek için 10 kg ağırlığında 8 adet sürşarj ağırlığı kullanılmıştır.

4.4. Model Ortamlarda Kullanılan Zemin Malzemesi Özellikleri

Tasarlanan penetrometrenin imalat ve montajı bittikten, kalibrasyonları yapıldıktan sonra, laboratuvarında oluşturulan model ortamlara itilerek denenmiştir. Zemin malzemesi olarak; içsel sürtünme açısı yüksek olduğu (artan çevresel basınca karşılık sürtünme gerilmesi artacağı, doldurma-boşaltma ve istenilen şekilde yerleştirmesi kolay olacağı) kum zemin malzemeleri tercih edilmiştir. Zemin malzemesi olarak, dane çap aralığı 0-1 mm, 0-5 mm ve 0-15 mm olan üç farklı nehir kumu kullanılmıştır.

Piyasadan temin edilen, üç farklı kum zemin malzemesinin özellikleri TS 1900'e göre belirlenmiştir. Kum malzemelerden alınan numunelere elek analizi, kesme kutusu deneyi, tane birim hacim ağırlık deneyi, maksimum ve minimum birim hacim ağırlık deneyi yapılmıştır. Zemin sınıfları TS1500'e göre belirlenmiştir.

4.4.1. Birim hacim ağırlıklar ve boşluk oranları

Kullanılan kumların, dane birim hacim ağırlıkları, sıkı birim hacim ağırlıkları ve gevşek birim hacim ağırlıkları TS 1900'e göre deneyle belirlenmiştir. Yapılan birim hacim ağırlık deneylerinin sonuçları Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Model zemin ortamlarında kullanılan kum malzemelerin birim hacim ağırlık ve boşluk oranı değerleri

Zemin Sınıfı	İnce kum (SP)	İri kum (SP)	Kumlu çakıl (GW)
Dane çapı aralığı (mm)	0-1	0-5	0-15
Min. kuru birim hacim ağırlık (gr/cm ³)	1,414	1,464	1,620
Mak. kuru birim hacim ağırlık (gr/cm ³)	1,920	1,790	2,057
Dane birim hacim ağırlığı (gr/cm ³)	2,631	2,787	2,716
Minimum boşluk oranı	0,370	0,557	0,320
Maximum boşluk oranı	0,861	0,904	0,677

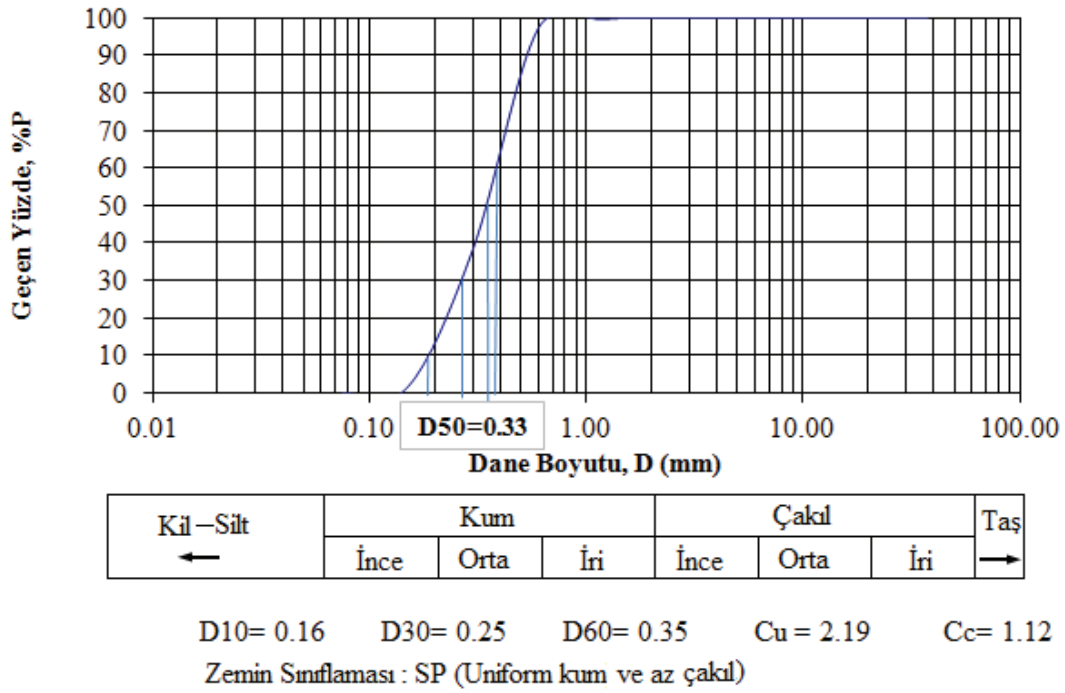
4.4.1. Elek analizi ve zemin sınıfı

Kullanılan kum zemin malzemelerin dane dağılımını ve zemin sınıfını belirlemek için elek analizleri yapılmıştır. Model ortamın hazırlanmasında kullanılan, kum zemin malzemelerine yapılan elek analizleri sonucunda elde edilen dane dağılımı ve yüzde geçen tabloları Tablo 4.2, Tablo 4.3 ve Tablo 4.4’de verilmiştir. Dane dağılımı grafikleri ise Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.2. D=0-1 mm dane çapına sahip kum için yüzde geçen tablosu

Elek açıklığı (mm)	Elek üstü kalan (gr)	Elekten geçen (gr)	% Kalan	% Geçen
37,50	0,0	500,00	0,0	100,0
19,00	0,0	500,00	0,0	100,0
9,50	0,0	500,00	0,0	100,0
4,75	0,0	500,00	0,0	100,0
2,36	0,0	500,00	0,0	100,0
1,18	1,4	498,60	0,3	99,7
0,600	12,0	486,60	2,4	97,3
0,300	294,1	192,50	58,8	38,5
0,150	183,7	8,80	36,7	1,8
0,075	8,2	0,60	1,6	0,1
Tava	0,6	0,00	0,1	0,0

Toplam : 500,00

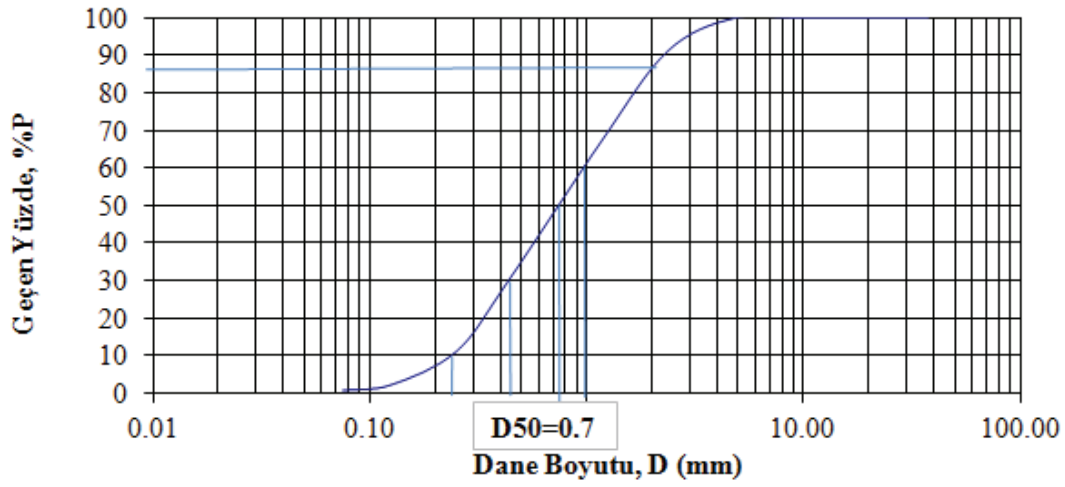


Şekil 4.3. 0-1 mm dane çapına sahip kumda dane dağılımı grafiği

Tablo 4.3. D=0-5 mm dane çapına sahip kum için yüzde geçen tablosu

Elek açıklığı (mm)	Elek üstü kalan (gr)	Elekten geçen (gr)	% Kalan	% Geçen
37,50	0,0	427,50	0,0	100,0
19,00	0,0	427,50	0,0	100,0
9,50	0,0	427,50	0,0	100,0
4,75	0,0	427,50	0,0	100,0
2,36	37,3	390,20	8,7	91,3
1,18	101,4	288,80	23,7	67,6
0,425	164,6	124,20	38,5	29,1
0,250	77,1	47,10	18,0	11,0
0,125	38,2	8,90	8,9	2,1
0,075	6,2	2,70	1,5	0,6
Tava	2,7	0,00	0,6	0,0

Toplam: 427,50



D10= 0.23 D30= 0.43 D60= 0.94 Cu = 4.09 Cc= 0.86

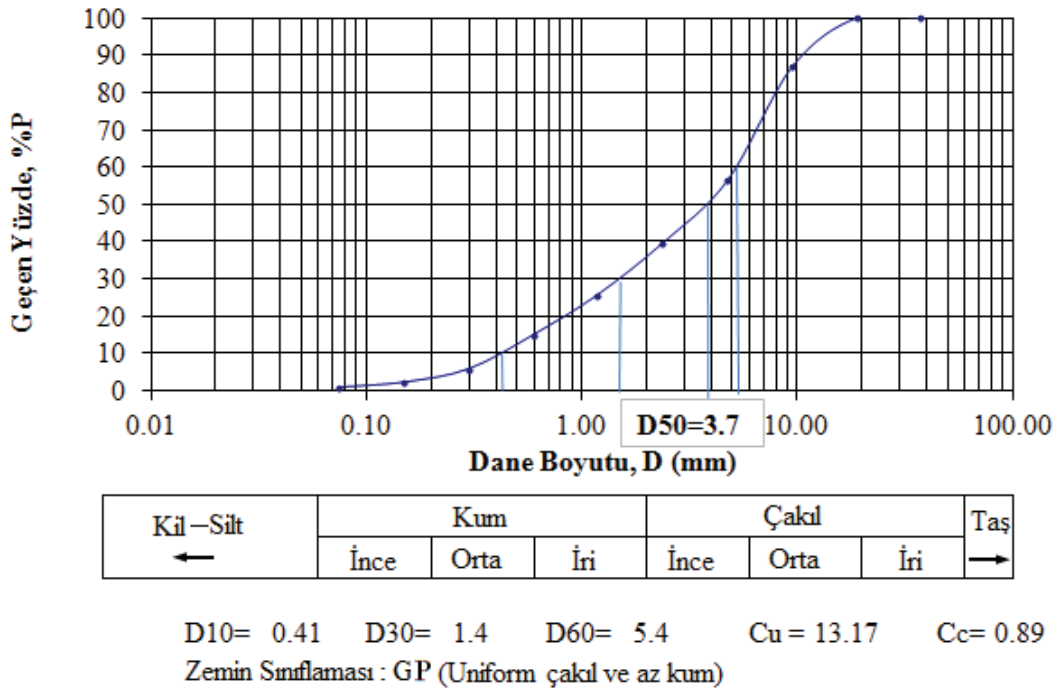
Zemin Sınıflaması : SP (Uniform kum ve az çakıl)

Şekil 4.4. 0-5 mm dane çapına sahip kumda dane dağılımı grafiği

Tablo 4.4. D=0-15 mm dane çapına sahip kum için yüzde geçen tablosu

Elek açıklığı (mm)	Elek üstü kalan (gr)	Elekten geçen (gr)	% Kalan	% Geçen
37,50	0,0	1996,50	0,0	100,0
19,00	0,0	1996,50	0,0	100,0
9,50	259,9	1736,60	13,0	87,0
4,75	611,2	1125,40	30,6	56,4
2,36	338,4	787,00	16,9	39,4
1,18	276,0	511,00	13,8	25,6
0,600	211,6	299,40	10,6	15,0
0,300	183,8	115,60	9,2	5,8
0,150	72,5	43,10	3,6	2,2
0,075	27,0	16,10	1,4	0,8
Tava	16,1	0,00	0,8	0,0

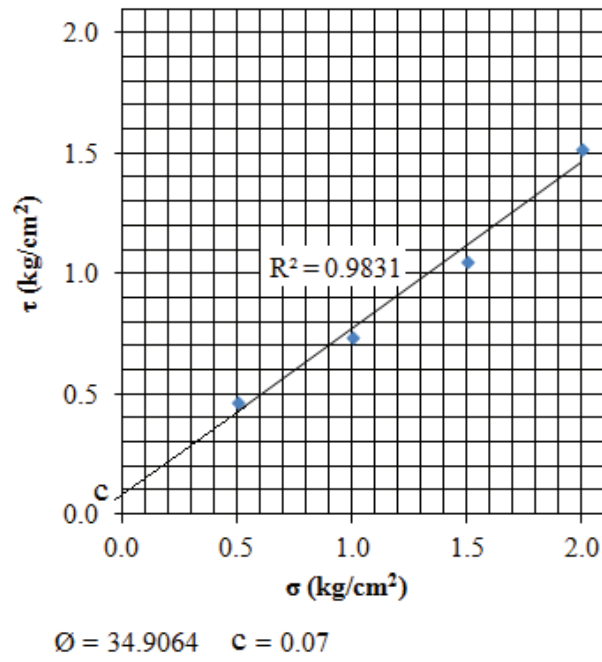
Toplam : 1996,50



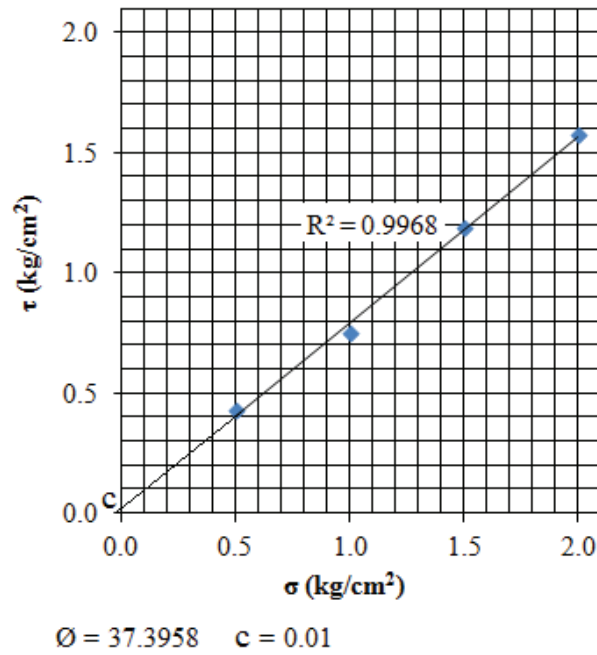
Şekil 4.5. 0-15 mm dane çapına sahip kumda dane dağılımı grafiği

4.4.2. Kesme kutusu deneyi

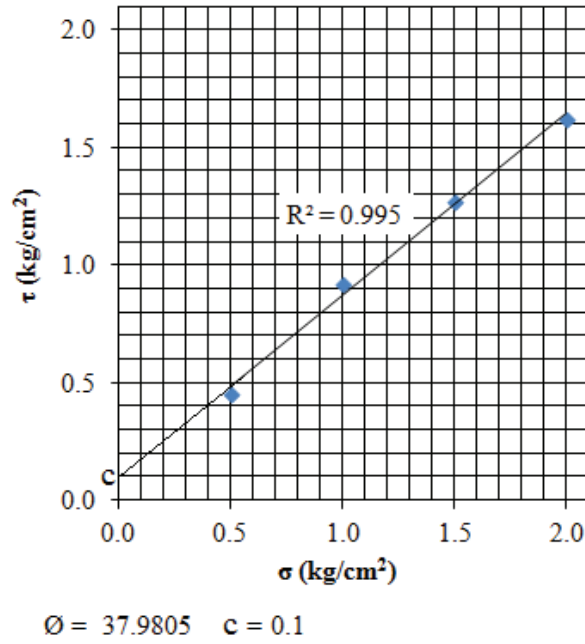
Kullanılan kumların içsel sürtünme açısını (ϕ) ve kohezyonunu (c) belirlemek amacıyla kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Kesme kutusu deneyinde numuneler yaklaşık $D_r \approx 0,60$ sıkılıkta hazırlanmıştır. Yapılan kesme kutusu deneyi grafikleri Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.6. 0-1 mm dane çapına sahip kumda kesme kutusu deneyi grafiği



Şekil 4.7. 0-5 mm dane çapına sahip kumda kesme kutusu deneyi grafiği



Şekil 4.8. 0-15 mm dane çapına sahip kumda kesme kutusu deneyi grafiği

4.5. Model Zemin Ortamının Hazırlanması

Model zemin ortamı olarak hazırlanacak zemin malzemelerinin (kum) öncelikle fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Kullanılacak kum zemin malzemelerine elek analizi, birim hacim ağırlık deneyleri (dane birim hacim ağırlık, gevşek birim hacim ağırlık, sıkışık birim hacim ağırlık), su muhtevası deneyi, kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Kesme kutusu deneyi ASTM D 3080 (1998)'e göre, diğer deneyler TS 1900'e göre yapılmıştır.

Birim hacim ağırlık değerleri ve su muhtevaları belirlenen zemin malzemelerinin, optimum su muhtevasına ulaşması için gerekli su miktarı hesaplanarak zemin malzemesine eklenmiştir. Model zemin ortamlarında homojen su muhtevası dağılımı elde edebilmek için, su eklenerek karıştırılan zemin malzemeleri, biriktirme tankına doldurularak üzeri plastik örtüyle kapatılmıştır. En az 1 gün bekletildikten sonra zemin malzemesi tekrar karıştırılmış ve bir miktar numune alınarak üzeri örtülmüştür. Alınan numuneden hesaplan, malzemenin su muhtevasına göre, %20, %40 ve %60 rölatif sıklıklarda varili doldurmak için gerekli malzeme ağırlıkları hesaplanmıştır. Hesaplanan zemin miktarları Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.5. Öngörülen sıklıklar için hesaplanarak kullanılan malzeme ağırlıkları

Dr (%)	Ağırlıklar (kg)	İnce kum (SP)	İri kum (SP)	Kumlu çakıl (GW)
20	Toplam ağırlık	365,22	379	407,25
	10 cm kalınlık için ağırlık	40,58	42,11	45,25
40	Toplam ağırlık	383,78	392	425,88
	10 cm kalınlık için ağırlık	42,64	43,56	47,32
60	Toplam ağırlık	404,33	406	446,40
	10 cm kalınlık için ağırlık	44,92	45,11	49,60

Model zemin ortamı hazırlamak için varile doldurulacak zemin malzemesinin laboratuvar şartlarında kolay ve homojen bir biçimde sıkıştırılabilmesi için 10 cm kalınlığında 9 tabaka halinde sıkıştırılmasına karar verilmiştir. En alttaki tabaka kalınlığı 9,4 cm tutulmasına rağmen aynı malzeme miktarı kullanılmıştır. Böylece varil tabanındaki esneklik ve düzensizliklerin giderilmesi hedeflenmiştir. Diğerlerinden biraz daha sıkı bu tabakayla, penetrometrenin ulaşmadığı bir noktada referans bir yüzey (varil üstüne yüksekliğin ölçümü için) elde edilmiştir.

Hesaplanan zemin miktarları 10 g hassasiyetli terazide tartılmıştır. Terazide ağırlık ayarı (zemin malzemenin konulacağı kabın darası da dikkate alınarak) önceden yapılarak sabitlenmiştir. Her tabaka için hesaplanan malzeme miktarı terazi üzerine konulan ve darası alınan kovaya doldurulmuştur (Şekil 4.9). Doldurma işlemleri sırasında çevreye plastik örtü serilerek ve işlem sırasında dökülen kum malzeme her defasında toplanarak, tartılan zemin malzemesinin kayıpsız varile aktarılması sağlanmıştır.

Kovadan, kürekle varile aktarılan zemin malzemesi, önce varilde çelik cetvelle gevşek şekilde düzeltilmiştir ve beş noktasından dengede olduğu kontrol edilmiştir (Şekil 4.10). Bu ön kontrol, zemin malzemenin varilde aynı kalınlıkta yayılmasını sağlamak amacıyla yapılmıştır. Kontrol yapılmadığı zaman tabaka yüzeyinde farklı yükseklikler çıkmakta ve bu durum sıklığın homojen ve planlanan düzeyde olmasını tehlikeye atmaktadır.



Şekil 4.9. Bir tabaka için hesaplanan malzemenin tartılması



Şekil 4.10. Bir tabaka için gevşek halde ön tesviye kontrolü

Ön tesviye kontrolü yapılan malzeme, tabaka üst yüzeyinin hedeflenen seviyenin altına düşmemesine özen göstererek dikkatli bir şekilde tokmakla sıkıştırılmıştır. Seviye ve tesviye durumu kontrolü yapılmıştır. Tesviyenin bozuk olması durumunda tesviye durumu yeniden düzenlenmiştir. Tabaka yüzeyi istenilen düzeye gelmediyse tokmakla sıkıştırma işlemi tekrarlanmıştır. Tabaka yüzeyi istenilen düzeyin altına düştüğü durumlarda son tabaka derinliğini geçmeyecek kadar yüzey gevşetilmiştir ve sıkıştırma işlemi yeniden tekrarlanmıştır. Tabaka yüzeyinin terazide olup olmadığı (Şekil 4.11) ve varil üst yüzeyinden derinliğinin (kot) doğru olduğunun kontrolü yapılmıştır (Şekil 4.12).



Şekil 4.11. Tamamlanan tabaka için tesviye kontrolü



Şekil 4.12. Tamamlanan tabaka için kot kontrolü

Diğer tabakalar için de aynı işlemler yürütülerek deneyin yapılacağı, planlanan model zemin ortamı hazırlanmıştır. Hazırlanan zeminin üzerine merkezleme aparatı yerleştirilmiştir ve tahta üzerine sürşarj ağırlıkları yüklenmiştir. Bu işlemlerle su kayıpları önlenmiştir, penetrometrenin batması sırasında yüzeyin kabarması önlenmiştir ve penetrometrenin tam merkezi batması sağlanmıştır.

Varil içinde zemin ortamının hazırlanmasından sonra çerçeve üst kirişi uygun yüksekliğe ayarlanarak teraziye alınmıştır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Çerçeve üst kirişinin teraziye alınması

Deney boyunca da üst kirişin terazide olup olmadığı kontrol edilmiştir. Kiriş teraziye alınarak cıvataları sıkılmıştır ve penetrometre krikonun altına bağlanmıştır. Penetrometre ucu varil ortasına merkezlenmiştir ve düşey konumda olup olmadığı kontrol edilmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Kontrolleri yapılmış başlatılmaya hazır bir deney

4.5.1. Hazırlanan model zemin ortamının özellikleri

Laboratuvarda model zemin ortamları hazırlanmadan önce, kullanılacak kum zemin malzemelerine optimum su muhtevalarına yakın değerler alacak şekilde su ilave edilerek karıştırılmıştır. Kum zemin malzemelerde su muhtevasının homojen gerçekleşmesi için iyice karıştırıldıktan sonra kum malzemelerin üzeri örtülerek en az 24 saat bekletilmiştir.

Bu çalışma kapsamında model zemin ortamlar, $D_r=0,20$, $D_r=0,40$ ve $D_r=0,60$ sıklıklarda varile yerleştirilerek oluşturulmuştur. Öngörülen sıklıkları elde etmek için gerekli zemin miktarları hesaplanmıştır (Bkz. Tablo 4.5). Hesaplanan zemin malzemesi miktarları varile doldurularak model zemin ortamları oluşturulmuş ve bu ortamlara penetrometre batırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda varilin orta bölgesinden alınan temsilci numunelerden su muhtevaları belirlenmiştir. Belirlenen bu su muhtevalarına göre gerçekleşen sıklıklar ve boşluk oranları hesaplanmıştır. Deney sonunda gerçekleşen su muhtevası ve bu su muhtevasına karşılık gelen sıklık ve boşluk oranı değerleri Tablo 4.6’da verilmiştir.

4.6. Deney ve Veri Kaydı

Hazırlıkları ve kontrolleri yapılan deneyin başlatılmasından önce penetrometrenin kablo bağlantıları kontrol edilmiştir. Bilgisayarda TestLAB Basic programı çalıştırılmış ve önceden düzenlenmiş deney seçilmiştir.

Tablo 4.6. Deneylerde gerçekleşen su muhtevası, sıklık ve boşluk oranı değerleri

Zemin sınıfları	İnce kum (SP)			İri kum (SP)			Kumlu çakıl (GW)		
	0-1	0-1	0-1	0-5	0-5	0-5	0-15	0-15	0-15
Dane çapı (mm)	0-1	0-1	0-1	0-5	0-5	0-5	0-15	0-15	0-15
Gerçekleşen su muhtevası (%)	7,5	7,37	7,26	7,5	8,0	8,1	4,45	4,42	4,05
Hedeflenen sıklık (%)	20	40	60	20	40	60	20	40	60
Gerçekleşen sıklık (%)	15,64	29,98	48,13	18,17	33,05	50,23	15,75	36,03	57,88
Gerçekleşen kuru birim hacim ağırlık (kg/cm ³)	1,475	1,535	1,619	1,514	1,558	1,611	1,681	1,758	1,850
Gerçekleşen boşluk oranı	0,803	0,714	0,625	0,841	0,789	0,730	0,616	0,545	0,468

Bilgisayarda deneyin başlatılmasının ardından devre tamamlama kablolarındaki ayarlı dirençlerden görünen elektriksel dirençler sıfıra yaklaştırılmıştır. Bu değerın sıfıra yaklaştırılması zor bir işlem olmakla birlikte deney kalitesi için önem taşımaktadır. Değerin tam sıfırlanması çok önemli olmamakta, fakat değerın çok yüksek olması, Wheatstone köprüsü devresinin kollarında ki eşitliği (dengeyi) bozarak ölçüm hassaslığını azaltmaktadır. Görünen elektriksel direnç başlangıç değerleri sıfıra yaklaştırıldıktan sonra, deneye başlamadan önce program üzerinden de değerler sıfırlanmıştır.

Deneyin yürütmeye hazır olduğu kanaatine varıldıktan sonra, son kontroller yapılmıştır. Hata veya eksiklik olmadığı anlaşıldıktan sonra TestLAB Basic programında deney başlatılmıştır. Programda deney çalışırken kayıt da başlatılmıştır ve penetrometre zemine itilmeye başlanmıştır (Şekil 4.15).

Çalışmada penetrometrenin zemine itilmesinde kriko kullanılmıştır. Kullanılan krikonun maksimum itme yüksekliği (yada derinliği) 162 mm'dir. Bu mesafeye kriko kolu ile 190 defa basılarak ulaşılmaktadır. Her basma işlemi, kriko ucunu (penetrometreyi) 0,8526 mm ilerletmektedir. Grafiklerin incelenmesinden her 10 saniyede 3-27 arası basma işlemi yapıldığı tespit edilmiştir. Bu basma işlemi sayısı Saniyede yapılan basma işlemi sayısına göre hesaplandığında, penetrometre zemine yaklaşık, 0,3-2,3 mm/saniye hızda itilmiştir. Penetrometrenin zemine itilmesi sırasında normal hızlar kullanılmıştır. İlk birkaç deneyde, her bölümün bitiminde ve deney sonundan sonra çok yavaş hızlar kullanılarak hızın etkisi anlaşılmasına çalışılmıştır. Fakat çok yavaş hızların (0,3-1,0 mm/saniye) deney verilerini etkilemediği görülmüştür. Krikonun uzama miktarının sonuna gelindiğinde, kriko boşaltılıp çerçevenin vidaları gevşetilerek üst yükleme krişisi aşağıya alınmıştır. İtme işlemine ara verilen bu sürelerde kayıt alınmaya devam edilmiştir. Grafiklerde, bu hazırlık süreleri çok kolay görülebilmektedir.

Uç direncinin ve genişletme direncinin en büyük değer hesaplarında, grafiklerde oluşan tepelerin üst noktalarının değerleri kullanılmıştır. Sürtünme gerilmeleri ve çevre basınçları ortalama hesaplarında ise itme işleminin yapılmadığı sürelerle isabet eden bölgeler çıkarılarak kalan verilerin ortalamaları alınmıştır.



Şekil 4.15. Penetrometrenin zemine itilmesi

Deney sırasında ilk aşama olarak, krikoyardımyyla penetrometrenin alt bölümü model zemin ortamına itilmiştir (Şekil 4.16).

Penetrometrenin alt bölümü model zemin ortamına girdikten sonra, genişletme bölümü zemin yüzeyine geldiğinde itmeye ara verilmiştir ve programda toplanan veriler, malzemenin dane boyutu, numunenin sıklığı ve penetrometrenin hangi bölümünün batmakta olduğu bilgisini içeren isim verilerek (Örnek olarak; 0-15 mm $D_r=0,40$ 1-alt batana kadar veriler) bilgisayar depolama biriminde (hard disk) açılan ilgili klasöre microsoft office excel formatında aktarılmıştır.

Penetrometre, alt bölümden sonra tamamı batana kadar zemine itilmiştir ve benzer işlemler bu bölüm için de yapılarak kayıt aktarılmıştır (Şekil 4.17). Penetrometrenin tamamı battıktan sonra, ayrı ayrı iki defa 10 cm daha zemine itilerek kayıtlar bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 4.16. Penetrometre ilk bölümünün zemine itilmesi



Şekil 4.17. Penetrometrenin tamamının zemine itilmiş görüntüsü

Zemine itilme işlemleri bittikten ve veriler bilgisayara aktarılarak kaydedildikten sonra krika boşaltılıp vidalar gevşetilmiştir. Deney bittikten sonra, penetrometrenin çevresi boşaltılarak penetrometre model ortamdan çıkarılmıştır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. Penetrometrenin, çevresi boşaltılarak çıkarılması

BÖLÜM 5. BULGULAR ve TARTIŞMA

5.1. Deney Sonuçları

Tasarlanarak üretilen penetrometre, kalibre edildikten sonra, laboratuvar ortamında, özellikleri bilinen zemin malzemesi (kum) ile, farklı sıklıklarda ($D_r=0,20$, $D_r=0,40$ ve $D_r=0,60$) hazırlanan, model zemin ortamlara itilmiştir. Penetrometrenin %60 sıklıktaki zemine itilmesi sırasında, çerçevenin zorlanması nedeniyle daha yüksek sıklıklar denenmemiştir. Penetrometrenin model zemin ortamlara itilmesiyle gerçekleştirilen deneylerde, penetrometre üzerine yerleştirilen ölçüm düzenekleriyle ölçümler alınmış ve zamana bağlı olarak ölçülen değerler veri toplama sistemi yardımıyla bilgisayara aktarılarak kaydedilmiştir.

5.1.2. Direnç ve gerilme değerleri

Hazırlanan penetrometre, laboratuvar ortamında oluşturulan model zemin ortamlarında denenmiştir. Model zemin ortamı hazırlanmasında, $D=0-1$ mm, $D=0-5$ mm ve $D=0-15$ mm dane çaplarında kum zemin malzemeleri kullanılmıştır. Her kum zemin sınıfı için üç farklı sıklık hedeflenerek model zemin ortamı oluşturulmuştur. Üç farklı kum zemin, üçer farklı sıklıkta varile yerleştirilerek, toplamda dokuz çeşit model zemin ortamı hazırlanmıştır. Hedeflenen sıklıklar; $D_r=0,20$, $D_r=0,40$ ve $D_r=0,60$ olmasına karşın hedeflenen sıklık değerleri tam hedeflendiği değerde gerçekleşmemiştir. Gerçekleşen sıklık değerleri, zemin sınıfları ve dane çapı aralığına göre, 4. Bölümde, deneylerde gerçekleşen su muhtevası, sıklık ve boşluk oranı değerleri tablosunda verilmiştir (Bkz. Tablo 4.6).

Hazırlanan model ortamlara penetrometrenin itilmesi sırasında penetrometrenin tasarımında hazırlanan ölçüm düzeneklerinden ölçümler alınmıştır. Penetrometrenin iç cidarının dışında oluşturulan iki ölçüm düzeneği ile penetrometrenin zemine

girerken karşılaştığı uç direnci ve genişletme direnci (daha büyük çaplı ($D=70$ mm) üst bölümün girmesi sırasında penetrometreye zeminin gösterdiği direnç) ölçülmüştür. Ayrıca, her iki sürtünme ceketinin iç yüzeyinde oluşturulan ölçüm düzeneği ile de, sürtünme ceketlerinin zeminde ilerlerken yüzeylerinde oluşan sürtünme gerilmeleri (kayma gerilmesi) ve model ortamın sürtünme ceketinin dış yüzeyine yaptığı basıç gerilmeleri ölçülmüştür. Ölçülen değerler veri toplama sisteminin altı ayrı kanalından bağımsız olarak alınarak bilgisayara kaydedilmiştir. Ölçümlerin alındığı kanallar, penetrometrenin zemine girişi sırasında etkinin başlama önceliğine göre sıralanmıştır; uç direnci 1. kanaldan, genişletme direnci 2. kanaldan, alt sürtünme ceketini yüzeyinde oluşan kayma gerilmesi 4. kanaldan, alt sürtünme ceketini yüzeyinde oluşan çevre basıncı gerilmesi 5. kanaldan, üst sürtünme ceketini yüzeyinde oluşan kayma gerilmesi 7. kanaldan ve üst sürtünme ceketini yüzeyinde oluşan çevre basıncı gerilmesi 8. kanaldan ölçülerek bilgisayara aktarılmıştır.

Deney verilerinin kolay gruplandırılabilmesi ve değerlendirilebilmesi için, her model zemin ortamında yapılan deney, bölümler halinde kaydedilmiştir. Ayrıca deneyin bölümlere ayrılarak kaydedilmesiyle, deneyin bir aşamasında oluşabilecek hataların tüm deney verilerini etkilemesinin önlenmesi hedeflenmiştir. Deney kayıtlarının bölümlere ayrılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde, penetrometre ucunun batma derinliği dikkate alınarak notasyon uygulanmıştır. Penetrometrenin alt bölümünün batması sırasında elde edilen verilere 0-25 ($h=25$ cm), alt bölümden sonra tamamının batması sırasında elde edilen verilere 25-60 ($h=60$ cm), tamamı battıktan sonra penetrometrenin iki defa 10 cm daha zemine itilmesi sırasında elde edilen verilere 60-70 ($h=70$ cm) ve 70-80 ($h=80$ cm) notasyonları verilerek kaydedilmiştir.

Penetrometrenin zeminlere itilmesi sırasında toplanan verilerden elde edilen penetrometre uç direnci, penetrometre genişletme direnci, penetrometrenin alt ve üst sürtünme ceketinde oluşan sürtünme gerilmesi ve çevre basıncı grafikleri tez ekinde verilmiştir. Dane çapı $D=0-1$ mm olan kum zemin malzemesi ile oluşturulan model için elde edilen grafikler Ek A1- Ek A66'da, dane çapı $D=0-5$ mm olan kum zemin malzemesi ile oluşturulan model ortamda elde edilen grafikler Ek B1- Ek B72'de ve dane çapı $D=0-15$ mm olan kum zemin malzemesi ile oluşturulan model ortamda elde edilen grafikler Ek C1- Ek C72'de verilmiştir.

5.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Penetrometrenin, laboratuvarında oluşturulan model zemin ortamlarda denenmesi sırasında elde edilen verilerle hazırlanan grafikler incelenmiştir. Ek A1- Ek C77’de verilen grafiklerin incelenmesinden bazı bulgular elde edilmiştir.

Grafikler kriko hareketlerinden etkilenerek, kriko hareketlerine uyumlu iniş-çıkış yaparak ilerlemiştir. Genel grafik seyrine oranla küçük bu iniş çıkışlar, kolayca ayırt edebilecek şekilde gerçekleşmiştir.

Penetrometrenin alt bölümü batana kadar, uç direnci grafikleri ile genişletme direnci grafikleri birbirine yakın seyretmiştir. Üst bölümün batmaya başladığı andan itibaren genişletme direnci grafiği daha hızlı artış göstererek uç direnci grafiğinden ayrılmıştır. Uç direnci grafiği ile genişletme direnci grafiği arasındaki fark, penetrometre batma derinliği arttıkça artmıştır.

5.2.1. Uç direnci değerleri ile zemin özellikleri ilişkileri

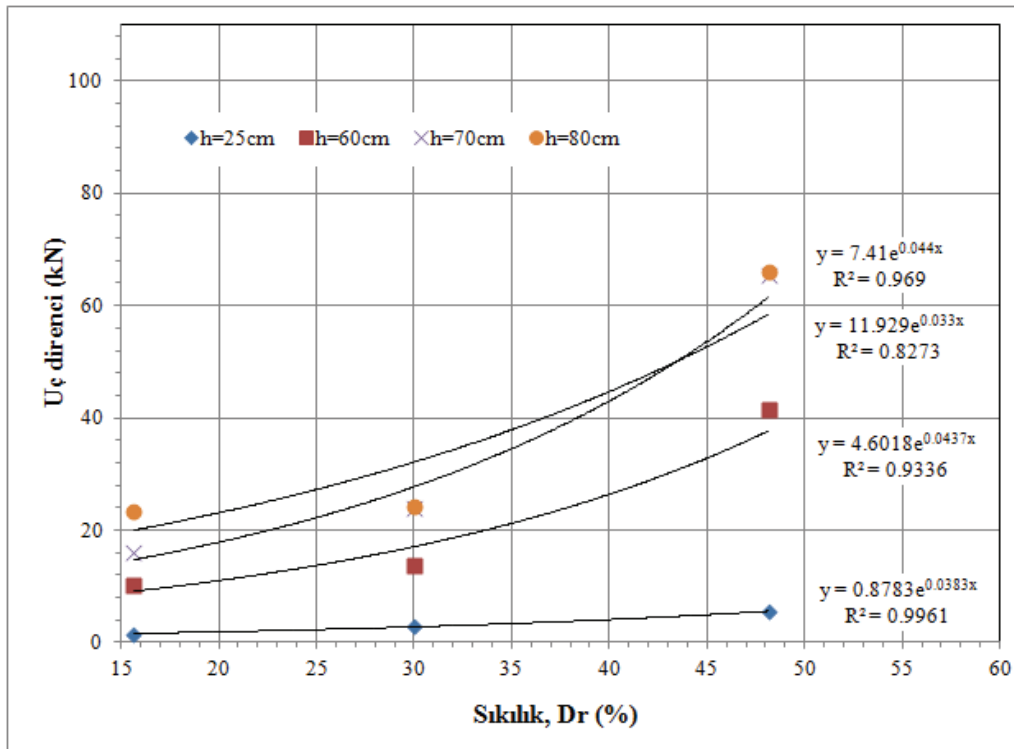
5.2.1.1. Uç direnci – sıklık ilişkisi

Farklı sıklıklarda hazırlanan model zemin ortamlara penetrometrenin itilmesi sırasında, farklı derinliklerde penetrometreden ölçülen maksimum uç direnci değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

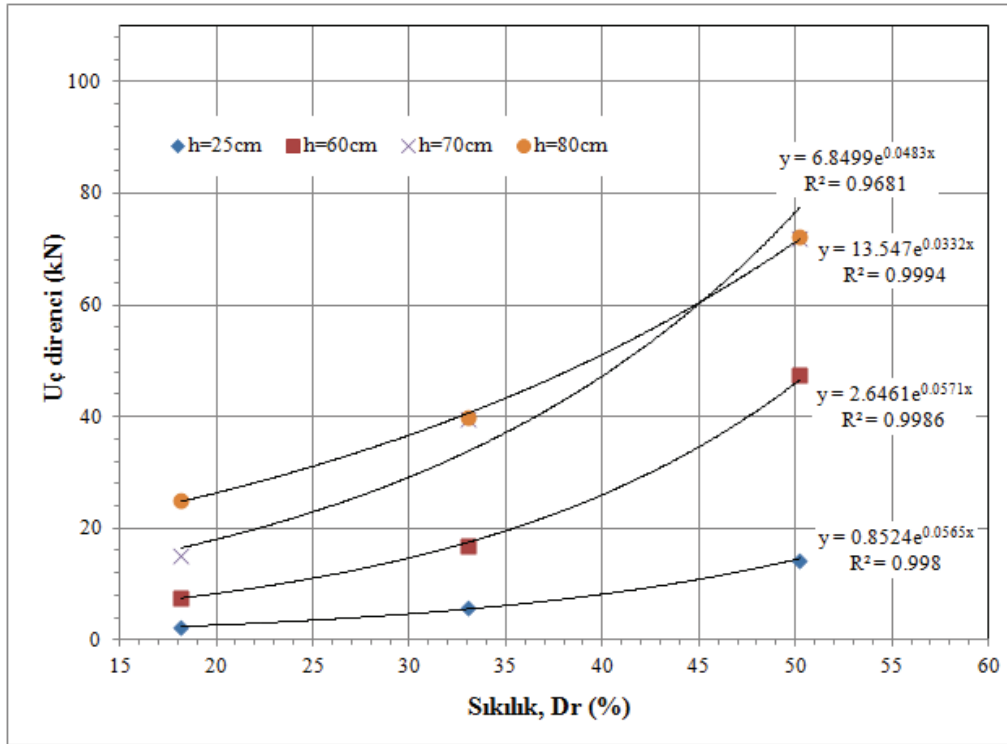
0-1 mm dane çapına sahip zemin malzemesinde, farklı sıklıklarda oluşan uç direnç değerlerinin grafikleri Şekil 5.1, 0-5 mm dane çapına sahip zemin malzemesinde, farklı sıklıklarda oluşan uç direnç değerlerinin grafikleri Şekil 5.2 ve 0-15 mm dane çapına sahip zemin malzemesinde, farklı sıklıklarda oluşan uç direnç değerlerinin grafikleri Şekil 5.3’te verilmiştir.

Tablo 5.1. Farklı sıklıklarda ve derinliklerde ölçülen uç direnci değerleri

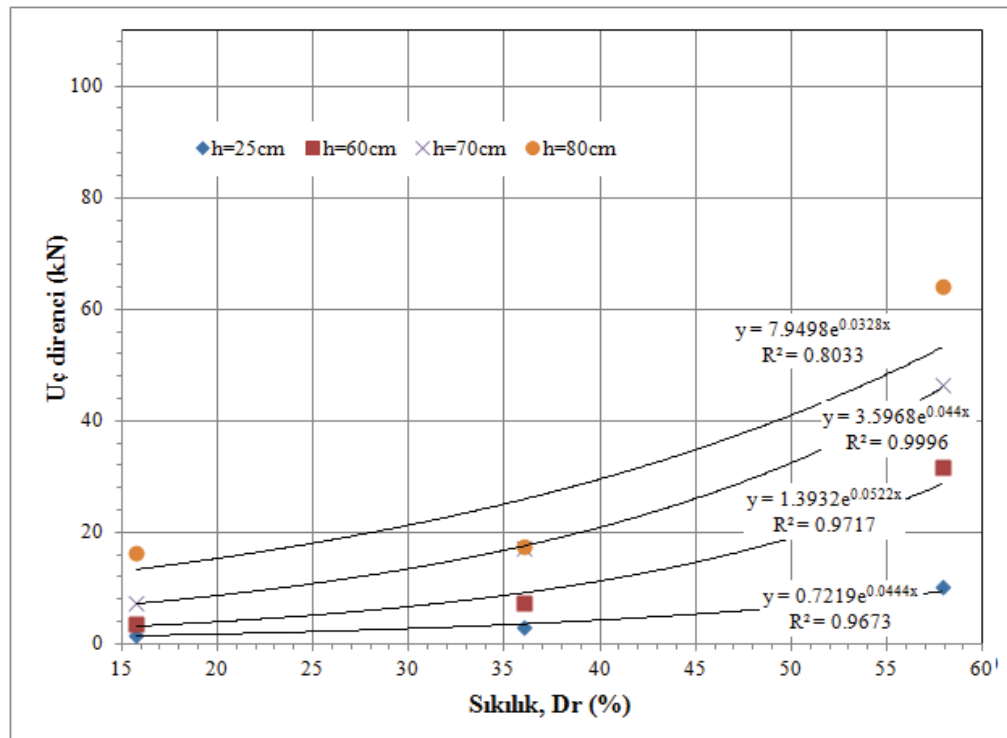
Dane çapı (mm)	Sıklık, D _r (%)	Uç direnci (kN)			
		h=25cm	h=60cm	h=70cm	h=80cm
0-1	15,64	1,56	10,29	16,00	23,41
0-1	29,98	2,36	13,69	23,88	24,18
0-1	48,13	5,19	41,42	65,58	66,17
0-5	18,17	2,32	7,63	15,10	24,96
0-5	33,05	5,78	16,78	39,74	40,00
0-5	50,23	14,24	47,46	71,84	72,29
0-15	15,75	1,61	3,55	7,27	16,36
0-15	36,03	2,93	7,37	17,19	17,47
0-15	57,88	10,37	31,82	46,36	64,24



Şekil 5.1. D=0-1 mm zemin modelinde sıklık-uç direnci ilişkisi grafiği



Şekil 5.2. D=0-5 mm zemin modelinde sıklık-uç direnci ilişkisi grafiği

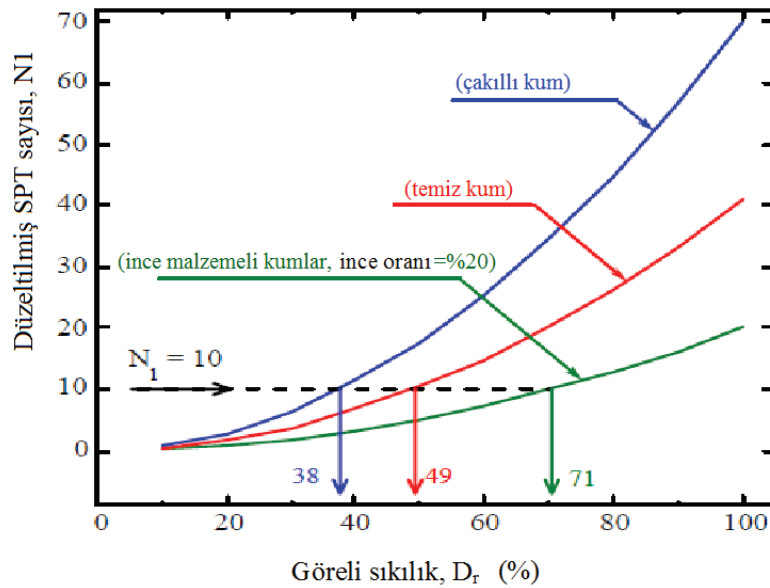


Şekil 5.3. D=0-15 mm zemin modelinde sıklık-uç direnci ilişkisi grafiği

(Cubrinovski ve Ishihara, 2001) kumlu zeminlerde SPT için batma direnci ve görelî sıklık arasında Şekil 5.4'te ki korelasyonu vermiştir. Bu çalışmadan elde edilen grafikler, fonksiyon türü ve şekil olarak (Cubrinovski ve Ishihara, 2001) tarafından verilen grafiğe benzer çıkmıştır. SPT deneyi için, düzeltilmiş SPT sayısı (N_1), SPT kaşığının zemine çakılması için gereken enerjinin ölçüsü olurken, bu çalışmada tasarlanan penetrometreyle ölçülen uç direnci değeri de penetrometrenin zemine itilmesi için gereken kuvvetin ve dolayısıyla enerjinin ölçüsü olmaktadır. Bu çalışmada elde edilen grafikte, birim farkından dolayı düşey ekseninde değerler farklı olmakla birlikte grafik şekli beklendiği gibi, (Cubrinovski ve Ishihara, 2001) SPT için verdiği grafiğe benzer çıkmıştır. Grafiklerin benzerliği ve bu çalışmada elde edilen korelasyon katsayılarının yüksekliği ($R^2=0,84-0,99$) penetrometrenin ve elde edilen grafiklerin kullanışlı olduğunu göstermiştir.

5.2.1.2. Uç direnci - boşluk oranı ilişkisi

Penetrometrenin model ortama itilmesi sırasında ölçülen uç direnci değerleri ile zemin model ortamların hesaplanan boşluk oranı (e) değerleri arasındaki ilişki de incelenmiştir. Model zemin ortamı boşluk oranlarına (e) karşılık ölçülen maksimum uç direnci değerleri Tablo 5.2'de verilmiştir.

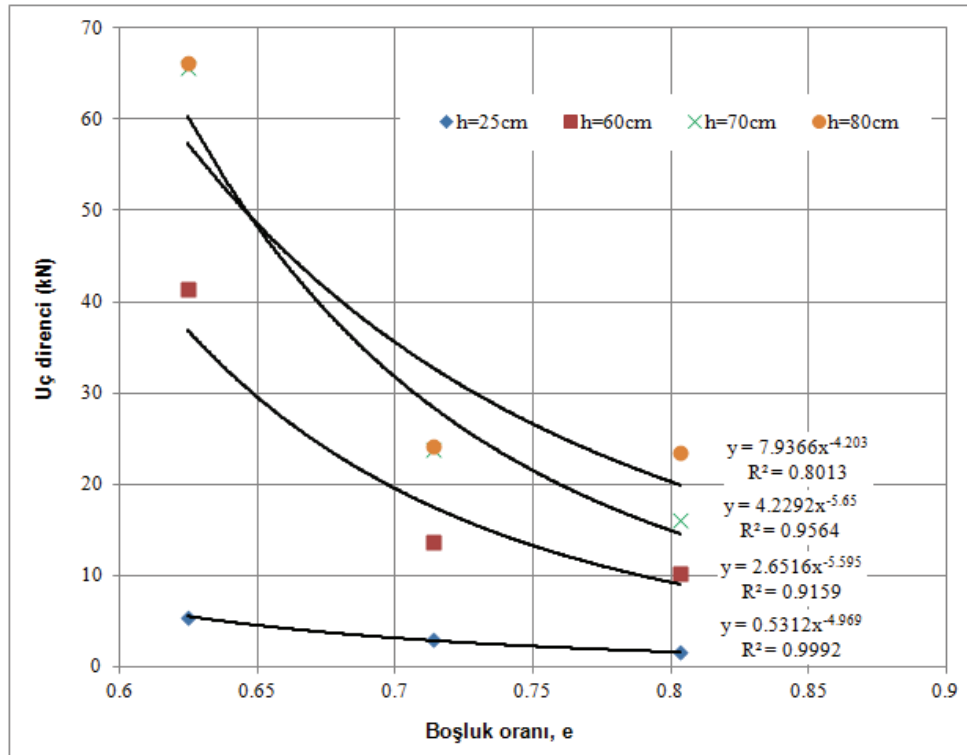


Şekil 5.4. Kumlu zeminlerde SPT batma direnci-görelî sıklık ilişkisi (Cubrinovski ve Ishihara, 2001)

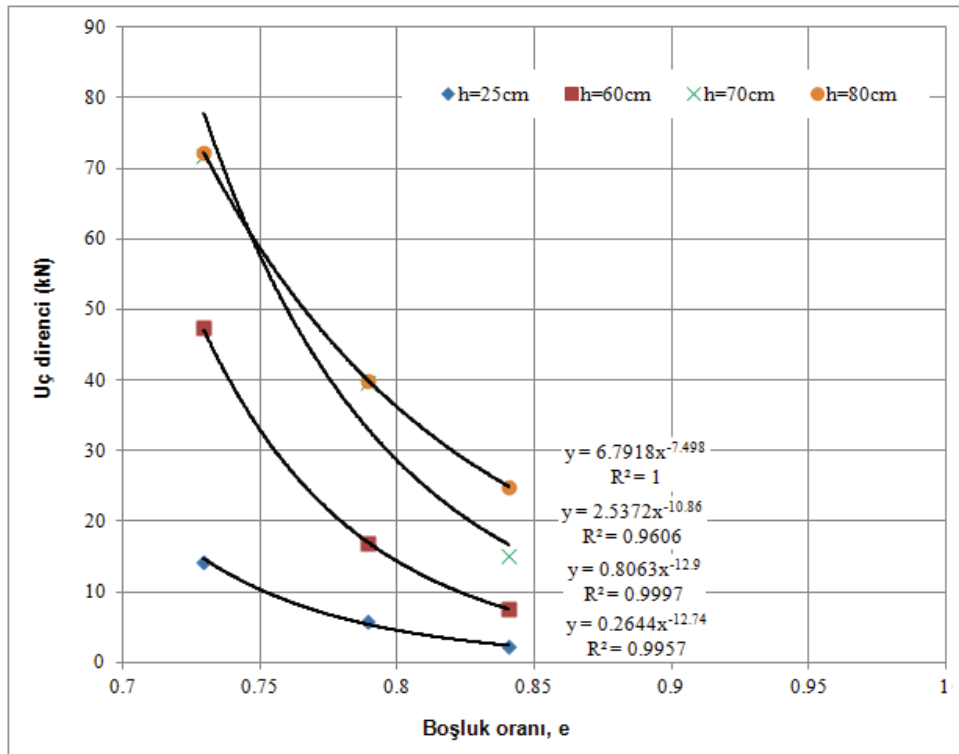
Tablo 5.2. Farklı boşluk oranlarında ve derinliklerde ölçülen uç direnci değerleri

Dane çapı (mm)	Boşluk oranı, e	Uç direnci (kN)			
		h=25cm	h=60cm	h=70cm	h=80cm
0-1mm	0,803272	1,56	10,29	16,00	23,41
0-1mm	0,713644	2,90	13,69	23,88	24,18
0-1mm	0,624653	5,45	41,42	65,58	66,17
0-5mm	0,840768	2,32	7,63	15,10	24,96
0-5mm	0,789165	5,78	16,78	39,74	40,00
0-5mm	0,729569	14,24	47,46	71,84	72,29
0-15mm	0,616105	1,61	3,55	7,27	16,36
0-15mm	0,544924	2,93	7,37	17,19	17,47
0-15mm	0,468224	10,37	31,82	46,36	64,24

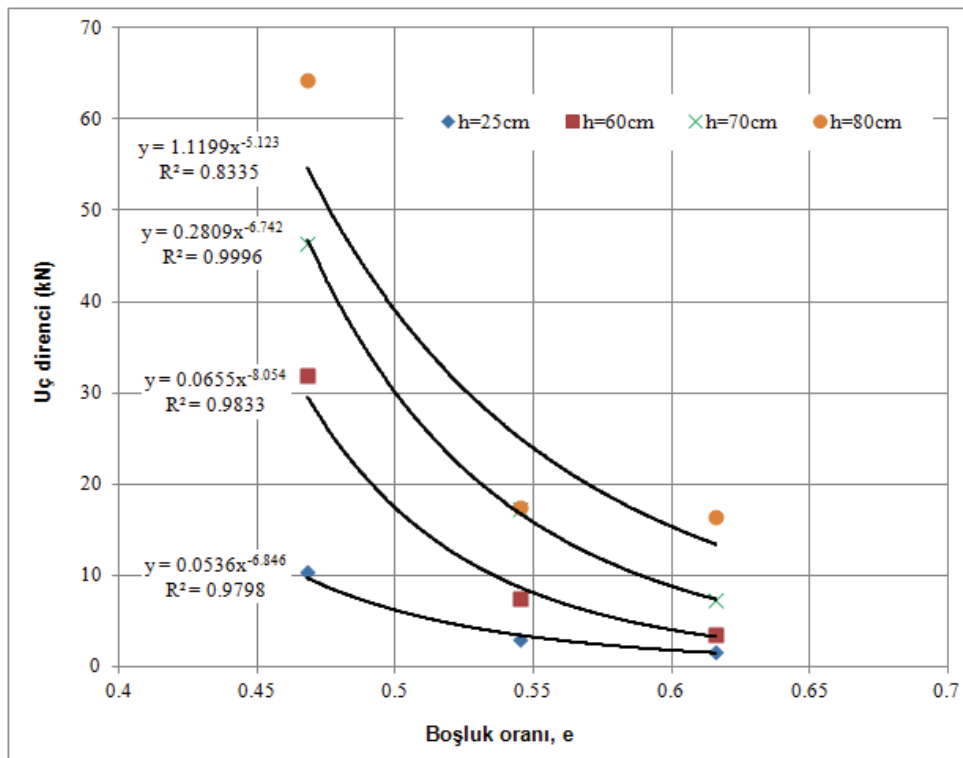
0-1 mm dane çapına sahip zemin malzemesinde, farklı boşluk oranı değerlerinde oluşan uç direnci değerlerinin grafikleri Şekil 5.5, 0-5 mm dane çapına sahip zemin malzemesinde, farklı boşluk oranı değerlerinde oluşan uç direnci değerlerinin grafikleri Şekil 5.6 ve 0-15 mm dane çapına sahip zemin malzemesinde, farklı boşluk oranı değerlerinde oluşan uç direnci değerlerinin grafikleri Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.5. D=0-1 mm zemin modelinde boşluk oranı-uç direnci ilişkisi grafiği



Şekil 5.6. D=0-5 mm zemin modelinde boşluk oranı-uç direnci ilişkisi grafiği



Şekil 5.7. D=0-15 mm zemin modelinde boşluk oranı-uç direnci ilişkisi grafiği

Model zemin ortamlarının boşluk oranı ile penetrometreden ölçülen uç direnci değerleri ilişkisini gösteren grafikler azalan üstel fonksiyon şeklindedir. Zemin ortamlarında boşluk oranı sıklıkla ilişkili olduğundan, uç direnci - boşluk oranı ilişkisi ile uç direnci-sıklık ilişkisi tersi eğilimli fakat benzer çıkmıştır. Ayrıca bu ilişkide de korelasyon katsayılarının yüksekliği ($R^2=0,80-1,00$) elde edilen grafiklerin kullanışlı olduğunu göstermiştir.

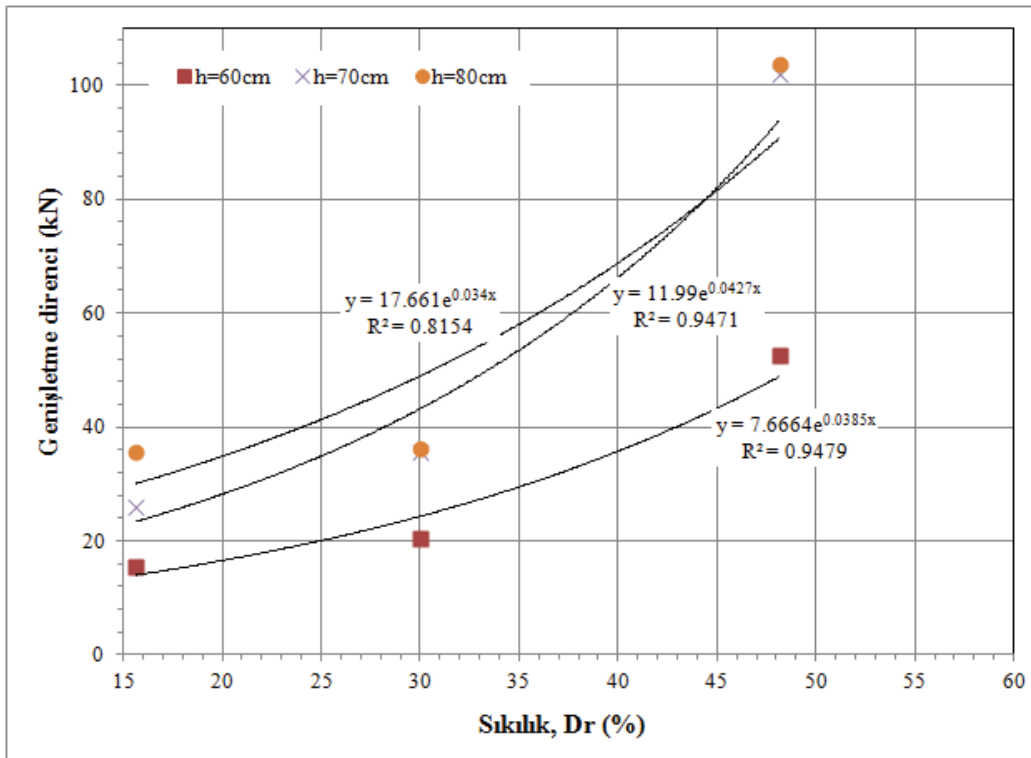
5.2.2. Genişletme direnci değerleri ile zemin özellikleri ilişkileri

5.2.2.1. Genişletme direnci – sıklık ilişkisi

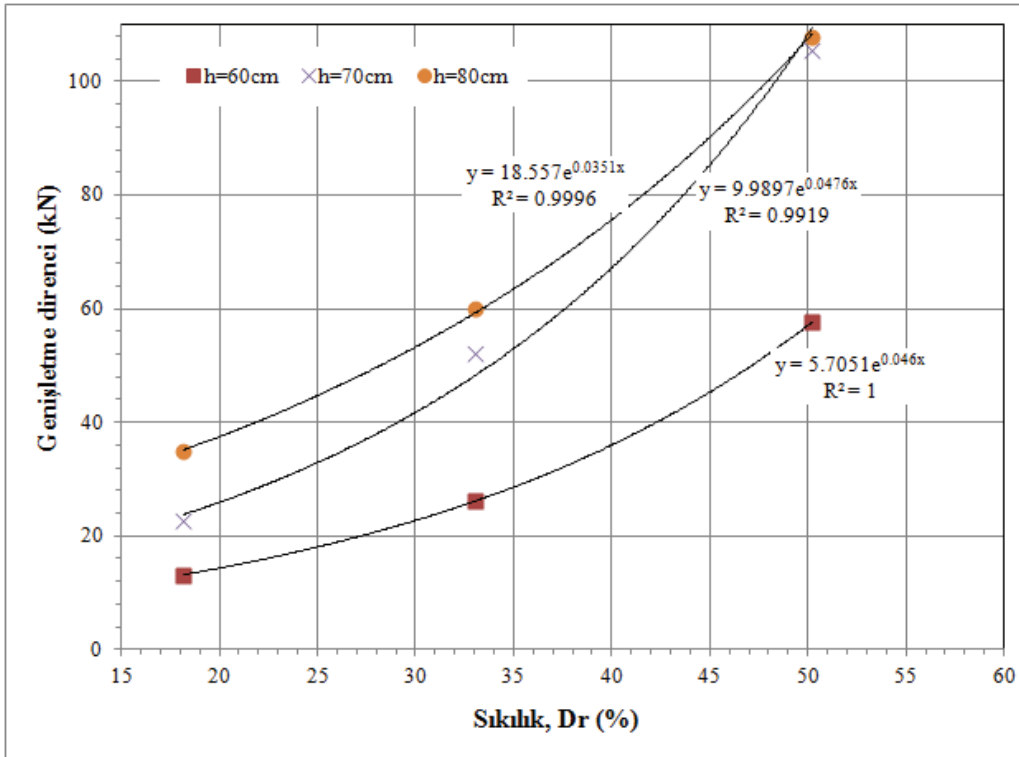
Farklı sıklıklarda hazırlanan model zemin ortamlarına penetrometrenin itilmesi sırasında penetrometreden ölçülen genişletme direnci değerleri topluca Tablo 5.3’de verilmiştir. Farklı sıklıklarda, 0-1 mm dane çapına sahip zemin malzemesiyle hazırlanan, zemin ortamına penetrometrenin itilmesi sırasında penetrometrede ölçülen genişletme direnci değerlerinin grafikleri Şekil 5.8’de, farklı sıklıklarda hazırlanan, 0-5 mm dane çapına sahip zemin ortamlarına penetrometrenin itilmesi sırasında, penetrometrede ölçülen genişletme direnç değerlerinin grafikleri Şekil 5.9’da ve farklı sıklıklarda, 0-15 mm dane çapına sahip zemin malzemesiyle hazırlanan, zemin ortamına penetrometrenin itilmesi sırasında penetrometrede ölçülen, genişletme direnci değerlerinin grafikleri Şekil 5.10’da verilmiştir. Bu ölçümlerde penetrometrenin alt bölümü tamamen batmasından önce genişletme konektörü henüz zemine temas etmediğinden elde edilen veriler dikkate alınmamıştır.

Tablo 5.3. Farklı sıklıklarda ve derinliklerde ölçülen genişletme direnci değerleri

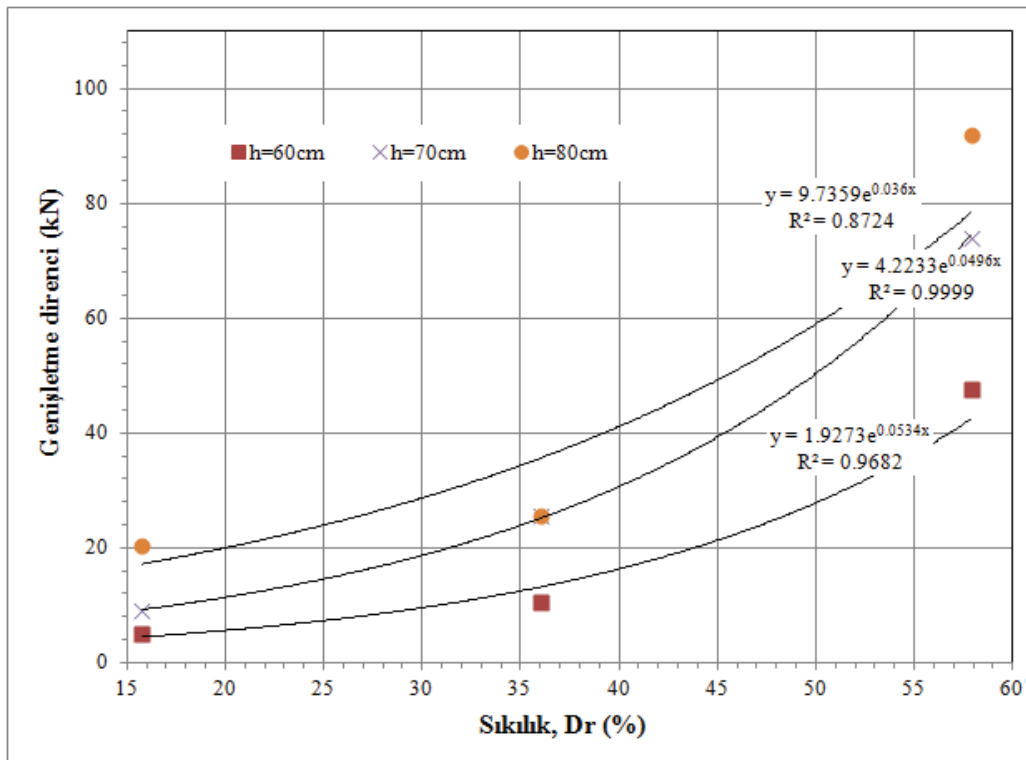
Dane çapı (mm)	Sıklılık, Dr (%)	Genişletme direnci (kN)		
		h=60cm	h=70cm	h=80cm
0-1	15,64	15,38	26	35,6
0-1	29,98	20,51	35,72	36,12
0-1	48,13	52,62	101,91	103,64
0-5	18,17	13,15	22,75	34,9
0-5	33,05	26,2	52,26	60
0-5	50,23	57,55	105,42	107,73
0-15	15,75	5,05	9,16	20,43
0-15	36,03	10,43	25,5	25,5
0-15	57,88	47,49	73,95	92,04



Şekil 5.8. D=0-1 mm zemin modelinde sıklılık- genişletme direnci ilişkisi grafiği



Şekil 5.9. D=0-5 mm zemin modelinde sıkılık- genişletme direnci ilişkisi grafiği



Şekil 5.10. D= 0-15 mm zemin modelinde sıkılık- genişletme direnci ilişkisi grafiği

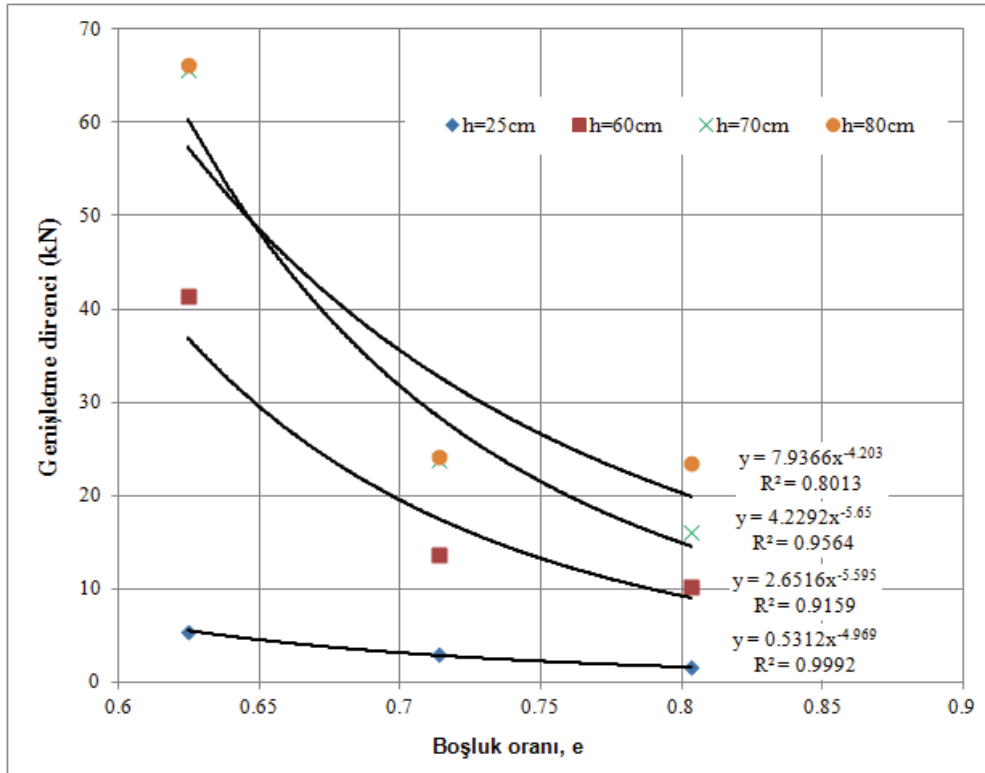
Genişletme direnci-sıkılık ilişkisi, uç direnci-sıkılık ilişkisine benzer olarak üslü fonksiyonlarda en yüksek korelasyon katsayısını ($R^2=0,84-1,00$) vermiştir. Korelasyon katsayılarının yüksekliği, ilişkinin kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Deneylede genişletme dirençleri değerleri uç direnci değerlerinden daha yüksek gerçekleşmiştir. Uç direnci ile genişletme direnci arasındaki farkların sürekli artan bir seyir izlemesi, bu iki değer arasındaki farkın zeminin bazı özelliklerini (D_r , K_o v.b) belirlemede kullanılabileceğini düşündürmüştür.

5.2.2.2. Genişletme direnci - boşluk oranı ilişkisi

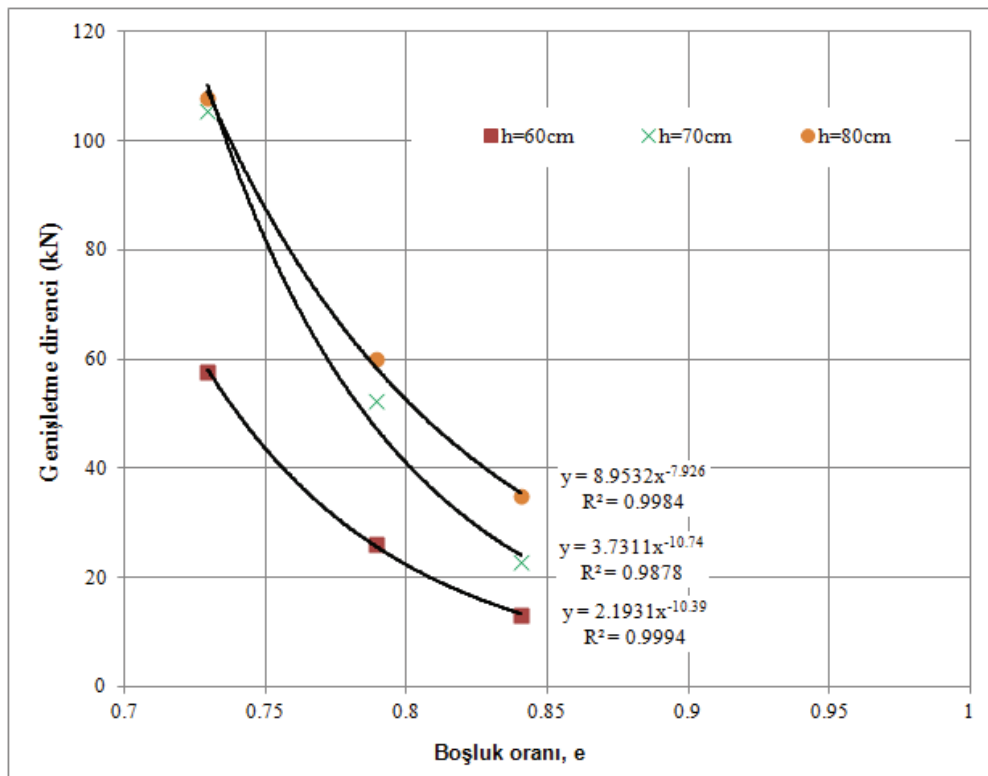
Model zemin ortamının deney sonunda ölçülen su muhtevasına göre hesaplanan boşluk oranı (e) değerleri ile genişletme direnci değerleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Model zemin ortamlarının boşluk oranlarına (e) karşılık gelen genişletme direnci değerleri Tablo 5.4’de verilmiştir. 0-1 mm dane çapına sahip model zemin ortamların boşluk oranlarına karşılık penetrometreden ölçülen genişletme direnci değerleri grafiği Şekil 5.11’de, 0-5 mm dane çapına sahip model zemin ortamların boşluk oranlarına karşılık penetrometreden ölçülen genişletme direnci değerleri grafiği Şekil 5.12’de ve 0-15 mm dane çapına sahip model zemin ortamların boşluk oranlarına karşılık penetrometreden ölçülen genişletme direnci değerleri grafiği Şekil 5.13’de verilmiştir.

Tablo 5.4. Farklı boşluk oranları ve derinliklerde ölçülen genişletme direnci değerleri

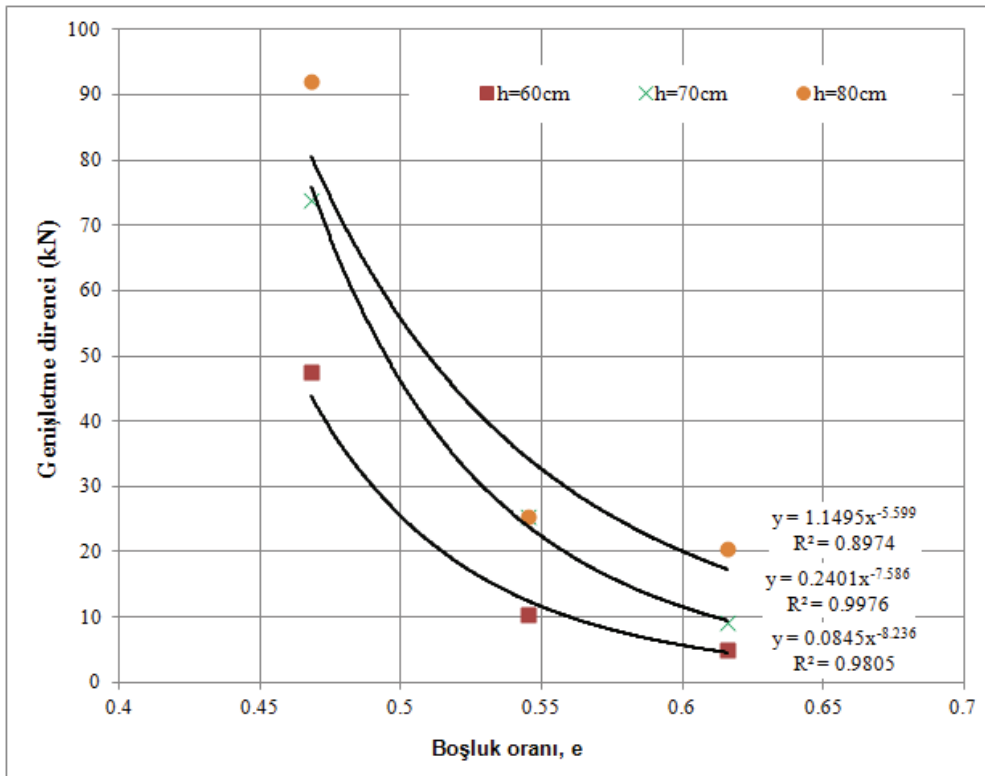
Dane çapı (mm)	Boşluk oranı, e	Genişletme direnci (kN)		
		$h=60\text{cm}$	$h=70\text{cm}$	$h=80\text{cm}$
0-1mm	0,80327	15,38	26	35,6
0-1mm	0,71364	20,51	35,72	36,12
0-1mm	0,62465	52,62	101,91	103,64
0-5mm	0,84077	13,15	22,75	34,9
0-5mm	0,78917	26,2	52,26	60
0-5mm	0,72957	57,55	105,42	107,73
0-15mm	0,61611	5,05	9,16	20,43
0-15mm	0,54492	10,43	25,5	25,5
0-15mm	0,46822	47,49	73,95	92,04



Şekil 5.11. D=0-1 mm zemin modelinde boşluk oranı-genişletme direnci ilişkisi grafiği



Şekil 5.12. D=0-5 mm zemin modelinde boşluk oranı-genişletme direnci ilişkisi grafiği



Şekil 5.13. D=0-1 mm zemin modelinde boşluk oranı-genişletme direnci ilişkisi grafiği

Genişletme direnci-boşluk oranı ilişkisi de, uç direnci- boşluk oranı ilişkisine benzer olarak, üslü fonksiyonda en yüksek korelasyon katsayısını ($R^2=0,80-1,00$) vermiştir. Korelasyon katsayılarının yüksekliği, ilişkinin kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

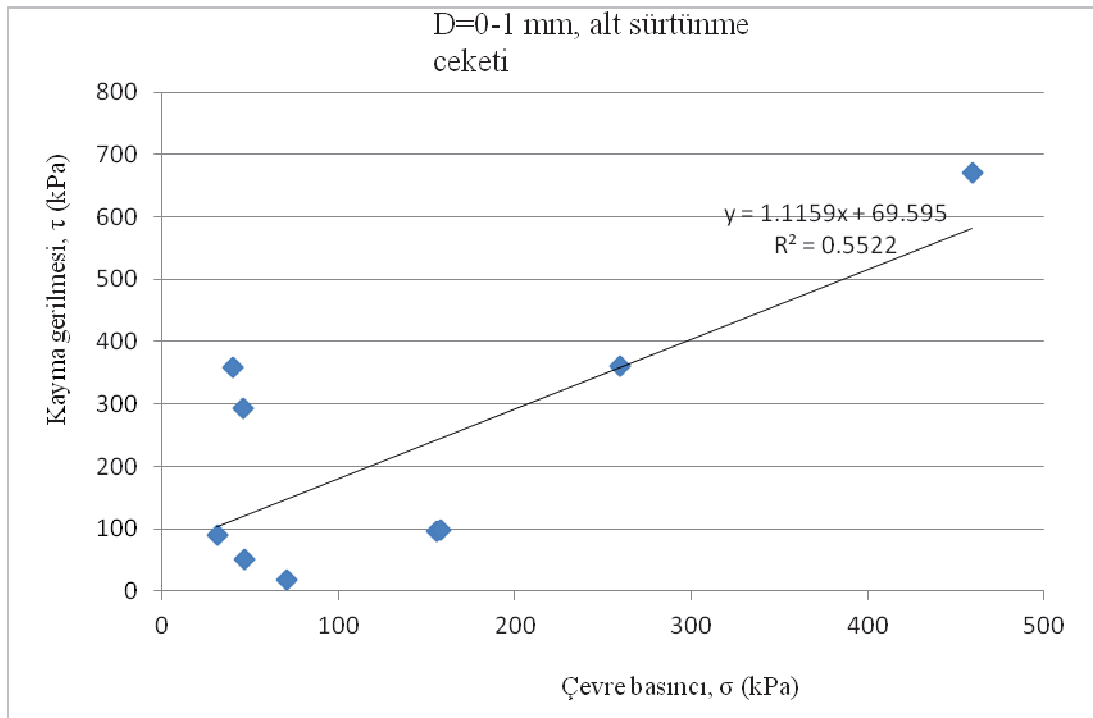
4.2.3. Çevre basıncı ve sürtünme gerilmesi değerleri-zemin özellikleri ilişkileri

Sürtünme ceketlerinde oluşan sürtünme gerilmeleri ve basınç gerilmeleri ile zeminin özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için, öncelikle penetrometreyle ölçülen sürtünme gerilmeleri ile basınç gerilmelerinin ortalamaları alınmıştır. Ortalamalara, penetrometrenin itilmesinin durdurulduğu sürelerde alınan değerler dahil edilmemiştir. Krikonun hareket ettiği, yani penetrometrenin itildiği sürelerdeki değerlerin ortalamaları alınmıştır. Penetrometreden alınan ölçümlerden hesaplanan sürtünme ve basınç gerilmeleri ortalamaları, dane çapı aralığı, model ortamın sıklığı ve batma derinliğine bağlı olarak Tablo 5.5’de verilmiştir.

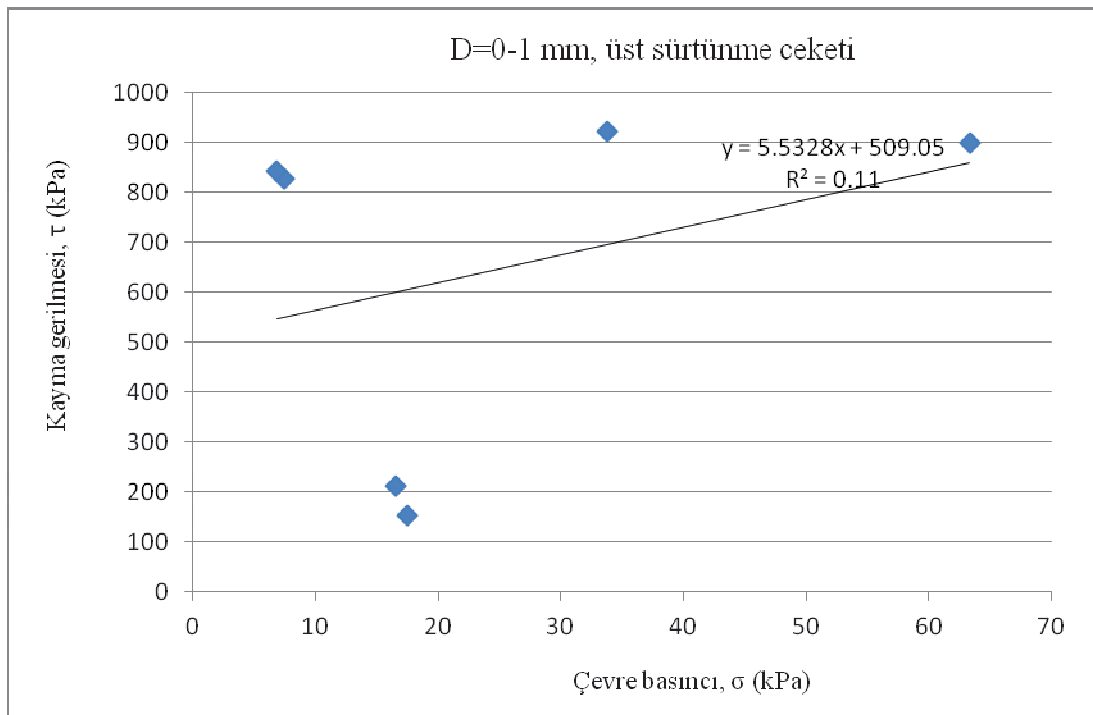
Tablo 5.5. Sürtünme ceketlerinde oluşan çevre basıncı ve sürtünme gerilmesi ortalamaları

Dane boyu (mm)	Sıklık, D_f	Derinlik (cm)	Atl sürtünme ort. (kPa)	Alt basınç ort. (kPa)	Üst sürtünme ort. (kPa)	Üst basınç ort. (kPa)
0-1	15,64	60	46,791	52,070		
		70	155,781	97,179	16,531	211,546
		80	157,722	99,128	17,463	154,903
	29,98	60	70,986	18,656		
		70	40,456	359,200	7,460	826,916
		80	45,850	293,764	6,867	843,485
	48,13	60	31,070	89,382		
		70	259,347	360,592	33,739	921,707
		80	459,251	670,506	63,325	900,128
0-5	18,17	60	408,637	4,435		
		70	549,630	4,154	5,086	100,224
		80	672,618	14,600	4,917	102,669
	33,05	60	222,476	2,184		
		70	1090,106	2,747	3,052	456,849
		80	1298,845	9,073	62,901	548,925
	50,23	60	187,381	8,499		
		70	638,363	23,718	44,169	120,775
		80	2265,965	41,492	33,824	249,339
0-15	15,75	60	17,585	71,840		
		70	41,750	32,579	2,458	12,716
		80	49,625	77,966	1,272	1270,815
	36,03	60	2,794	155,654		
		70	9,472	119,733	3,560	575,682
		80	12,493	29,516	4,154	510,946
	57,88	60	9,742	132,264		
		70	26,916	426,306	6,867	180,334
		80	39,862	141,731	10,173	47,010

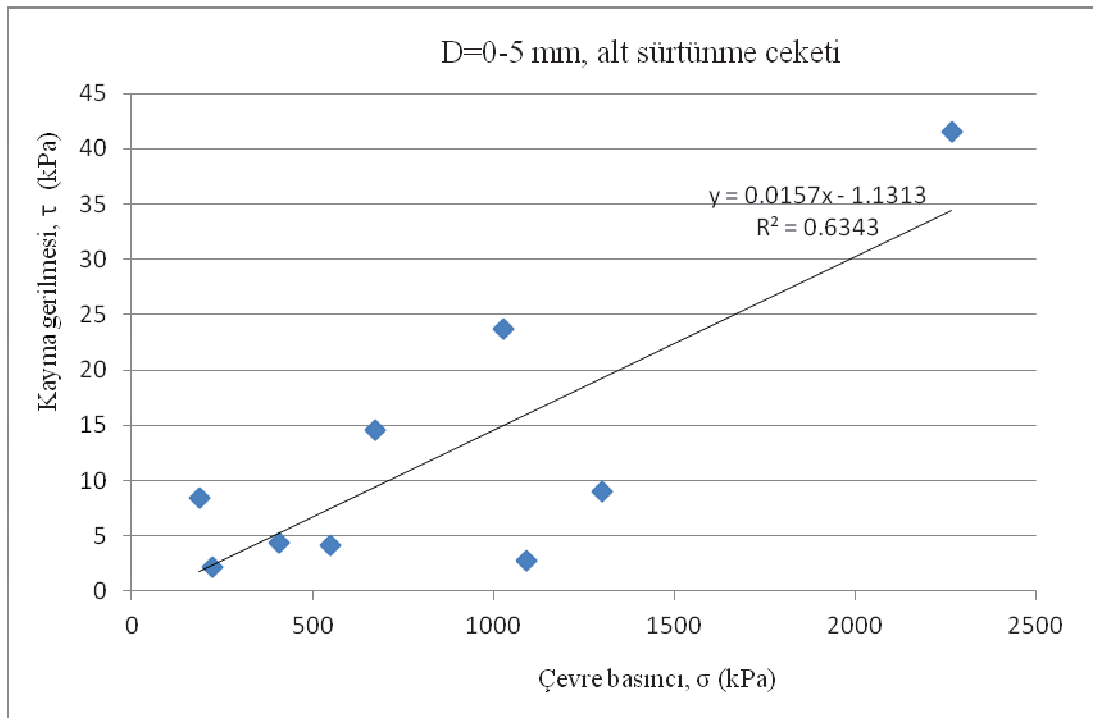
Alt sürtünme ceket ve üst sürtünme ceket için ayrı ayrı basınç-sürtünme grafikleri hazırlanarak basınç gerilmesi-sürtünme gerilmesi ilişkisi incelenmiştir. D=0-1 mm dane çaplı malzeme için, alt ve üst sürtünme ceketinde oluşan basınç gerilmesi-sürtünme gerilmesi değerleriyle oluşturulan grafikler Şekil 5.14 ve 5.15’de verilmiştir. D=0-5 mm dane çaplı malzeme için; alt ve üst sürtünme ceketinde oluşan basınç gerilmesi-sürtünme gerilmesi değerleriyle oluşturulan grafikler Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de verilmiştir. D=0-15 mm dane çaplı malzeme için alt sürtünme ceketinde oluşan basınç gerilmesi-sürtünme gerilmesi değerleriyle oluşturulan grafikler Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’da verilmiştir.



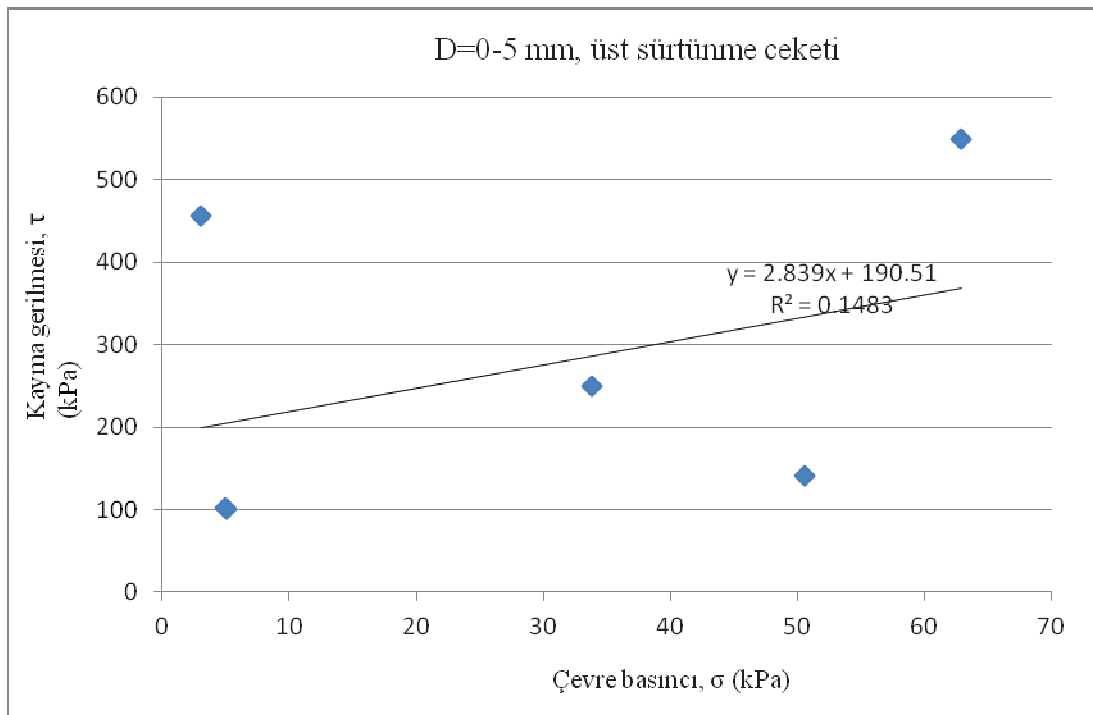
Şekil 5.14. D=0-1 mm zemin modelinde alt sürtünme ceket, çevre basıncı-sürtünme gerilmesi ilişkisi grafiği



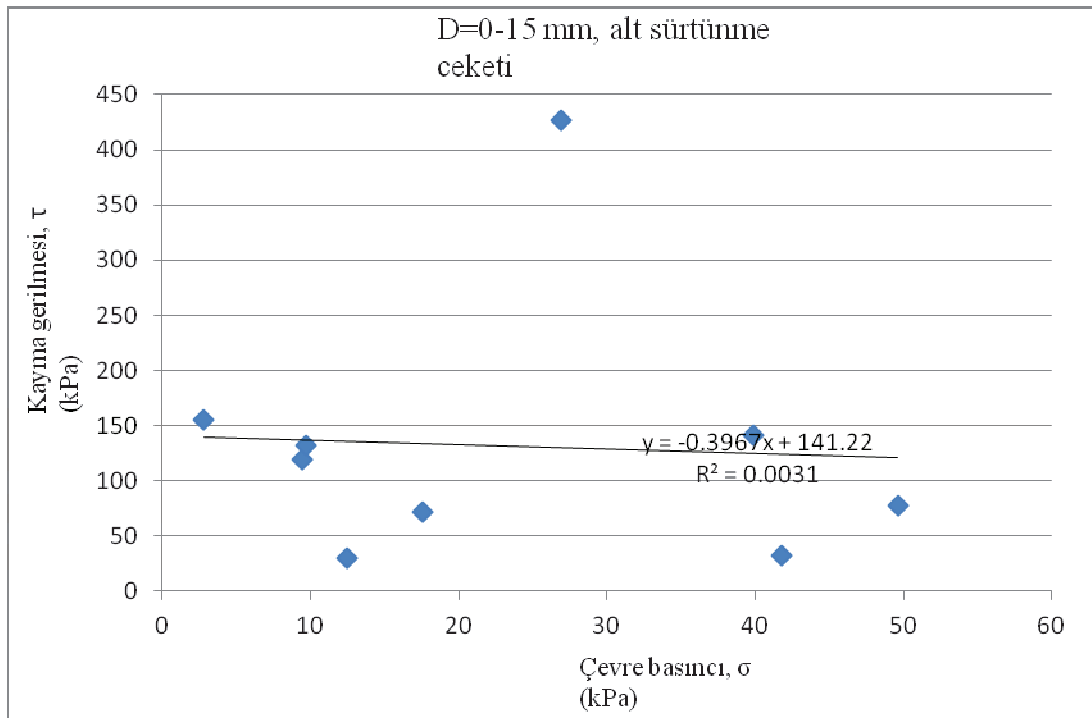
Şekil 5.15. D=0-1 mm zemin modelinde üst sürtünme ceket, çevre basıncı-sürtünme gerilmesi ilişkisi grafiği



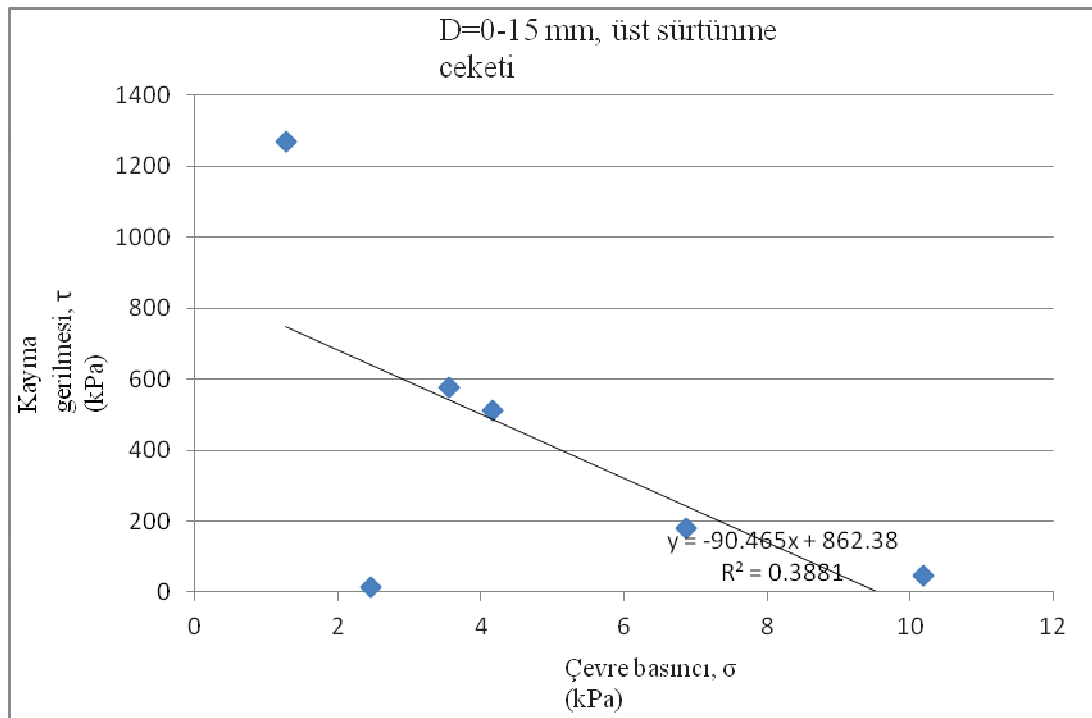
Şekil 5.16. D=0-5 mm zemin modelinde alt sürtünme ceketı, çevre basıncı-sürtünme gerilmesi ilişkisi grafiği



Şekil 5.17. D=0-5 mm zemin modelinde üst sürtünme ceketı, çevre basıncı-sürtünme gerilmesi ilişkisi grafiği



Şekil 5.18. D=0-15 mm zemin modelinde alt sürtünme ceket, çevre basıncı-sürtünme gerilmesi ilişkisi grafiği



Şekil 5.19. D=0-15 mm zemin modelinde üst sürtünme ceket, çevre basıncı-sürtünme gerilmesi ilişkisi grafiği

Model ortamların hazırlanmasında kullanılan malzeme kum olduğundan ($c \approx 0$), basınç gerilmesi-kayma gerilmesi grafiğinde tek nokta ile içsel sürtünme açısı yaklaşık olarak belirlenebilir. Alt ve üst sürtünme ceketleri için ayrı ayrı, çevresel basınca karşılık oluşan kayma (sürtünme) gerilmeleri grafikte işaretlenmiştir. Bu grafiklerde, noktayı orijine bağlayan doğrunun yatayla yaptığı açının, içsel sürtünme açısının katı olacağı düşünülmüştür. Dolayısıyla kum zeminlerde noktaların, içsel sürtünme açısının bir katı açıda (pürüzlendirilmiş sürtünme ceketlerinde 0,94-0,96 katı) ve orijinden geçecek şekilde (kumlarda $c \approx 0$) çizilmiş doğrunun etrafında yer alması beklenmiştir.

Dane çapı $D=0-1$ mm ve $D=0-5$ mm olan kum malzemelerle oluşturulan model ortamlara, alt sürtünme ceketlerinin batması sırasında oluşan çevre basıncı ve sürtünme gerilmesi değerlerinin işaretlenmesi ile oluşturulan grafikler, penetrometrenin teorik olarak tasarlandığı şekilde çalıştığına işaret eden ilişki vermiştir. Bu grafiklerde çıkan korelasyon katsayıları, verilerin kullanılabilir kesin sonuç niteliğinde olmadığını fakat üzerinde çalışılarak iyileştirilebileceğini düşündürmüştür.

Dane çapı $D=0-15$ mm olan çakıllı malzemeye, alt sürtünme ceketinin batması sırasında oluşan çevre basıncı ve sürtünme gerilmesi değerlerinin işaretlenmesi ile oluşturulan grafikler, penetrometrenin teorik olarak tasarlandığı şekilde çalışmadığı ve çıkan korelasyon katsayıları tasarlanan penetrometrenin çakıllarda kullanımının uygun olmadığını düşündürmüştür.

Üst sürtünme ceketlerinin dane çapı $D=0-1$ mm ve $D=0-5$ mm olan kum malzemelere batması sırasında oluşan değerlerle oluşturulan grafiklerde düşük korelasyon katsayısı veren ilişkiler oluştuğu, dane çapı $D=0-15$ mm olan kum malzemelere batması sırasında oluşan değerlerle oluşturulan grafiklerde ise korelasyon kurulamadığı görülmüştür.

Teorik alt yapısında bir sorun görülememesine rağmen sürtünme ceketlerinde oluşan gerilmelerin, içsel sürtünme açısını ve kohezyonu belirlemeye yarayacak bir ilişki vermemesi; penetrometrenin sürtünme ceketlerinde kullanılan borularda, hassasiyeti artırmak amacıyla cidar kalınlıklarının çok ince seçilmesinden kaynaklandığını düşündürmüştür. Ayrıca sürtünme ceketleri cidar kalınlığının az olmasında etkili olduğu sinyal gürültülerinin çok yüksek olmasının da istenilen hedefe ulaşmayı engellediği düşünülmüştür.

Tasarlanan penetrometrenin ölçüm sisteminde strain gauge kullanılmıştır. Strain gaugeler yarım köprü şeklinde yapıştirılarak ve devre tamamlama kablosuyla Wheatstone köprüsü oluşturularak ölçüm yapılmıştır. Ölçümlerde elde edilen veriler, veri toplama sistemi kullanılarak kaydedilmiştir. Penetrometrenin sürtünme ceketlerinin tasarımı değiştirilerek ya da daha kaliteli (gürültülerden daha az etkilenen veya gürültüleri ayıklayabilen) bir ölçüm cihazı kullanılarak daha iyi sonuçlar alınabileceği düşünülmüştür. Sürtünme kuvvetlerinin, sürtünme ceketlerinden değil de CPT de kullanılan sisteme benzer olarak halka tipi bir yük hücresiyle ölçülmesi durumunda daha iyi sonuçlar alınabileceği düşünülmüştür.

Tasarlanan penetrometrenin arazi şartlarına uygunluğu ve zayıflıklarının görülebilmesi için önce zeminlerde (yumuşak kil, sıkı kum ve orta sıklıkta silt) denenerek hataları giderilmiştir. Çalışmanın devamında laboratuvar ortamında üç farklı sıklıkta ($D_r=0,20$, $0,40$ ve $0,60$) hazırlanan üç farklı kum zeminde ($D=0-1$, $0-5$ ve $0-15$ mm) batırılarak zeminin fiziksel özelliklerini belirleme kapasitesi görülmeye çalışılmıştır. Zayıf bölgeleri güçlendirilerek ve ölçüm kalitesini artıracak sistemler eklenerek penetrometre arazi şartlarında kullanılabilir duruma getirilmiştir.

Penetrometrenin tasarımında kullanılan kablolu sistemi, hem kullanım kolaylığı sağlamamakta hemde çevreden gelen sinyal gürültülerinden etkilenerek veri kalitesini bozmaktadır. Günümüzde, arazi şartlarında yaygın olarak kullanılan penetrometrelerin üreticileri, kablolu sistemi kablosuz sisteme dönüştürerek hem kullanım kolaylığı sağlamakta hemde veri kalitesini artırmaktadır. Bu çalışmada tasarlanan penetrometre de kablosuz sistemle çalıştırıldığında, hem kullanım kolaylığı sağlanacağı hemde veri kalitesinin artırılacağı düşünülmektedir.

BÖLÜM 6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Zemin etütlerinin amacı, zemin özelliklerinin sağlıklı bir şekilde belirlenmesidir. Zemin özelliklerinin sağlıklı bir şekilde belirlenebilmesi için, zeminden alınan numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri ve arazide “yerinde” deneyler yapılmaktadır. Arazi deneyleri içerisinde giderek yaygınlaşan CPT, MDT ve MPT ile numune alınamaması ve numune alabilen SPT deneyinden elde edilen verilere çok sayıda düzeltme gerekmesi, bu deneylerin olumsuz yönü olarak görülmektedir.

Bu çalışmada, zemine itilirken numune alan ve bu sırada zemin özelliklerini belirleme maksadıyla ölçümler yapan bir penetrometre tasarlanmıştır. Tasarlanan penetrometre ile sondaj kuyusu tabanından hem numune alınabilmekte ve bu sırada uç direnci, genişletme direnci, sürtünme gerilmesi ve basınç gerilmesi ölçülebilmektedir.

Penetrometre çift cidarlı iki bölüm halinde tasarlanmıştır. Her iki bölümde ortak olan iç cidar, uç direnci ve genişletme direncini, birbirinden farklı çaplara sahip dış sürtünme ceketleri ise sürtünme gerilmeleri ve çevresel basınç değerlerini ölçecek şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada tasarlanan penetrometrenin imalatında 304 paslanmaz çeliği kullanılmıştır. 304 paslanmaz çelik sınıfı, aşınma dayanımı, korozyon dayanımı ve mekanik özellikleri açısından tasarımda aranılan özelliklere istenilen düzeyde sahiptir. Penetrometreye gelen etkiler, penetrometre üzerine yerleştirilen strain gaugeler ile ölçülmüştür.

Tasarlanan penetrometre ile farklı sıklıklarda hazırlanan model zeminlerde yapılan ölçümlerde, zeminlerin sıklığı hakkında değerlendirmeler yapılabileceği anlaşılmıştır. Yapılan ölçümlerde, penetrometre uç direnci ile sıklık değerleri arasında 0,8 ile 1,0 ve genişletme direnci ile sıklık arasında ise 0,82 ile 0,99 aralığında değişen korelasyon katsayıları bulunmuştur. Penetrometre uç direnci ve

genişletme direnci ile model zemin ortamlarındaki boşluk oranları arasında da benzer ilişki olduğu görülmüştür. Penetrometrenin killi zeminlerde kullanımı ile ilgili gerekli deneyler yapılması durumunda, penetrometre uç direnci ile zeminlerin kıvamı arasında da ilişki kurulabileceği düşünülmektedir. Tasarlanan penetrometre ile değişik zeminlerde ölçümler yapılarak zeminlerin sıklılığı veya kıvamı ile ilgili abaklar hazırlanabilir.

Penetrometreyle llen evre basıncı ve sürtünme gerilmesi değerleri arasındaki ilişki, beklendiği gibi içsel sürtünme açısını hesaplamaya yarayabilecek düzeyde bir korelasyon vermemiştir fakat mit verici düzeyde bulunmuştur.

Penetrometrenin tasarımında sürtünme ceketlerinin çapları, basıncı gerilmesi ve sürtünme gerilmesi değerleri farklarının fazla olması için birbirinden olabildiğince farklı seçilmiştir. Yeni araştırmalarda, çaplar bir birine yaklaştırılarak zemine daha kolay itilen ya da çaplar birbirinden daha da uzaklaştırılarak yeni bulgular elde edilebilecek penetrometreler tasarlanabilir. Yeni tasarımlarda, dış çapların birbirinden uzak seçilmesinde, zeminin yenilme riski de göz önünde bulundurulmalıdır.

Penetrometrenin sürtünme ceketlerinin tasarımı değiştirilerek ya da daha kaliteli (gürültülerden daha az etkilenen veya gürültüleri ayıklayabilen) veri toplama sistemi kullanılarak daha iyi sonuçlar alınabileceği düşünülmüştür.

Bu araştırmanın laboratuvar çalışmalarında penetrometre zemine kriko yardımıyla itilmiştir. Bu yöntem kesikli grafikler oluşturmaktadır. Sürekli ve sabit hızda itebilen bir sistemle daha iyi sonuçlar elde edilebileceği düşünülmüştür.

Tasarlanan penetrometrenin arazide kullanımı sırasında numunenin pratik olarak çıkartılması bir problem olarak çözüm beklemektedir. Bu problemin çözümü için, arazide numuneyi bozmadan başka bir tüpe yada kılıfa iten bir düzeneğin tasarımına ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca, penetrometrenin uç kısmı, numune bozulmasını azaltacak Şekilde yeniden tasarlanarak standartlara uygun hale getirilebilir.

Dünyada bu alanda tasarım ve imalat çalışmaları çoğunlukla ticari amaçlı şirketler tarafından ya da ticari şirketlerce desteklenen araştırma kuruluşları tarafından yürütülmektedir. Yeni tasarım çalışmalarına finansal kaynak ve gerekli makine ve teçhizat sağlanmadan başlanılmamalıdır. Yetersiz kaynak ve imkanlar, tasarımın hedeflenen noktaya ya da mümkün olan hedeflere ulaşmasını engellemekte ve gereksiz beyin gücü israfına neden olmaktadır.

KAYNAKLAR

AGARWAL, K.B., The influence of the size and orientation of the sample on the apparent strenght of the London clay, PhD thesis, London University, 1968.

AHMADI, M.M., ROBERTSON P.K., Thin layer effects on the CPT q_c measurement, Canadian Geotechnical Journal 42(5): 1302-1317, 2005.

AJAYI, L.A., BALOGUN, L.A., Penetration Testing in Tropical Lateritic and Residual Soils – Nigerian Experience, Proceedings of the First International Symposium on Penetration Testing, Vol. 1, Orlando, 315-328, 1988.

AKÇA, N., Correlation of SPT-CPT data from the United Arab Emirates, Engineering Geology, V.67, 219-231, 2003.

AL-MHAIDIB, A.I., Influence of Shearing Rate on Interfacial Friction between Sand and Steel, Engineering Journal of University of Qatar, Volume 19, pp.35-50, 1995.

ARAN, A., TEMEL, M.A., Paslanmaz Çelik Yassı Mamüller, Sarıtaş Çelik Ticaret ve Sanayi A.Ş., Teknik Yayın No:12., ISBN975-92326-0-X, Acar Matbaacılık A.Ş., İstanbul, 2004.

ARKUN, E., Paslanmaz Çelik Saçlarda Şekillendirme Karakteristikleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2006.

AVNER, S.H., Introduction to Physical Metallurgy, McGraww-Hill, London, 1974.

BAGUELIN, F., JEZEQUEL, J.F., LEMEE, E. and LE MEHAUTE, A., Expansion of Cylindrical Probes in Cohesive Soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 98, No. SM 11, 1129-1142, 1972.

BAGUELIN, F., Rules of Foundation Design using Self-Boring Pressuremeter Test Results, Symposium on the Pressuremeter and its Marine Applications, Institut français du pétrole, Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris, 1985.

BAGUELIN, F., JEZEQUEL, J.F. and SHIELDS, D.H., The Pressuremeter and Foundation Engineering, Transtech Publications, Clausthal, Germany ISBN O-87849-019-1, 1978.

BALDI, G., BELLOTTI, R., GHIONNA, V., JAMLOLKOWSKI, M. and PASQUALINI, E., Design parameters for sands from CPT, Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, Holland, 1982.

BALDI, G., BELLOTTI, R., GHIONNA, V., JAMLOLKOWSKI, M. and PASQUALINI, E., Interpretation of CPT and CPTUs, 2nd part: Drained penetration of sands, Proc. 4th Int. Geotech. Seminar, Singapore, 143-156, 1986.

BALIGH, M.M., Strain path method, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division., Am. Soc. Civ. Engrs., 111 (GT9),1108-1136, 1985.

BALIGH, M.M., AZZOUZ, A.S. and CHIN, C.T., Disturbance due to ideal tube sampling, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division., Am. Soc. Civ. Engrs, 113 (GT7), 739-757, 1987.

BARTLETT, A.H., HOLDEN J.C., Sampling and in situ testing equipment used by the country roads board of Victoria evaluating the foundations of bridges and embankments, Proc. Conf. Aust. Road Res. Board, 4th, 4(2):1723-1742, 1968.

Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Bina ve Bina Türü Yapılar İçin Zemin ve Temel Etüdü Raporu Genel Formatı, Yapı İşleri Genel Müdürlüğü, 10/08/2005 tarih ve B.09.0.Y.İ.G.0.13.00.09-13/815 Sayılı yazısı eki, Ankara, 2005.

BEGEMANN, H.K.S., A new method for taking of samples of great length, Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech and Found. Eng., Paris, Volume 1, pp. 437-440, 1961.

BEGEMANN, H.K.S., The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile, Proc. 6th Int. Conf. Soil. Mech. and Found. Eng., Volume 1, pp. 17-20, Montreal, 1965.

BENSON, C.H., DANIEL, D.E., Influence of clods on hydrolic conductivity of compacted clay, Journal of Geotech. Engi. ASCE 96:GT4:1171, 1990.

BIEGANOUSKY, W.A., MARCUSON, W.F., Liquefaction Potential of Dams and Foundations; Report 1, Laboratory Standard Penetration Tests on Reid Bedford Model and Ottawa Sand," Research Report S-76-2, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Miss., Oct. 1976.

BISHOP, A.W., LITTLE, A.I., The influence of the size and orientation of sample on the undrained strenght of the London clay, PhD thesis, London University, London, 1967.

BJERRUM, L., Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils, State-of-the-art report, Sezon IV, Proc. 8th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Bölüm 3, s. 111-159, Moskov, 1973.

BOYLAN, N., LONG, M., Characterisation of peat using full flow penetrometers, Soft Soil Engineering - Chan & Law (eds), Taylor & Francis Group, ISBN13 978-0-415-42280-2, London, 2007.

BRATCHELL, G.E., LEGGATT, A.J. and SIMONS, N.E., The performance of two large oil tanks founded on compacted gravel at Fawley, Southampton, Hampshire, Proc. BS Conf. on Settlement of Structures, Cambridge, Pentech Press, London, pp. 3-9, 1975.

BROMS, B.B., FLODIN, N., History of soil penetration test, J De Ruiter, Editor, Penetration Testing, Proceedings of the first International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, , Balkema, Rotterdam (1988), pp. 157–220, 1988.

BOSSCHER, P.J., ORTIZ, C., Frictional Properties between Sand and Various Construction Materials, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 9, pp. 1035-1039, 1987.

BRATCHELL, G.E., LEGGATT, A.J. and SIMONS, N.E., The performance of two large oil tanks founded on compacted gravel at Fawley, Southampton, Hampshire, Proc. BS Conf. on Settlement of Structures, Cambridge, Pentech Press, pp. 3-9. B, London, 1975.

BURLAND, J.B., BURBIDGE, M.C., Settlement of foundations on sand and gravel, Proc. ICE, Part 1,78,1325-1371, 1982.

CAMPANELLA, R.G., ROBERTSON, P.K., State of the Art in In-situ Testing of Soils: Developments since 1978, Engineering Foundation Conference on Updating Subsurface Sampling of Soils and Rocks and their In-situ Testing, Santa Barbara, California, 1982.

CASAGRANDE, A., The determination of preconsolidation load and its practical significance, 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Harvard, Volume 3, s. 60-64, 1936.

CHIN, C.T., DUANN, S.W. and KAO T.C., SPT-CPT Correlations for granular soils, 1st Int. Symposium on Penetration Testing Vol. 1 s. 335-339 , Orlando, 1988.

CLARKE, B.G., Pressurimeters In Geotechnical Design, Cambridge University Press, ISBN 0 7514 0041 6, 1995.

CLARKE, B.G., ALLAN, P.G., A self-boring pressuremeter tor testing weak rock, Proc.12th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Volume 1, pp. 211-214, 1989.

CLAYTON, C.R.I., SIMONS, N.E. and INSTONE, S.J., Research on dynamic penetration testing of sands, Proc. ISOPT-1, Volume 1, pp. 415- 422, 1988.

CLAYTON, C.R.I., SPT Energy Transmission: Theory, Measurement and Significance, Ground Engineering, 23, 10, 35-43, 1990.

CLAYTON, C.R.I., MATTHEWS, M.C. and SIMONS, N.E., Jeoteknik Saha İncelemesi, 1995, Tercüme: Gazi Kitabevi, 2005.

CODUTO, D.P., Temel Tasarımı, İlkeler ve Uygulamaları, 1994, 2001, Tercüme: Gazi Kitabevi, 2005.

COLOMBIER, L., HOCHMANN, J., Stainless and Heat Resisting Steels, Edward Arnold Publishers Ltd., London, 1965.

CONNOR, I.G., A study of soil structure interaction with particular reference to sugar silos, MS dissertation, University of Surrey, 1980.

CUBRINOVSKI, M., ISHIHARA, K., Kumlu zeminlerde batma direnci ve görelî sıklık arasında korelasyon, 15. Uluslararası Zemin mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Konferansı, 393-396, İstanbul, 2001.

DANZIGER, B.R., DE VELLOSO, D.A., Correlations between the CPT and SPT for some Brazilian soils, Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT '95, vol. 2 Swedish Geotechnical Society, Linköping, Sweden, pp. 155–159, 1995.

DANZIGER, F.A.B., POLITANO, C.F. and DANZIGER, B.R., CPT-SPT correlations for some Brazilian residual soils, Geotechnical Site Characterization, 907-912, Balkema, Rotterdam, 1998.

DE ALENCAR VELLOSO, D., O ensaio de diepsondeering e a determinacao da capacidade de cargo do solo, Rodovia, 29, 1959.

DE BEER, E.E., MARTENS, A., Method of computation of an upper limit for the influence of heterogeneity of sand layers on the settlement of bridges, 4th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Volume 1, pp. 275-281, London, 1957.

DAVIS, J.R., ASM speciality handbook: Stainless steels, 577 S., ASM International, Materials Park, Ohio, 1994.

DUNNICLIFF, J., Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, John Wiley & Sons, New York, 1998.

DURGUNOĞLU, H.T., TOĞROL, E., Penetration testing in Turkey: State-of-the-art report, ESOPT, s.137, 1974.

DURGUNOĞLU, H.T., MITCHELL, J.K., Static penetration resistance of soils: I Analysis, II Evaluation of Theory and Implications for Practice, Proc. ASCE Symp. on In-Situ Measurements of Soil Properties, Rayleigh, Volume 1, pp. 151-171, 1975.

EMREM, C., DURGUNOĞLU, H.T., Türkiye CPT veri tabanı ve mevcut amprik bağıntılar ile karşılaştırma, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi, İstanbul, 2000.

EMREM, C., DURGUNOĞLU, H.T., Türkiye CPT Veri Tabanı ve Mevcut Ampirik Bağlıntılar ile Karşılaştırma, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2000.

FARRAR, J.A., TORRES, R., and CRUTCHFIELD, L.G., Cone penetrometer testing, Scoggins Dam, Tualatin Project, Oregon. Engineering Geology Group Bureau of Reclamation, Technical Services Center, Denver, Colo. Report No. 86-68320, 2008.

FIRAT, M., Isıl işlemlerin AISI 304,310,316 ve 430 tip paslanmaz çeliklerin sulu ortamdaki korozyon davranışlarına etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, s.15-21, 1998.

FRYDMAN, S., Discussions on SPT, *Geotechnique*, 20(4): 454-455, 1970.

GAMSKI, K., Appareil léger de penetration en profondeur, *Penetrometre GC Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Paris, 1:467-470, 1961.

GAWITH, A.H., BARTLETT, A.H., Deep-sounding cone penetrometer and discussions, *Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation*, 4th, Australia, 1: 8-11, s.287-292, 1963.

GIBSON, R.E., ANDERSON, W.F., In situ measurement of soil properties with the pressuremeter, *Civil Engineering and Public Works Review*, 56 (658), 615-618, 1961.

GODSKESEN, O., Investigation fort the bearing power of the subsoil with 25 by 25 mm pointed drill weighted with 100 kg without samples, *Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, I: 311-314, Cambridge, 1936.

GODSKESEN, O., *Penetrometre a main*, *Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Zurich, 3: 137-138, 1953.

HAIJ, A.R., The simulation of sampling disturbance and its effects on the enformation of behaviour of clays, PhD thesis, University of Sheffield, 1990.

HANSBO, S., New approach of the shear strength of clay by the fall cone test, *Proceedings, Royal Swedish Geotechnical Institute*, 14, 1957.

HARPER, H.J., An improved soil sampling tube, *Soil Science*, s. 65., 1931.

HENDERSON, G., SMITH, P.D.K. and STJOHN, H.D., The development of the push-in pressuremeter for offshore site investigation, *Proc. Conf. on Offshore Site Investigation, Society for Underwater Technology*, pp. 157-167, London, 1979.

HOOPER, R.J., The effects and implicationsof sampling clay soils, PhD thesis, Surrey University, England, 1992.

HORN, H., North American Experience in Soil Sampling and its Influence on Dynamic Laboratory Testing, Preprint, Symposium on Soil Sampling and its Importance to Dynamic Laboratory Testing, ASCE National Convention, s.111., Chicago, 1978.

HORN, H.M., North American Experience in Sampling and Laboratory Dynamic Testing, ASTM Geotechnical Testing Journal, 2, 2, 84-97, 1979.

HUGHES, J.M.O., ERVIN, M.C., Development of a high pressure pressuremeter for determining the engineering properties of soft to medium strength rocks, Proc. 3rd ANZ Conf. NZ, 1, 243-247, Wellington, 1980.

HVORSLEV, M.J., Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purposes, Waterways Experimental Station, Vicksburg, 1949.

İYİSAN, R. ve ANSAL, A., SPT-N Darbe sayıları ile Kayma Mukavemeti İlişkisi, Zemin Mek. ve Temel Müh. 3. Ulusal Kongr., Boğaz. Üni., II. Cilt, İstanbul, 1990.

İYİSAN, R., Geoteknik Özelliklerin Belirlenmesinde Sismik ve Penetrasyon Deneylerinin Karşılaştırılması, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1994.

JEFFERIES, M.G., DAVIES, M.P., Use of CPTU to estimate equivalent SPT N60, Geotechnical Testing Journal, 16(4): 458-468 Cross Ref., 1993.

JENSEN, M., Civil engineering around 1700, Danish Technical Press, Copenhagen, 1969.

KALLSTENIUS, T., Mechanical disturbances in clay samples taken with piston samplers, Proceedings, Royal Swedish Geotechnical Institute, No. 16. lp, 1958.

KALLSTENIUS, T., Studies on Clay Samples Taken with Standard Piston Sampler, Royal Swedish Geotechnical Institute, Proceedings No. 21, 1963.

KALUÇ, E., TÜLBENTÇİ, K., Paslanmaz Çelikler ve Kaynaklanabilirliği, Seminer Notları, 7-178, Kocaeli Üniversitesi Kaynak Teknolojisi Araştırma, Eğitim ve Uygulama Merkezi, Kocaeli, 1995.

KANTEY, B.A., Discussion on shallow foundations and pavements, proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 3: 453-455, Montreal, 1956.

KARA, O., GÜNDÜZ, Z., Correlation between CPT and SPT in Adapazari, Turkey, 2 td International Symposium on Cone Penetration Testing, California, 2010.

KAYIR, Y.Z., Türkiye paslanmaz çelik üretebilir mi, II. Demir Çelik Sempozyumu ve Sergisi, Zonguldak, 2003.

KIMBALL, W.P., Settlement records of the Mississippi River at New Orleans, Proceedings, 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Volume 1, pp. 85-92, Harvard, 1936.

KISHIDA, H., UESUGI, M., Tests of the Interface between Sand and Steel in a Simple Shear Apparatus, Geotechnique, Vol. 37, No. 1, pp. 45-52, 1987.

KJELLMAN, W., KALLSTENIUS, T. and WAGER, O., Soil sampler with metal foils, Proceedings, Royal Swedish Geotechnical Institute, No. 1., 1950.

KOVACS, W.D., EVANS, J.C. and GRIFFITH, A.H., Towards a more standardised SPT, Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Tokyo, Volume 2, 269-276, 1977.

KOVACS, W.D., SALOMONE, L.A., SPT Hammer Energy Measurements, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 108, No. GT4, 1982.

KRAMER, S. L., Geoteknik Deprem Mühendisliği, Gazi Kitabevi, 1996, Tercüme: 2003.

KULHAWY, F.H., MAYNE, P.W., Manual on estimating soil properties for foundation design, Final Report (EL-6800) submitted to Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, California, 1990.

LAMBRECHTS, J.R., LEONARDS, G.A., Effects of Stress History on Deformation of Sand", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104, No. 11, pp. 1371-1387, 1978.

LA ROCHELLE, P., LEROUEIL, S. and TAVENAS, F., Discussion on Strain Path Method, Proc. ASCE, Journal Geotechnical Division, 113 (9), pp. 1088-1090, 1987.

LITTLETON, I., An experimental study of the adhesion between clay and steel, Journal of Terramechanics, Vol. 13, No. 3, s.141-152, 1976.

LUNNE, T., LACASSE, S., RAD, N.S. and DECOURT, L., SPT, CPT, pressuremeter testing and recent developments on in-situ testing, Norwegian Geotechnics Institute Report No.591390-1, 1989.

MAIR, R.J., WOOD, D.M., Pressuremeter testing: Methods testing and interpretation, Construction Industry Research and Information Association Project 335, ISBN 0-408-02434-8, Publ. Butterworths, London, 1987.

MARCHETTI, S., In situ tests by flat dilatometer, Proc. ASCE, J. of Geot. Eng., Volume 106, pp. 299-321, 1980.

MARCHETTI S., The Flat Dilatometer : Design Applications, Third Geotechnical Engineering. Conf. Cairo Univ., Keynote lecture, 26 pp, 1997.

MARCUSON, W.F., COOPER, S.S. and BIEGANOUSKY, W.A., Laboratory Sampling Study Conducted on Fine Sands, 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, s.15-22., Tokyo, 1977.

MEIGH, A.C., NIXON, I.K., Comparison of in-situ tests of granular soils, Proceedings of 5th international Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, 1961.

MEIGH, A.C., Cone Penetration Testing: Methods and Interpretation, Butterworths, Londra, 1987.

MELZER, K.J., Measuring soil properties in vehicle mobility research; relative density and cone penetration resistance U.S. Army Eng. Waterw. Exp. Stn, CE, Miss.. Tech. Rep., 3-652,4., Vicksburg, 1971.

MEYERHOF, G.G., Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils, ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol.82, No.SM1, s. 1-19, 1986.

MITCHELL, J.K., GUZIKOWSKI, F. and VILLET, W.C.B., The measurement of soil properties in situ, present methods - their applicability and potential, U.S. Dept of Energy Report, Dept. of Civil Engineering, Univ. of California, Berkeley, 1978.

MITCHELL, J.K., Fundamentals of Soil Behavior, 2. Edition, 1992.

MILITITSKY, J., CLAYTON, C.R.I., TALBOT, J.C.S. and DIKRAN, S., Previsao de recalques em solas granulares utilizando resultados de SPT: revisao critica, Proc. 7th Brazilian Conf. Soil Mech. and Found. Eng., pp. 133-150, 1982.

MOHR, H.A., Exploration of soil conditions and sampling operations, Soil. Mech. Series No.21, Graduate School of Engineering, Harvard, 1943.

MORI, H., Review of Japanese Sub-surface Investigation Techniques, Journal of South East Asian Society Geotechnical Engineering, 10, 219-242, 1979.

MOROĞLU, B., Sığ Temel Sistemlerinin Oturmalarının Standart Penetrasyon Deney Sonuçları ile Hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1996.

Nickel Development Institute, Standart wrought austenitic stainless Steels, Materials Engineering, NiDI Technical Series No. 1229, Toronto, 1974.

NIVEN, E.B., The Use of the SPT and CPT in Loose Sands, Master thesis, Alberta University, Edmonton, 2006.

ÖNALP, A., Geoteknik Bilgisi I Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği, Sakarya Üniversitesi, Yayın No: 27, İstanbul, 2002.

ÖZKAN, M.Y., WASTI, Y. ve BALKIR, T., Arazi Deneyleleri Korelasyonları ve Zemin Parametreleri Tahmini, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Türk Milli Komitesi Bülteni, 1, 33-40, 1990.

PECK, R.B., HANSON, W.E. and THORNBURN, T.H., Foundation Engineering, John Wiley, New York, 1974.

POTYONDY, J.G., Skin Friction between Various Soils and Construction Materials, Geotechnique, Vol. 11, No. 4, s. 339-353, 1961.

POULOS, H.G., Pile behaviour - theory and application: 29th Rankine Lecture, Geotechnique, 39 (3), 363-416, 1989.

PRAKASH, S., SHARMA H.D., Pile Foundations in Engineering Practice, John Wiley & Sons, San Jose, ISBN 0-471-61653-2, California, 1990.

ROBERTSON, P.K., In-situ testing of soil with emphasis on its application to liquefaction assessment, PhD thesis, The University of British Columbia Vancouver, Canada, 1982.

ROBERTSON, P.K., CAMPANELLA, R.G., ASCE, M. and WIGHTMAN, A., SPT-CPT Correlations, In ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 109, No.11:1449-1459, ISSN. 0733-9410, New York, 1983.

ROBERTSON, P. K., CAMPANELLA, R.G., Interpretation of Cone Penetration Tests Part I (Sand) and Part II (Clay), Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, No. 4, 1983.

ROY, D., HUGHES, J.M.O. and CAMPANELLA, R.G.D., Canada Reliability of self-boring pressuremeter in sand, Canadian Geotechnic Journal 36(1): 102-110, doi:10.1139/cgj-36-1-102, NRC, 1999.

ROWE, P.W., The influence of geological features in clay deposits on the design and performance of sand drains, Proc. Institution of Civil Engineers, Suppl Paper s.7058, London, 1968.

PECK, R.B., HANSON, W.E. and THORNBURN, T.H., Foundation Engineering, John Wiley, New York, 1974.

SAĞLAMER, A., Standart Penetrasyon Deneyi Nedir, Ne Değildir, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Türk Milli Komitesi Bülteni, 1, 4, 267-271, 1979.

SANGLERAT, G., The penetrometer and soil exploration, Developments in Geotechnical Engineering, Vol.1, Elsevier Science Ltd., Amsterdam, 1982.

SCHJETNE, K., The measurement of pore pressure during sampling, Proc. Speciality Session on Quality in Soil Sampling, 4th Asian Regional Conf., Int. Soc. Soil Mech. and Found. Eng., s.12-16, Bangkok, 1971.

SCHMERTMANN, J.H., Static cone to compute static settlement over sand, In ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 96, No. 3, s. 1011-1043, 1970.

SCHMERTMANN, J.H., Effects of in situ lateral stress on friction cone penetrometer data in sand, Fugro Sonder Symposium, Fugro-Cesco, pp. 37-39, Holland, 1972.

SCHMERTMANN, J.H., Use the SPT to Measure Dynamic Soil Properties? -Yes, But.!, Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, American Society for Testing and Materials, pp. 341-355, 1978a.

SCHMERTMANN, J.H., Guidelines for Cone Penetration Test, Performance and Design, Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-78-209, Washington, 1978b.

SCHMERTMANN, J.H., Statics of the SPT, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No. GT5, pp. 655-670, 1979.

SCHMERTMANN, J.H., A Method for Determining the Friction Angle in Sands from the Marchetti Dilatometer Test (DMT), Proc. 2nd European Symposium on Penetration Testing, Vol. 2: 853, Amsterdam, 1982.

SCHMERTMANN, J.H., Dilatometer to Compute Foundation Settlement, Proc. In Situ 86 ASCE Spec. Conf. Virginia Tech, ASCE Geot. Special Publ. No. 6: 303-321, Blacksburg, 1986.

SCHULTZE, E., SHERIF, G., Prediction of settlements from evaluated settlement observations for sands, Proc. 8th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Volume 1, 3, pp.225-230, Moscow, 1973.

SCHULTZE, E., MELZER, K.J., The determination of the density and the modulus of compressibility of non-cohesive soils by soundings, Proc., 6th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 1, 354-358, Montreal, 1965.

SEED, H.B., IDRIS, I.M., Evaluation of Liquefaction Potential of Sands Deposits Bread on Obeavrilons of Performance in Previous Earthquake, Proc, of the Conf. On in Sith Testing to Evaluate Liquefaction Sneeptibility, ASCE, St.Loud, MO, 1981.

SEKO, R., TOBE, K., Research of stiff clay sampling, Proc. Speciality Session 2 on Soil Sampling, 9th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., pp. 44-45, Tokyo, 1977.

SIDDIQUE, A.A., A numerical and experimental study of sampling disturbance, PhD thesis, University of Surrey, 1990.

SIMONS, N.E., MENZIES, B.K., A Short Course in Foundation Engineering, IPC Science and Technology Press, London, 1977.

SİVRİKAYA, O., TOĞROL, E., Standart Penetrasyon Deneyinin Türkiye'deki Uygulaması, Dokuzuncu Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi, 158-167, Eskişehir, 2002.

SİVRİKAYA, O., TOĞROL, E., İnce daneli zeminlerde SPT sonuçlarının düzeltilmesi üzerine bir çalışma itüdergisi/c/mühendislik Cilt:2, Sayı:6, 59-67, İstanbul, 2003.

SİVRİKAYA, O., TOĞROL, E., Türkiye'de SPT-N Değeri ile İnce Daneli Zeminlerin Drenajsız Kayma Mukavemeti arasındaki İlişkiler, İMO Teknik Dergi, 4229 -4246, Yazı 279, 2007.

SKEMPTON, A.W., SOWA, V.A., The behavior of saturated clays during sampling and testing, Geotechnique, 13 (4), 269-290, 1963.

SKEMPTON, A.W., Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Overconsolidation, Geotechnique, 36, 3, 425-447, 1986.

SMITH, W. F., Paslanmaz Çelikler, Mühendislik Alaşımalarının Yapı ve Özellikleri, Bölüm 5, Cilt 1., Çeviri: Erdoğan, M., 169-214, Ankara, 2000.

STEWART, D.P., RANDOLPH, M.F., A new site investigation tool for the centrifuge, Proc. Int. Conf. Centrifuge, H. Y. Ko, ed., 531-538, A.A. Balkema, Rotterdam, 1991.

STEWART, D.P., RANDOLPH, M.F., T-Bar Penetration Testing in Soft Clay, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 12, ASCE, ISSN 0733-9410/94/0012-2230, December, 1994.

STROUD, M.A., The standard penetration test in insensitive clays and soft rocks, Proc. Eur. Symp. on Penetration Testing, (ESOPT 1), Volume 2:2, pp. 367-375, Swedish Geological Society, Stockholm, 1974.

STROUD, M.A., The standard penetration test-its application and interpretation, Proc. ICE. Conf. on Penetration Testing in the UK, Birmingham, Thomas Telford, London, 1989.

SOWERS, G.F., Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering, 621 sf., 4th edition, Macmillan, New York, 1979.

SUZUKI, Y., SANEMATSU, T. and TOKIMATSU, K., Correlation between SPT and Seismic CPT, In Geotechnical Site Characterization, Balkema, Vol.1, pp. 1375-1380, Atlanta, Georgia, 1998.

- TALBOT, J.C.S., The prediction of settlements using in situ penetration test data, MSc dissertation, University of Surrey, 1981.
- TERZAGHI, K., PECK, R.B., Soil mechanics in engineering practice, 1st Edition, John Wiley & Sons, New York, 1948.
- TERZAGHI, K., Static cone penetration tests, Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Zurich, 3: 229-231, 1953.
- TERZAGHI, K., PECK, R.B., Soil Mechanics in Engineering Practice, 2. Edition, John Wiley, New York, 1967.
- TOKIMATSU, K., Penetration Tests for Dynamic Problems, Proceedings of 1st International Symposium on Penetration Testing, 117-136, Rotterdam, 1988.
- THORBURN, S., Tentative correction chart for the standard penetration test in non-cohesive soils, Civil Eng. Public Works Rev., 58: 752-753, 1963.
- TORSTENSSON, B., Time dependent effects in the field vane test, Proc. Int. Symp. on soft Clay, Asian Inst. Tech., pp. 387-397, Bangkok, 1977.
- TSUBBAKIHARA, Y., KISHIDA H. and NISHIYAMA T., Friction between cohesive soils and steel, Soils and Foundations, Vo.33, No.2:145-156, 1993.
- UESUGI, M., KISHIDA, H., Influential Factors of Friction between Steel and Dry Sands, Soils and Foundation, Vol. 26, No. 2, pp. 33-46, 1986.
- VAN DER VEEN, C., BOERSMA, L., The bearing capacity of a pile predetermined by a cone penetration test, Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Volume 2, pp. 72-75, London, 1957.
- VEISMANIS, A., Laboratory investigation of electrical friction cone penetrometers in sands, Proceedings of European Symposium on Penetration Testing, Stockholm, 1974.
- WHYTE, I.L.L., The development of site investigations, Ground Engineering, 9 (7), 35-38, 1976.
- WITHERS, N.J., SCHAAP, L.H.J. and DALTON, C.P., The development of a full-displacement pressuremeter, Proc. 2nd Symp. on the Pressuremeter and its Marine Applications, ASTM, pp. 38-56, Philadelphia, 1986.
- YOSHIMI, Y., KISHIDA T., A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces, Geotechnical Testing Journal, Vol. 4, No. 4, pp145-152, 1981.
- YOUDE, T.L., IDRISSE, I.M., Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. Jnl GGE ASCE, 127(4), 297-313, 2001.

YÜKSEL, M., Malzeme Bilgisi, Yayın No: 2002/271-1, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, s. 368-386, Ankara, 2002.

ASKZN Stainless Steel, http://www.askzn.co.za/tech/tech_grade_304.htm, (Erişim Tarihi: 2011).

ASTM International, West Conshohocken, www.astm.org, (Erişim Tarihi: 2011).

Atlas Steels, Teknik El Kitabı, www.atlassteels.com.au, (Erişim Tarihi: 2011).

A.P. van den Berg, <http://www.apvdenberg.nl/>, (Erişim Tarihi: 2008).

A.P. van den Berg, http://www.apvandenber.com/en/our_products/cones, (Erişim Tarihi: 2011).

Applied Research Associates Inc., <http://www.ara.com/products/vertek.htm>, (Erişim Tarihi: 2011).

Bias, <http://www.bias.com.tr/>, (Erişim Tarihi: 2009).

British Standards Institute, <http://www.bis.gov.uk/>, (Erişim Tarihi: 2011).

Cambridge Institut, <http://www.cambridge-insitu.com/>, (Erişim Tarihi: 2011).

Deutsches Institut für Normung, <http://www.din.de/cmd?level=tpl-home&contextid=din>, (Erişim Tarihi: 2011).

Euroinox, The European Stainless Steel Development Association, <http://www.euro-inox.org/>, (Erişim Tarihi: 2011).

Fugro Company, <http://www.fugro.com/>, (Erişim Tarihi: 2008).

Geoprobe Systems, <http://www.geoprobe.com/>, (Erişim Tarihi: 2008).

Gregg Drilling, <http://www.greggdrilling.com/>, (Erişim Tarihi: 2008).

Geodelft Institutes On Geotechnical Engineering, <http://www.geodelft.nl/>, (Erişim Tarihi: 2008).

Geotechnical Consulting And Testing Systems Canada, <http://www.gctscanada.com/>, (Erişim Tarihi: 2008).

Lankelma, <http://www.lankelma.com/>, (Erişim Tarihi: 2007).

Lankelma, <http://www.lankelma.com/>, (Erişim Tarihi: 2008).

Marchetti-DTM, <http://www.marchetti-dmt.it/>, (Erişim Tarihi: 2008).

Missouri University Of Science And Technology, <http://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge441/Origins%20Amer%20Fdn%20Eng r%20in%20Chicago-2009.pdf>, (Erişim Tarihi: 2011).

Paslanmaz elik Sanayicileri ve İş Adamları Derneği (PASIAD), http://www.pasiad.org.tr/modules.php?name=Universal_Module&op=ViewItem&vid=6, (Erişim Tarihi: 2011).

Precision Sampling Inc., <http://www.precisionssampling.com/>, (Erişim Tarihi: 2008).

ROGERS, J.D., <http://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge441/Origins%20 Amer %20Fdn %20Engr%20in%20Chicago-2009.pdf>, Missouri University of Science & Technology, Illinois. 1, 315-328. Orlando, (Erişim Tarihi: 2009).

Saritaş elik, <http://www.saritas.com.tr/ktlg/pdf/Paslanmaz%20Celik%20Saritas%2004.pdf>, (Erişim Tarihi: 2004).

Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, <http://www.mceer.buffalo.edu/>, (Erişim Tarihi: 2008).

Schlumberger Oilfield Glossary, <http://www.glossary.oilfield.slb.com/>, (Erişim Tarihi: 2008).

Spectrum Geophysics, <http://www.spectrum-geophysics.com/>, (Erişim Tarihi: 2008).

Türk Standardları Enstitüsü, <http://www.tse.org.tr/>, (Erişim Tarihi: 2008).

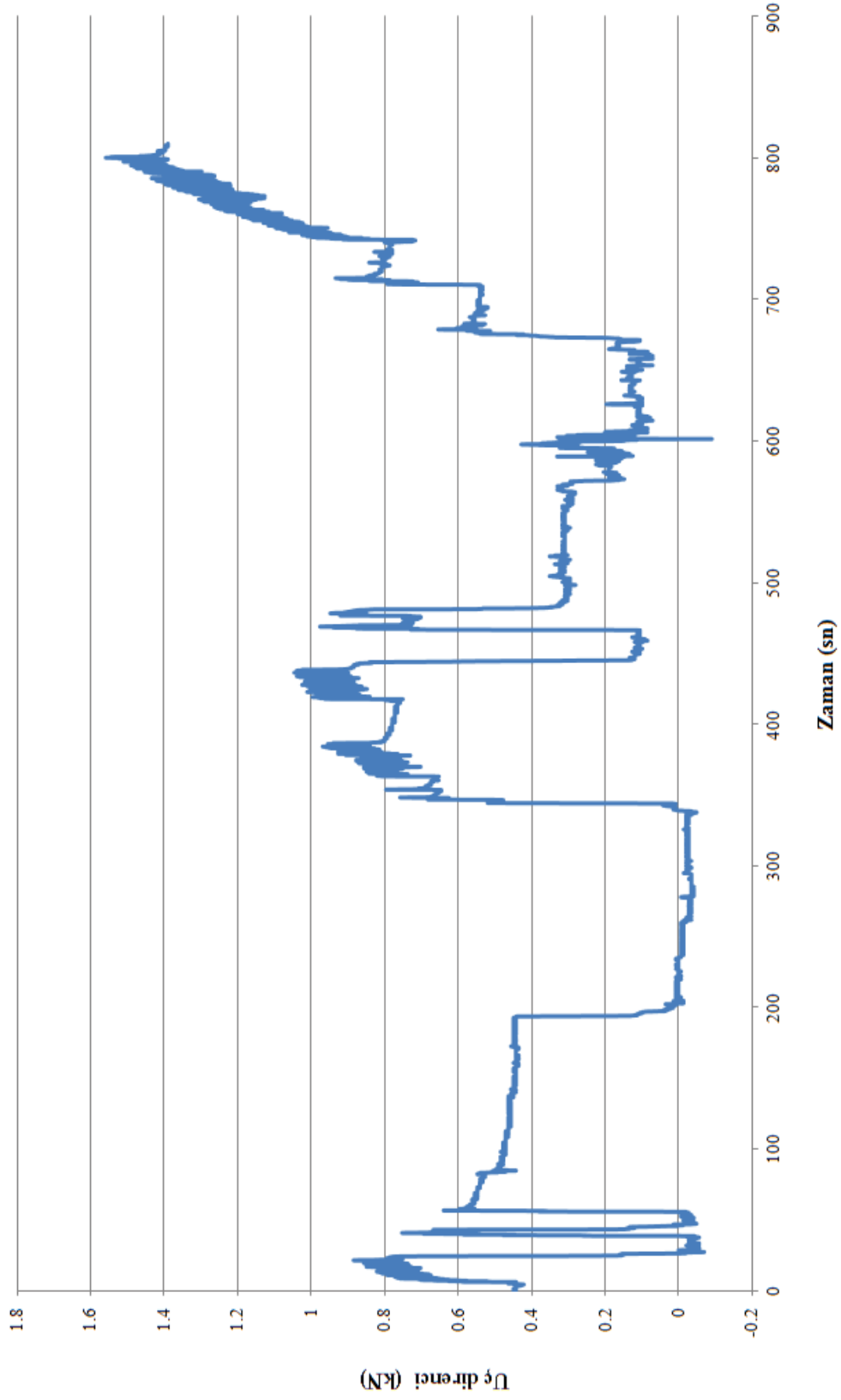
TDG, <http://teknikdestek.com.tr/index.html>, (Erişim Tarihi: 2009).

Vertek, http://vertkcpt.com/sites/vertkcpt.com/files/vtk_series_video_cone.pdf, (Erişim Tarihi: 2008).

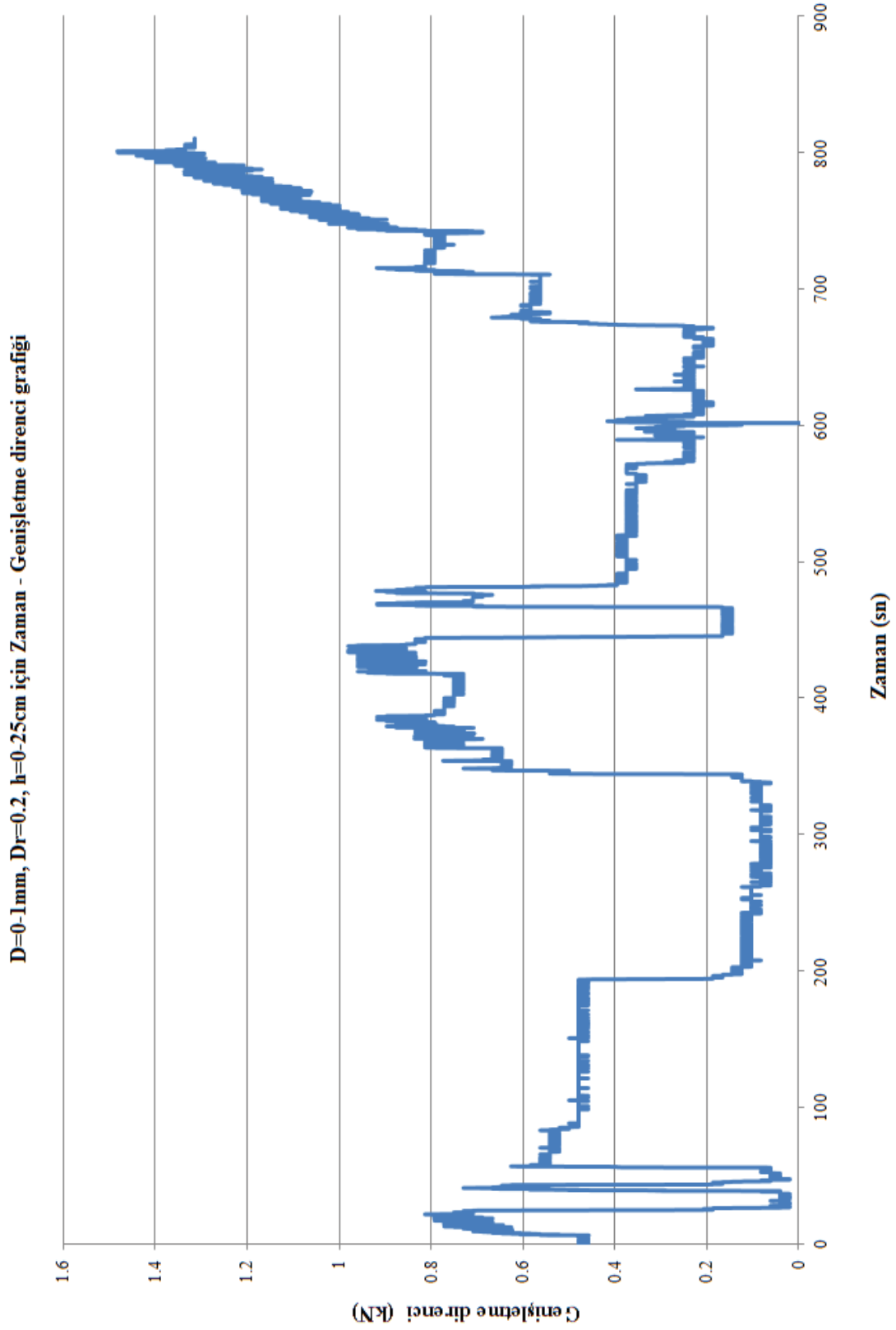
Zetica Ltd., <http://www.zetica.com/>, (Erişim Tarihi: 2008).

EKLER

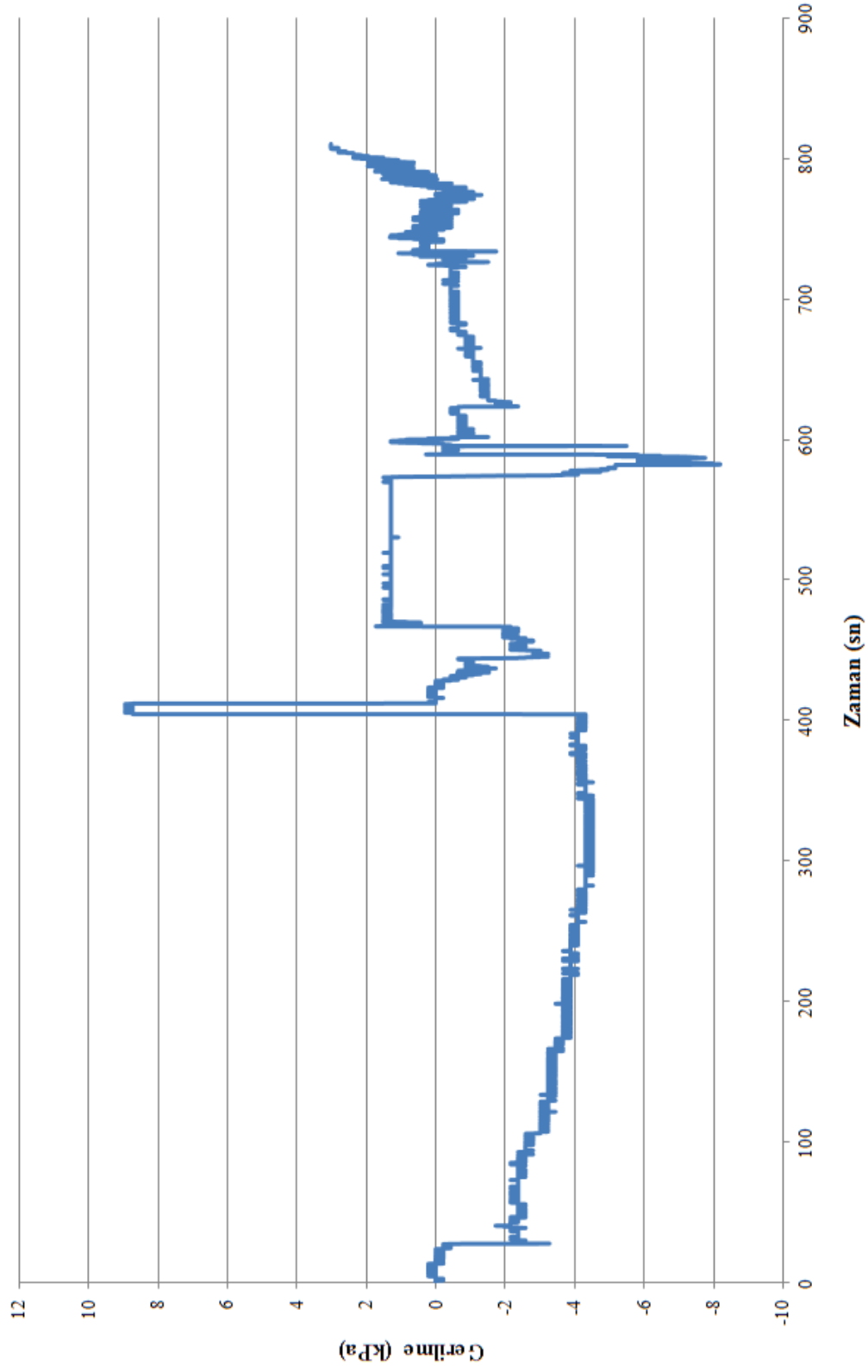
Ek A1

D=0.1mm, Dr=0.2, h=0.25cm için Zaman - Uç direnci grafiği

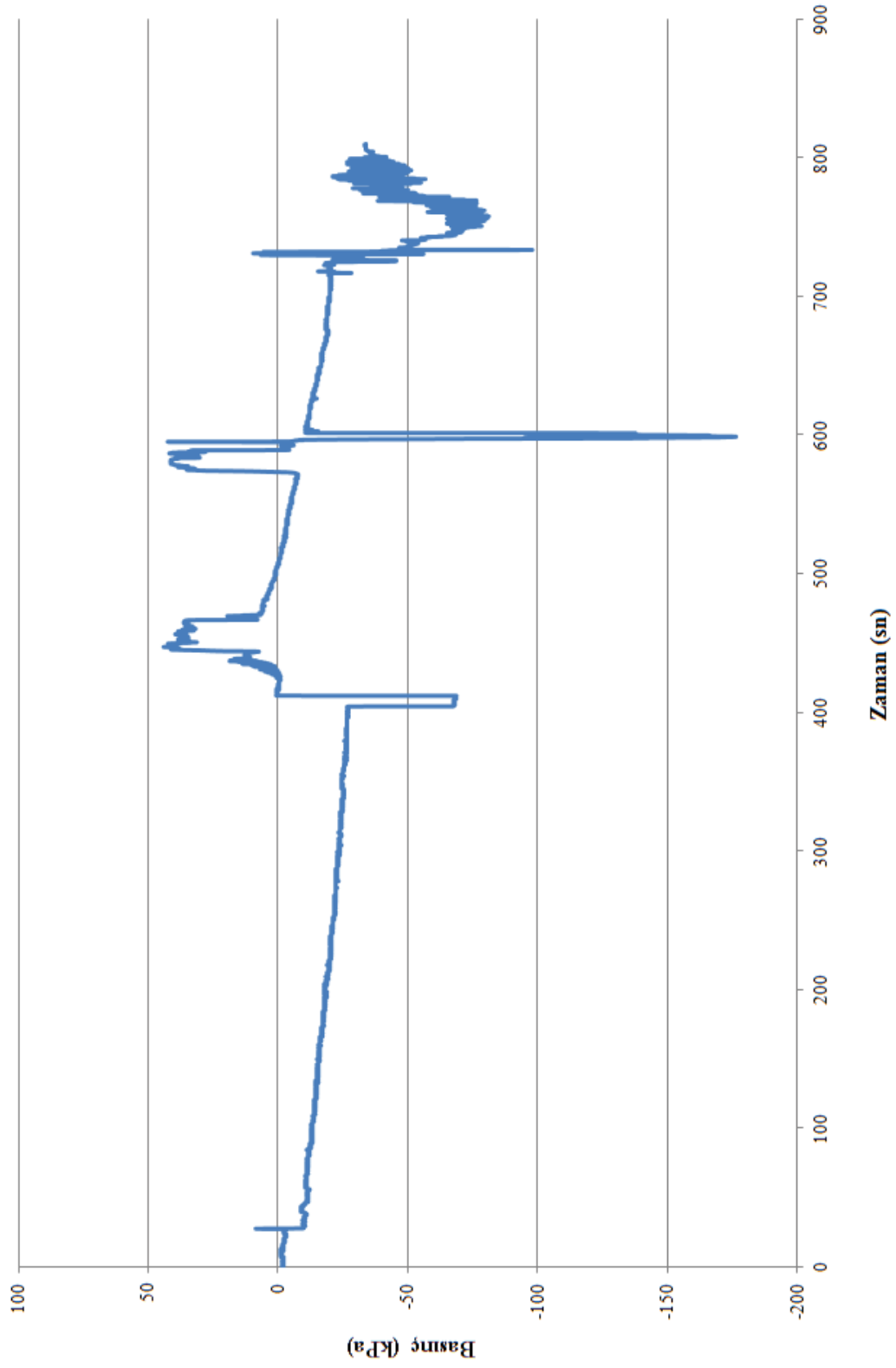
Ek A2



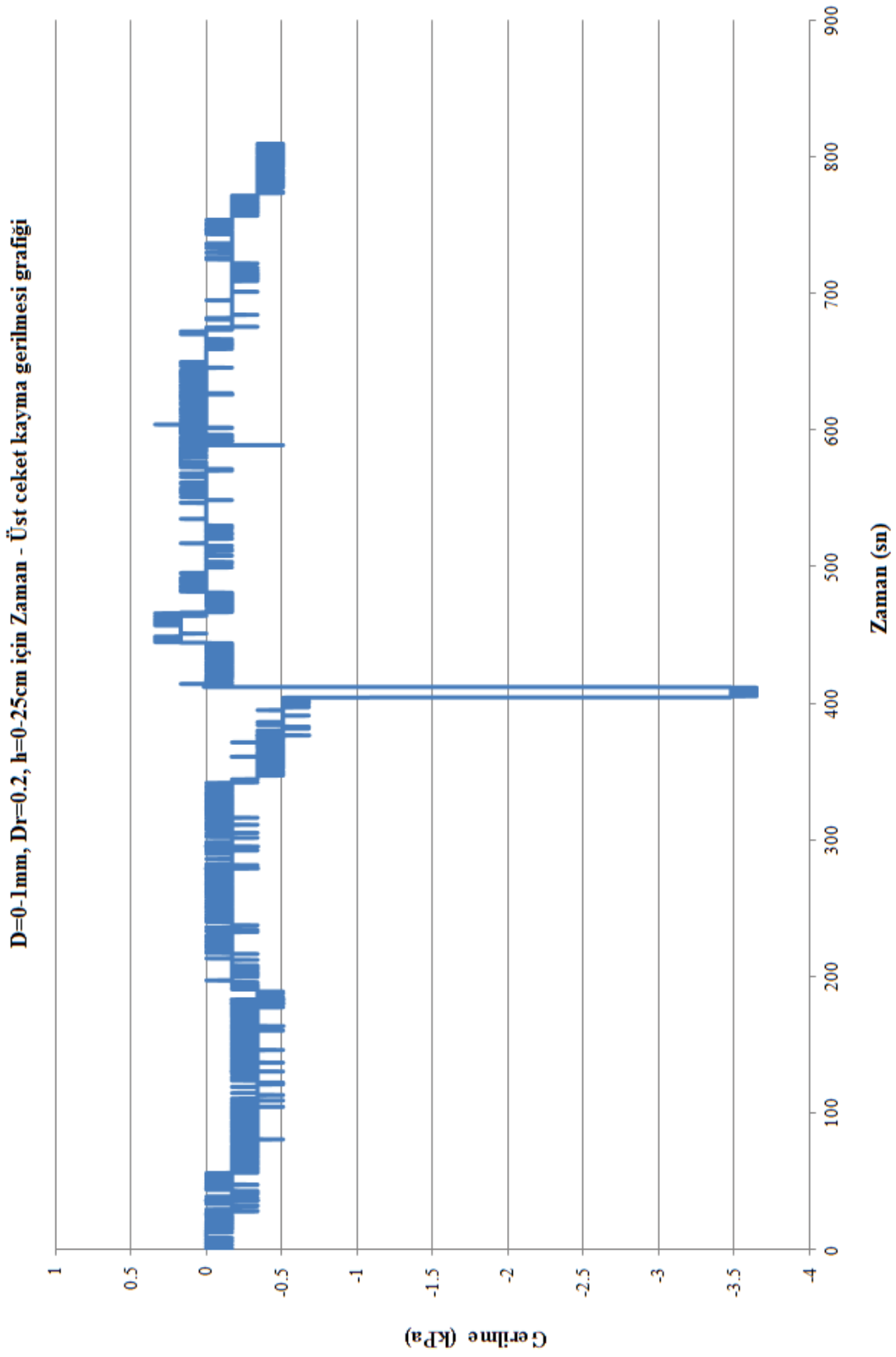
Ek A3

D=0.1mm, Dr=0.2, h=0-25cm için Zaman - Alt çeket kayma gerilmesi grafiği

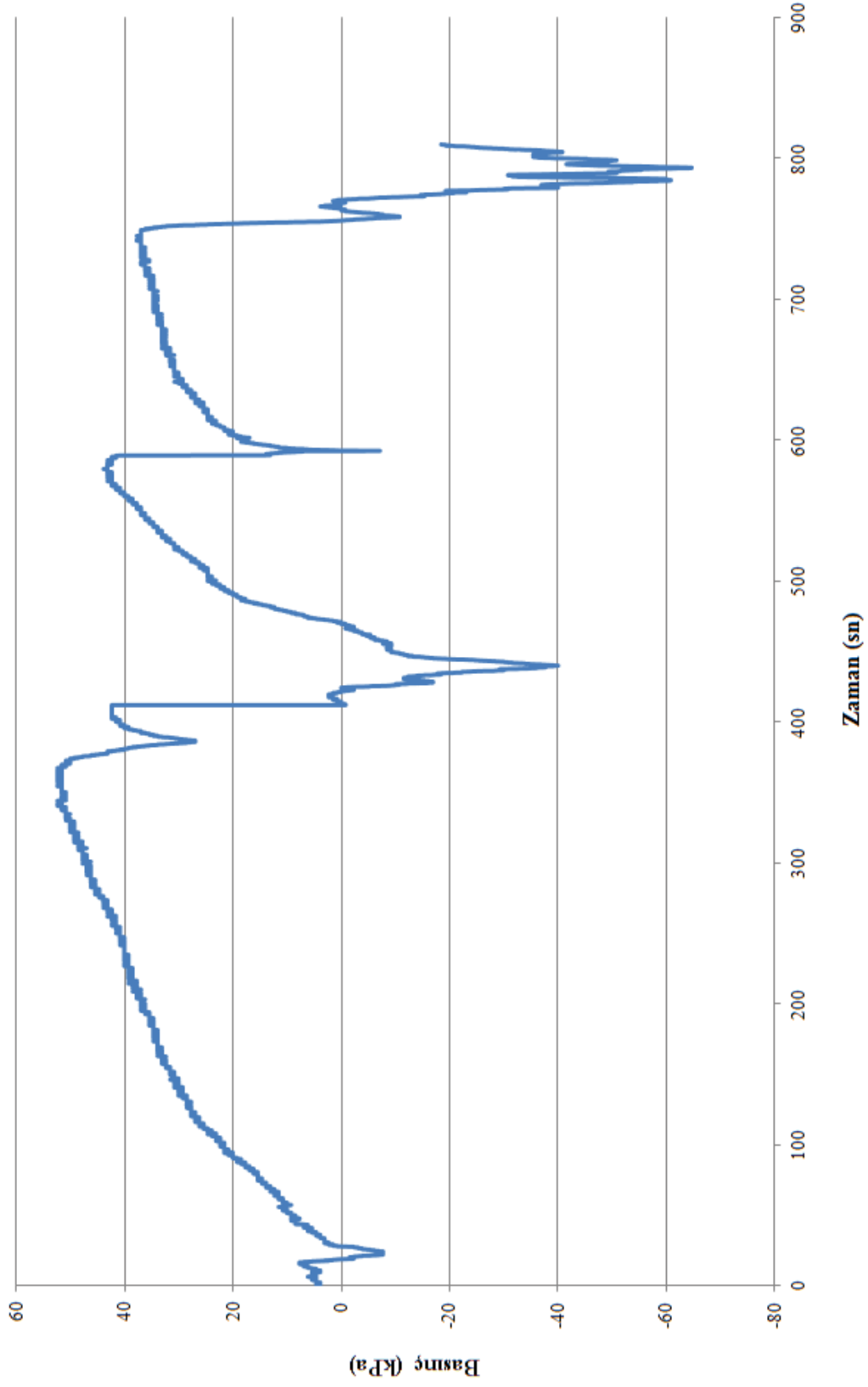
Ek A4

D=0-1mm, $D_f=0.2$, h=0-25cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

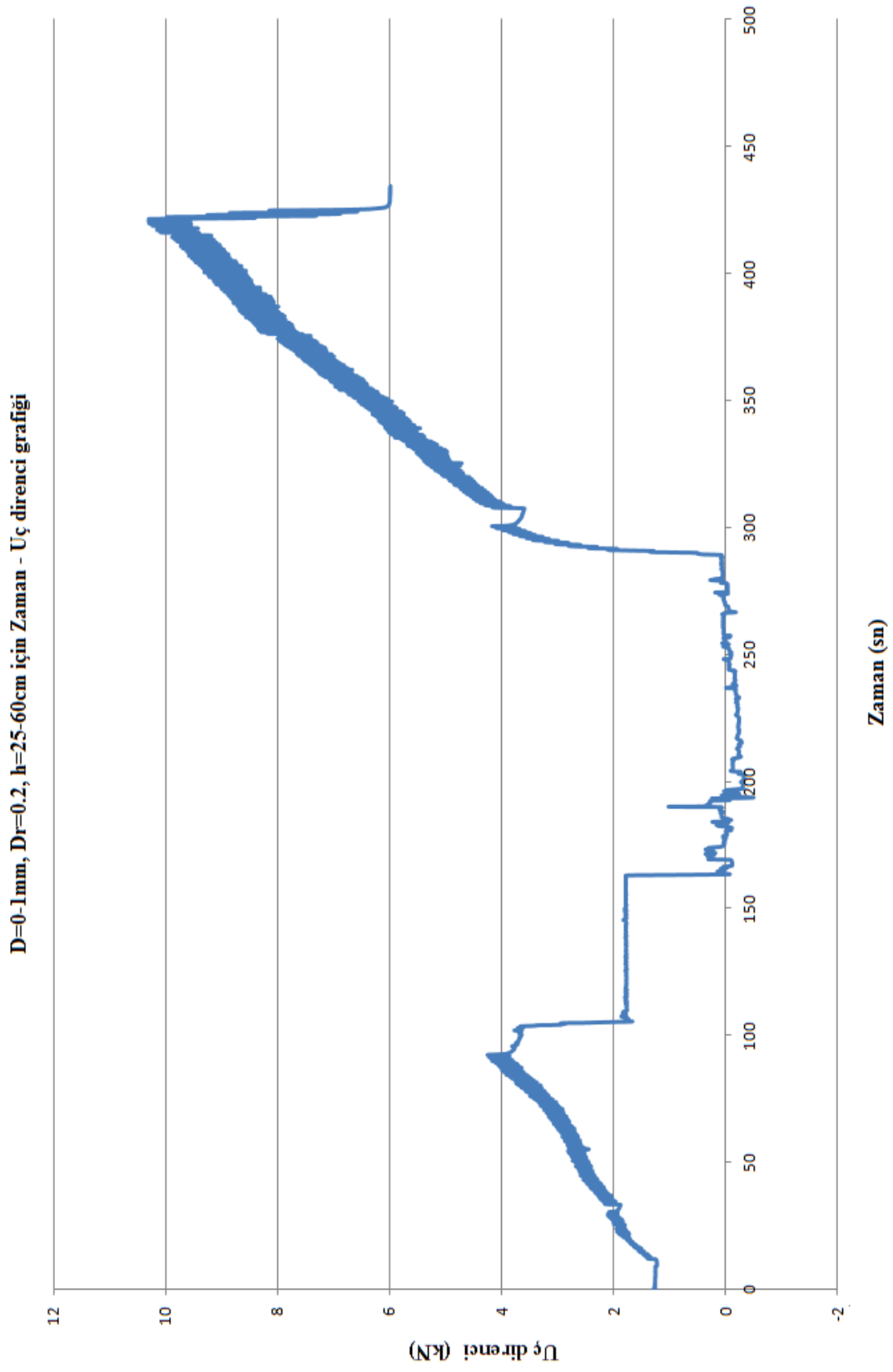
Ek A5



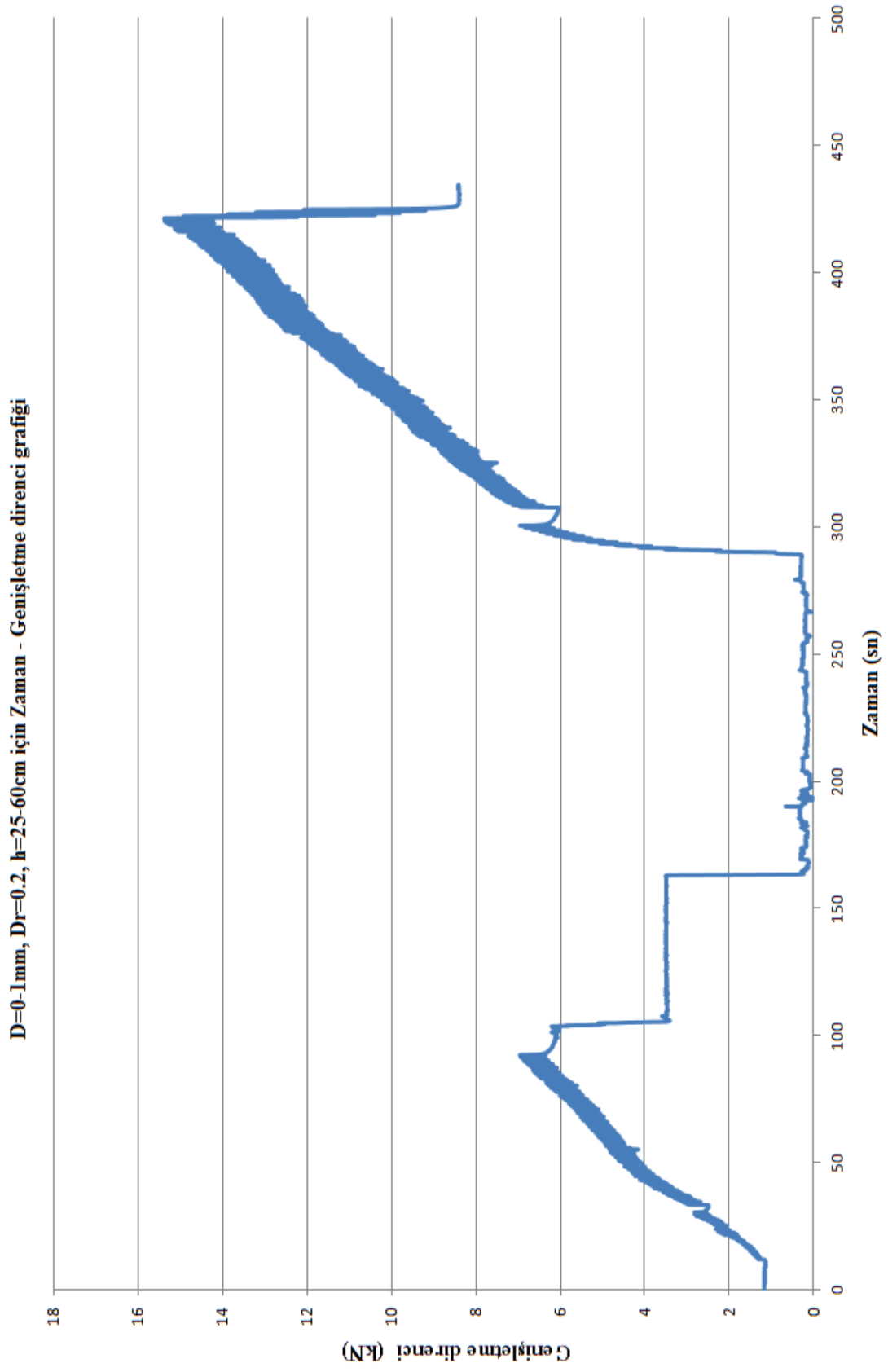
Ek A6

D=0-1mm, $D_r=0.2$, $h=0-25\text{cm}$ için Zaman - Üst ceket çevre basıncı grafiği

Ek A7

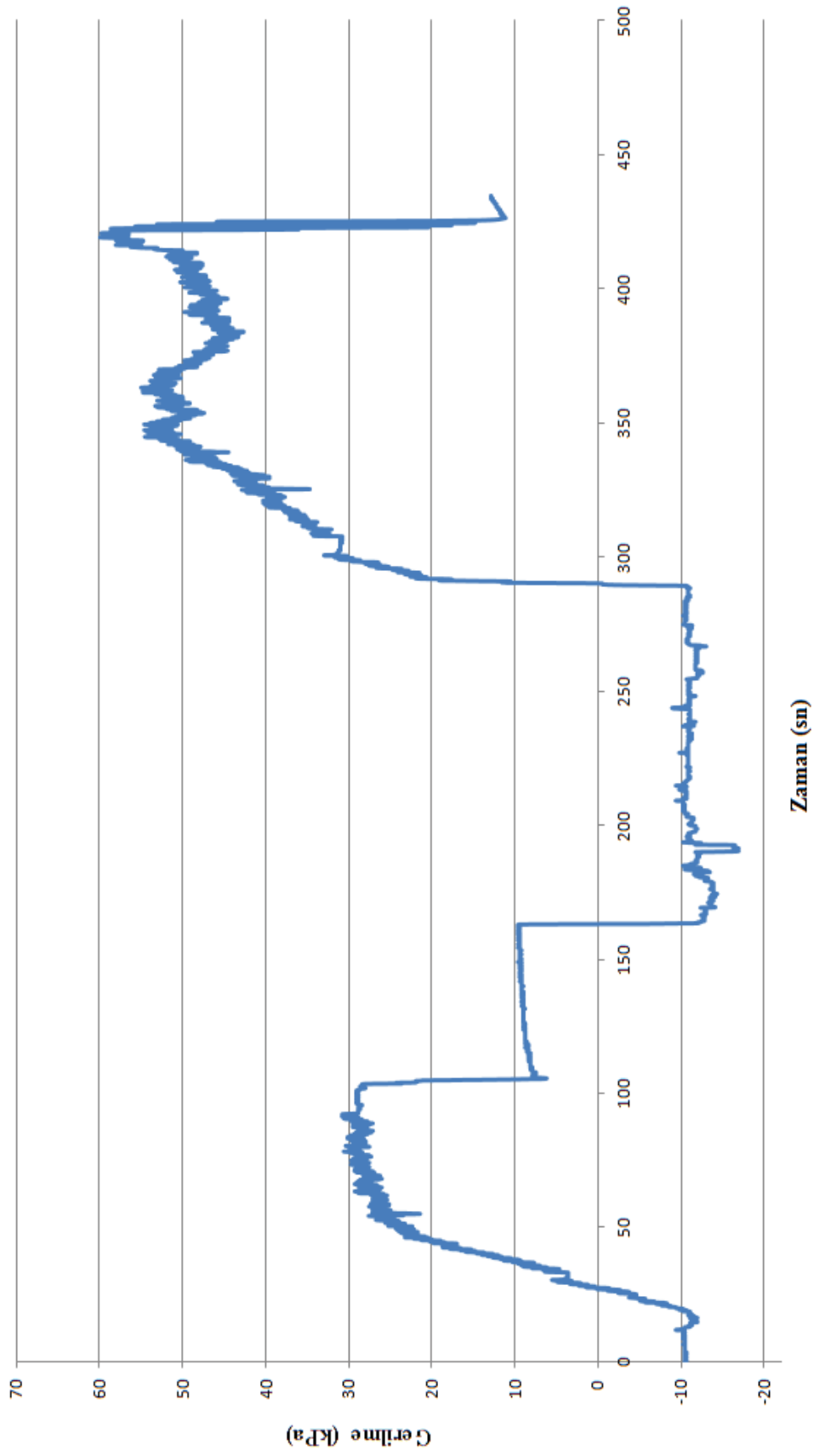


Ek A8

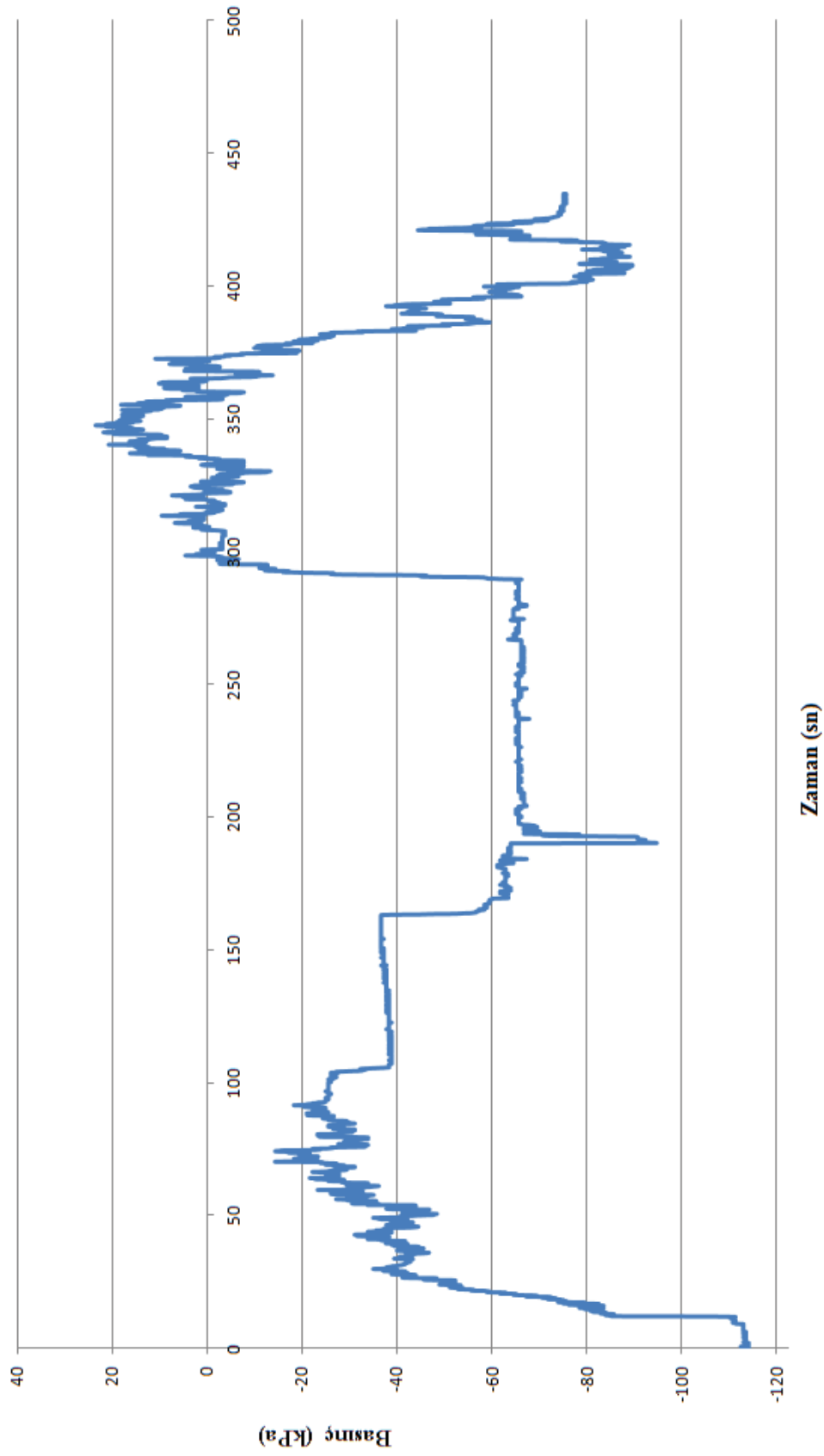


Ek A9

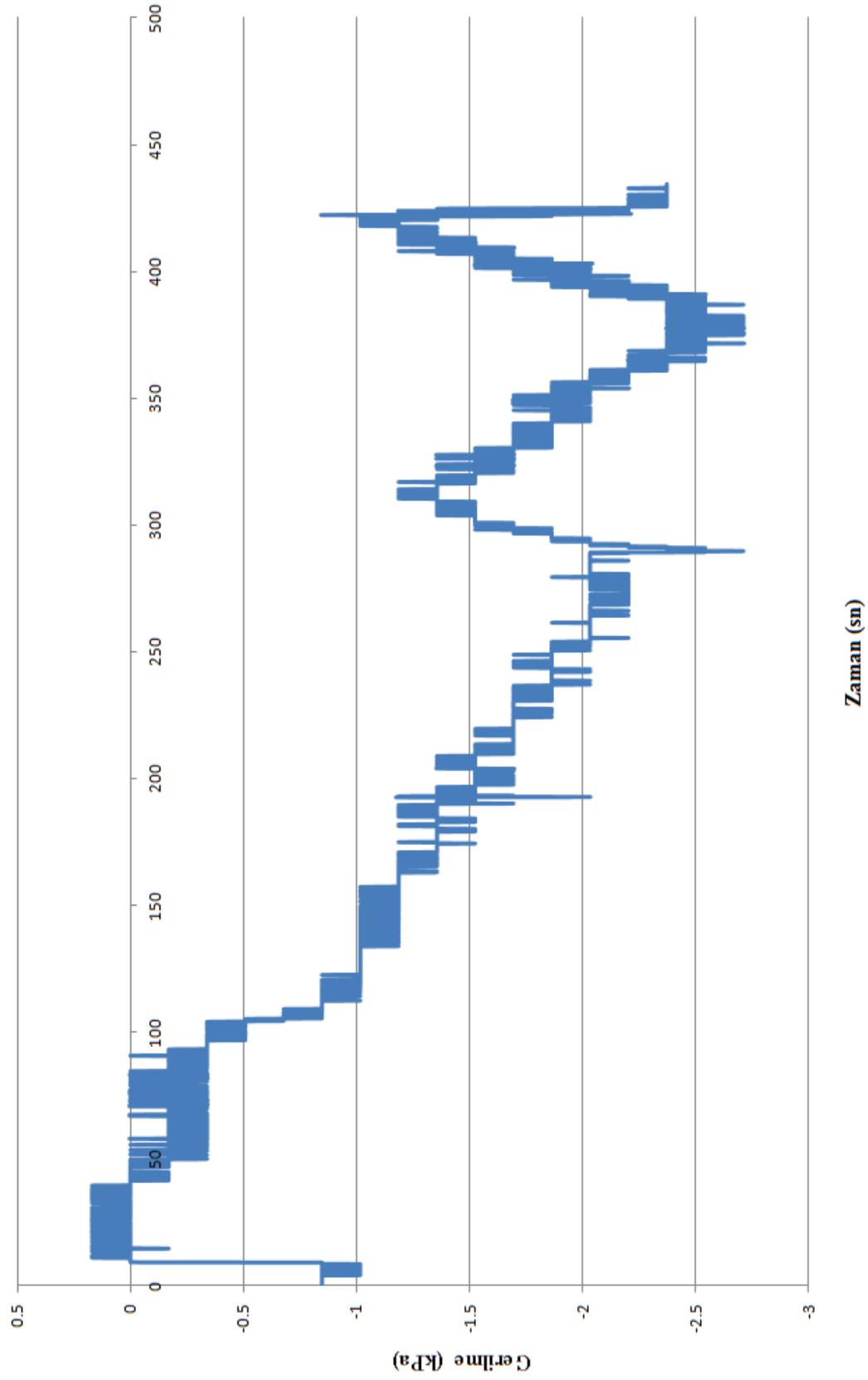
D=0-1mm, $D_r=0.2$, h=25-60cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği



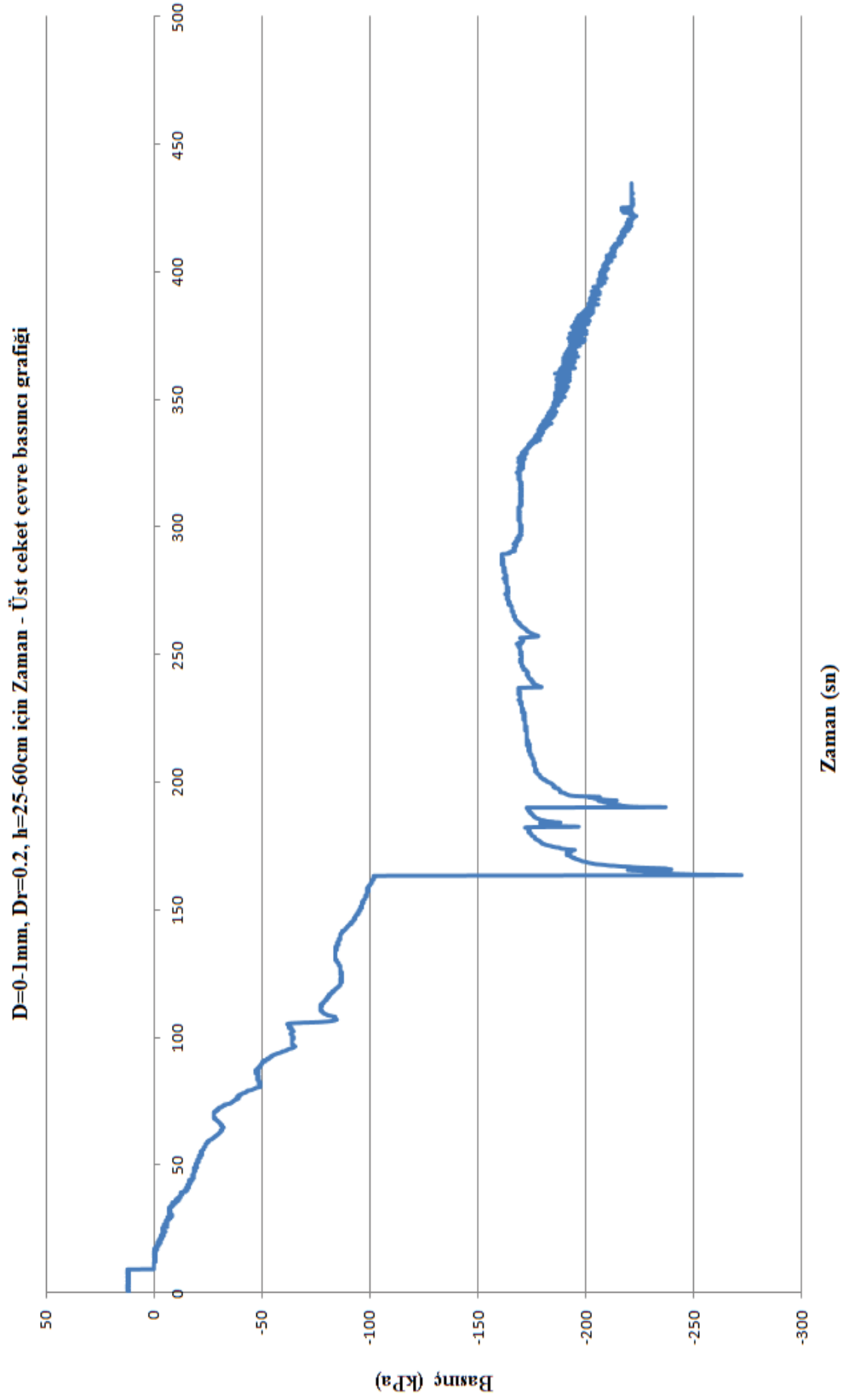
EkA 10

D=0-1mm, $D_r=0.2$, h=25-60cm için Zaman - Alt cekef çevre basıncı grafiğı

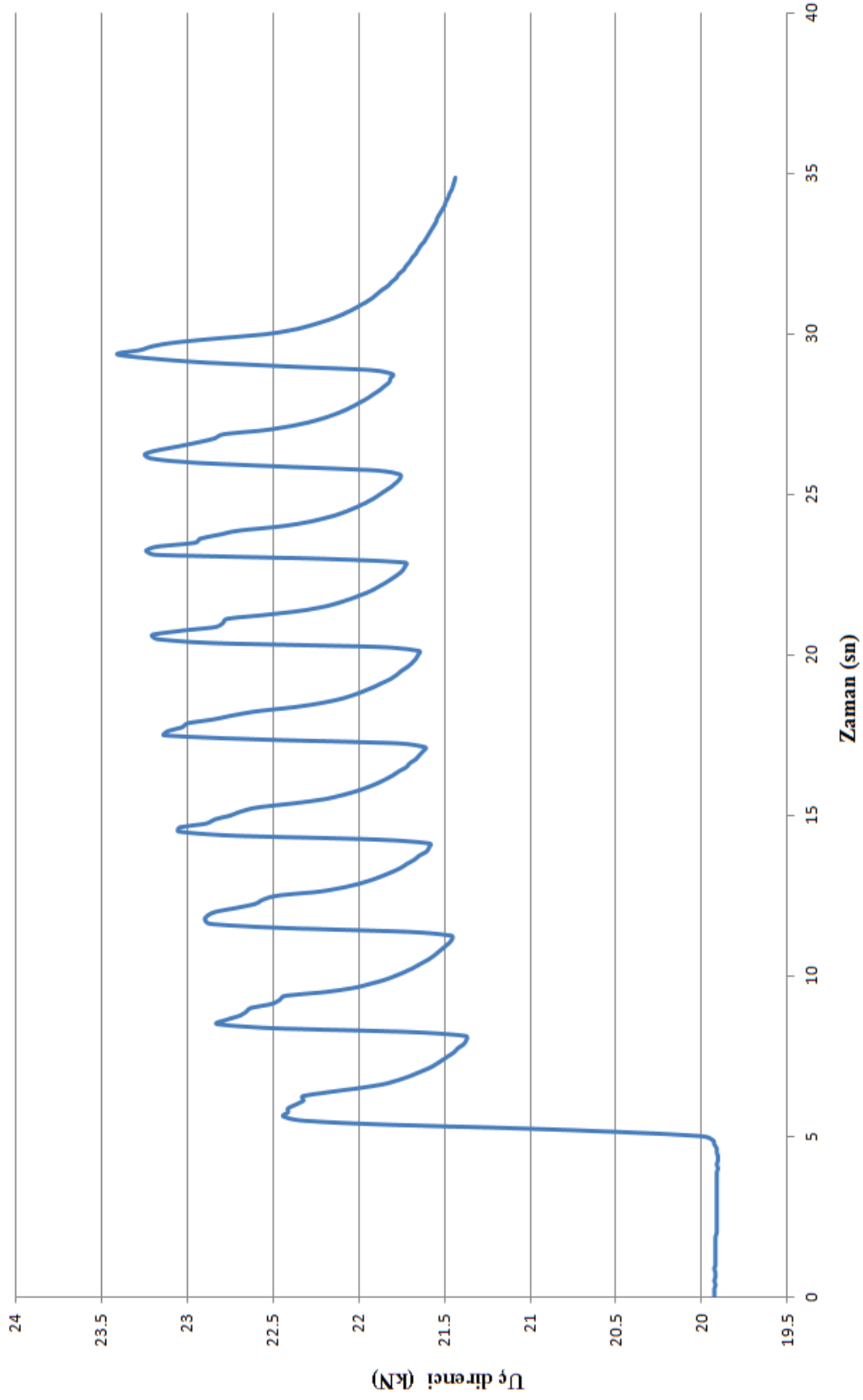
Ek A11

D=0-1mm, $D_f=0.2$, h=25-60cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği

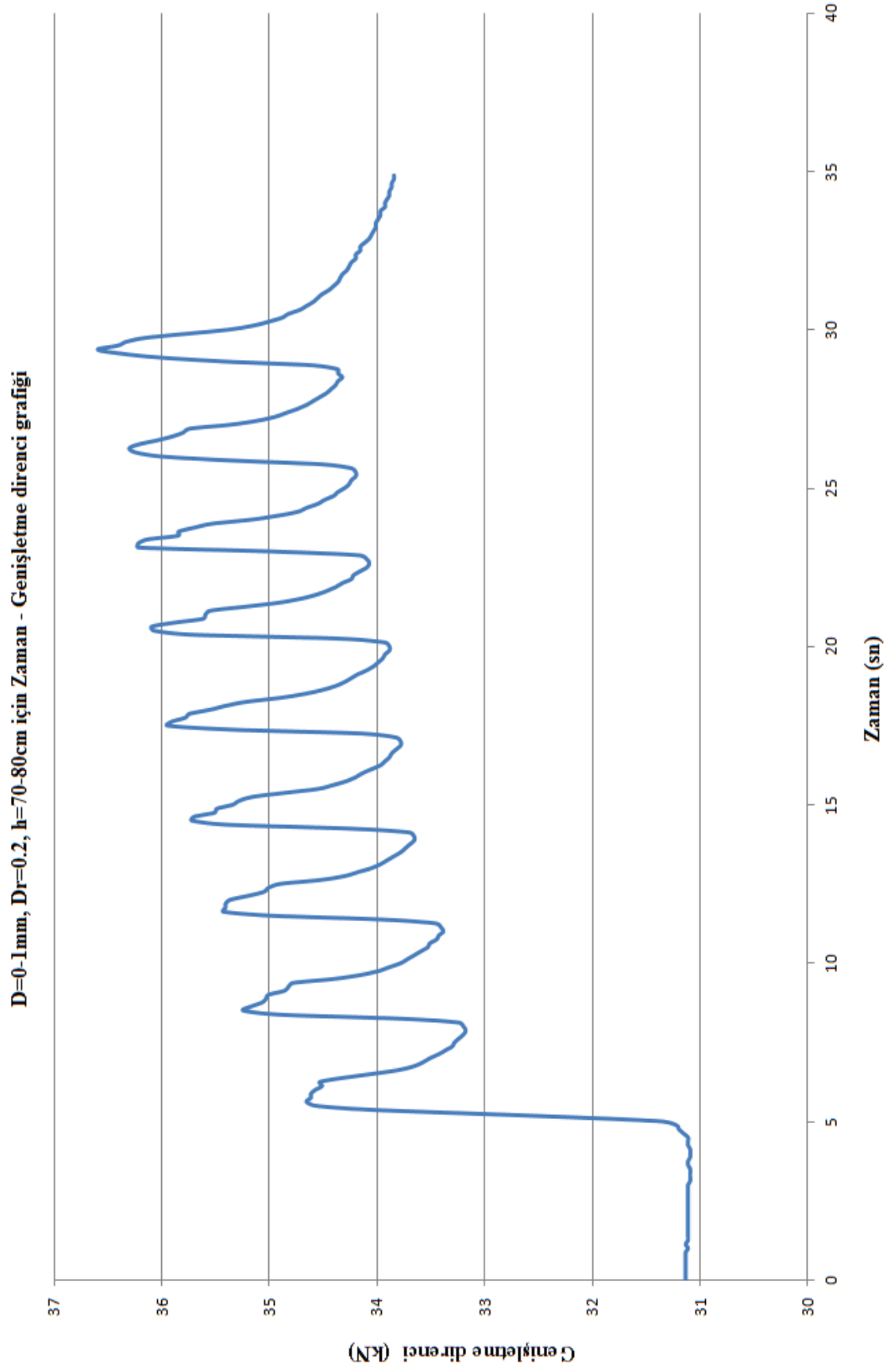
Ek A12



Ek A 13

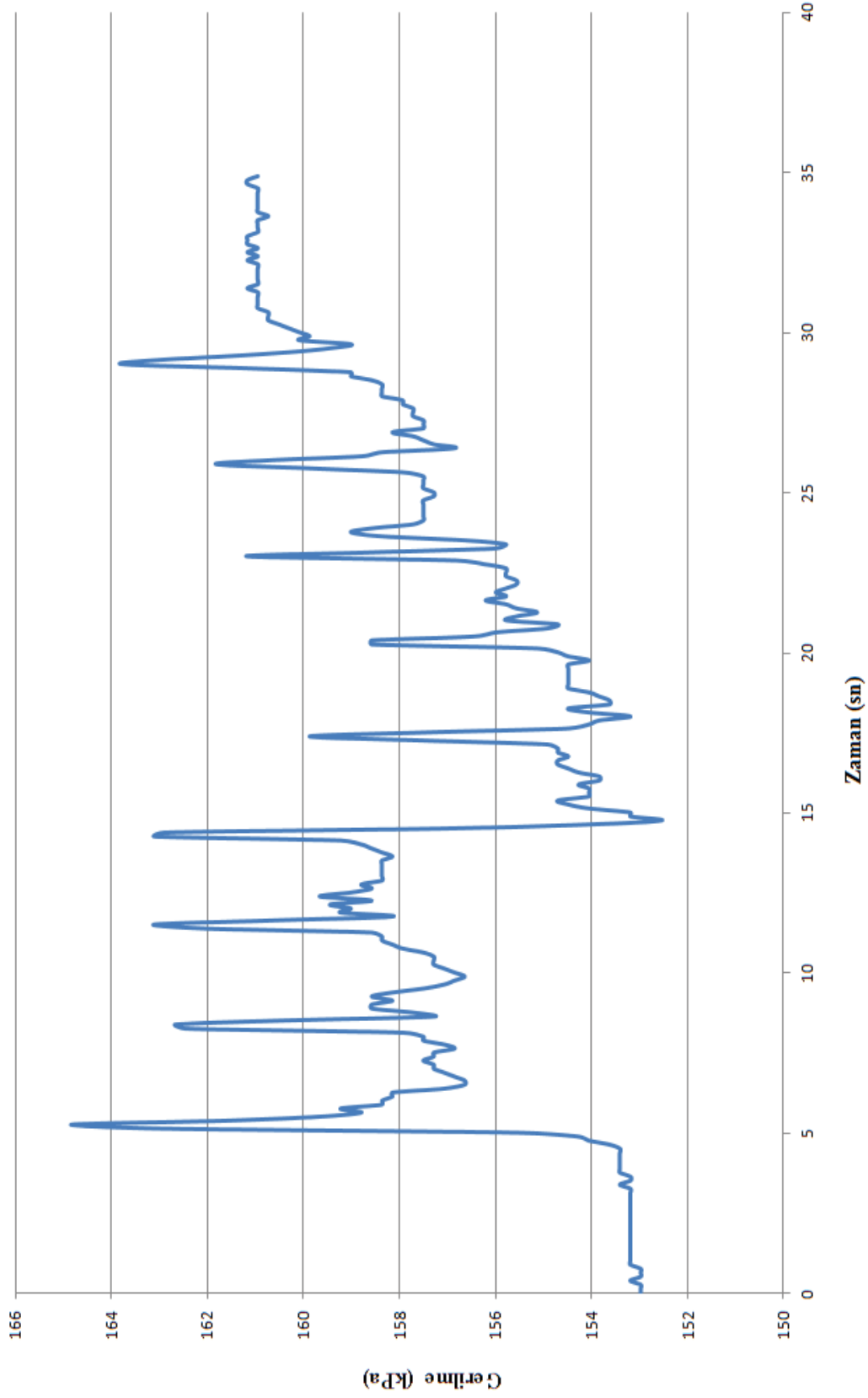
D=0-1mm, Dr=0.2, h=70-80cm için Zaman - Uç direnci grafiği

Ek A 14

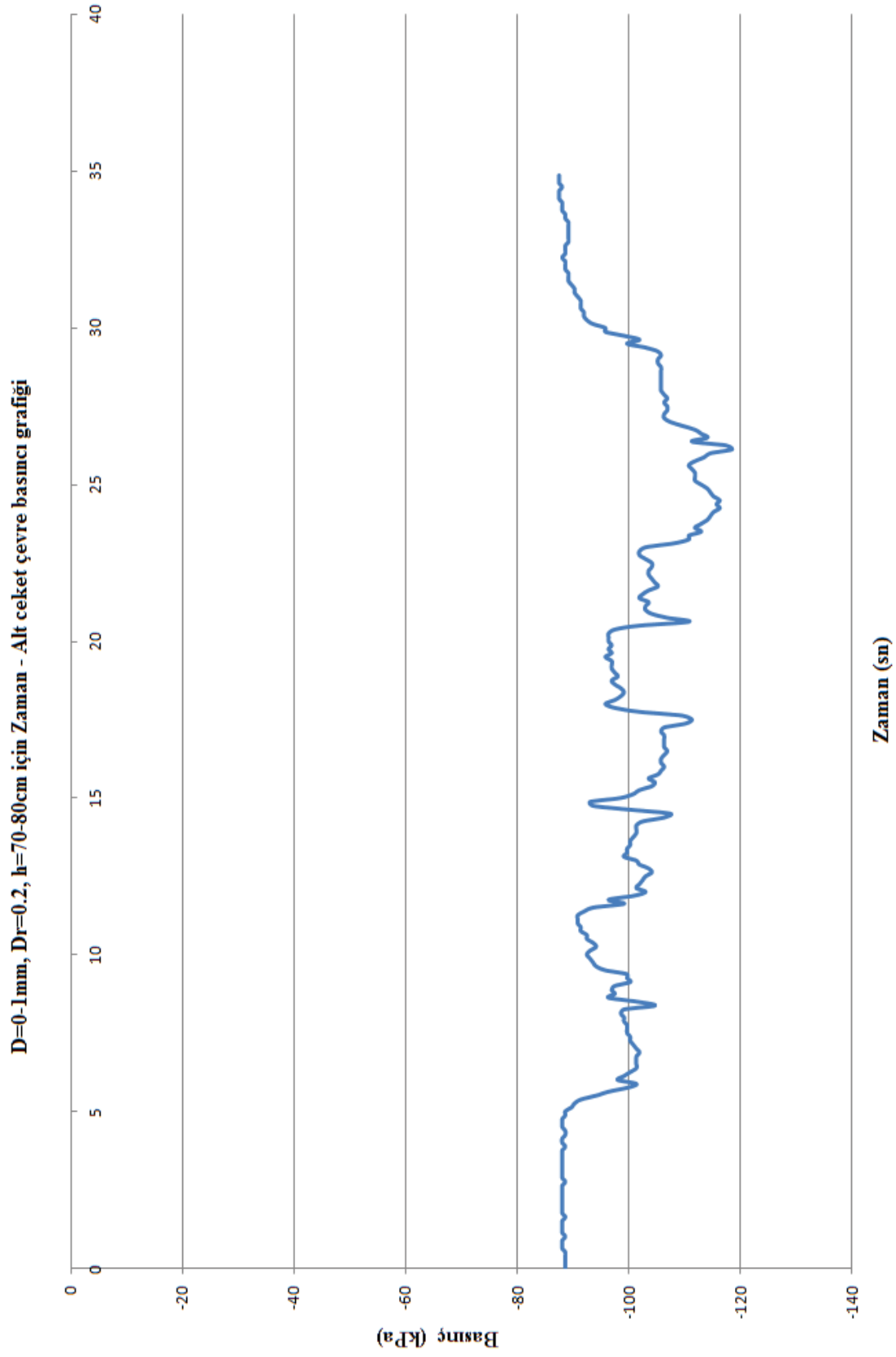


Ek A15

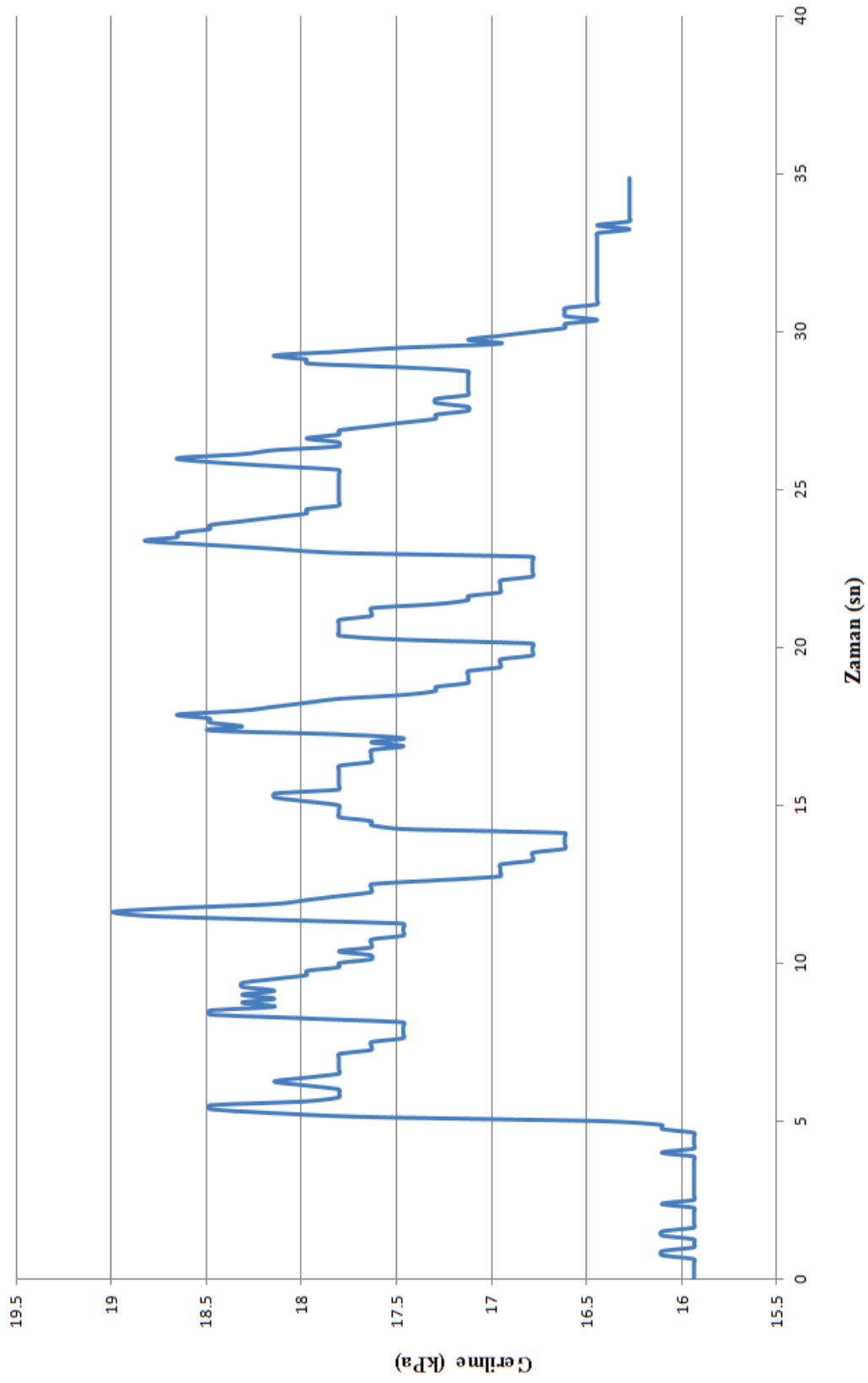
D=0-1mm, Dr=0.2, h=70-80cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği



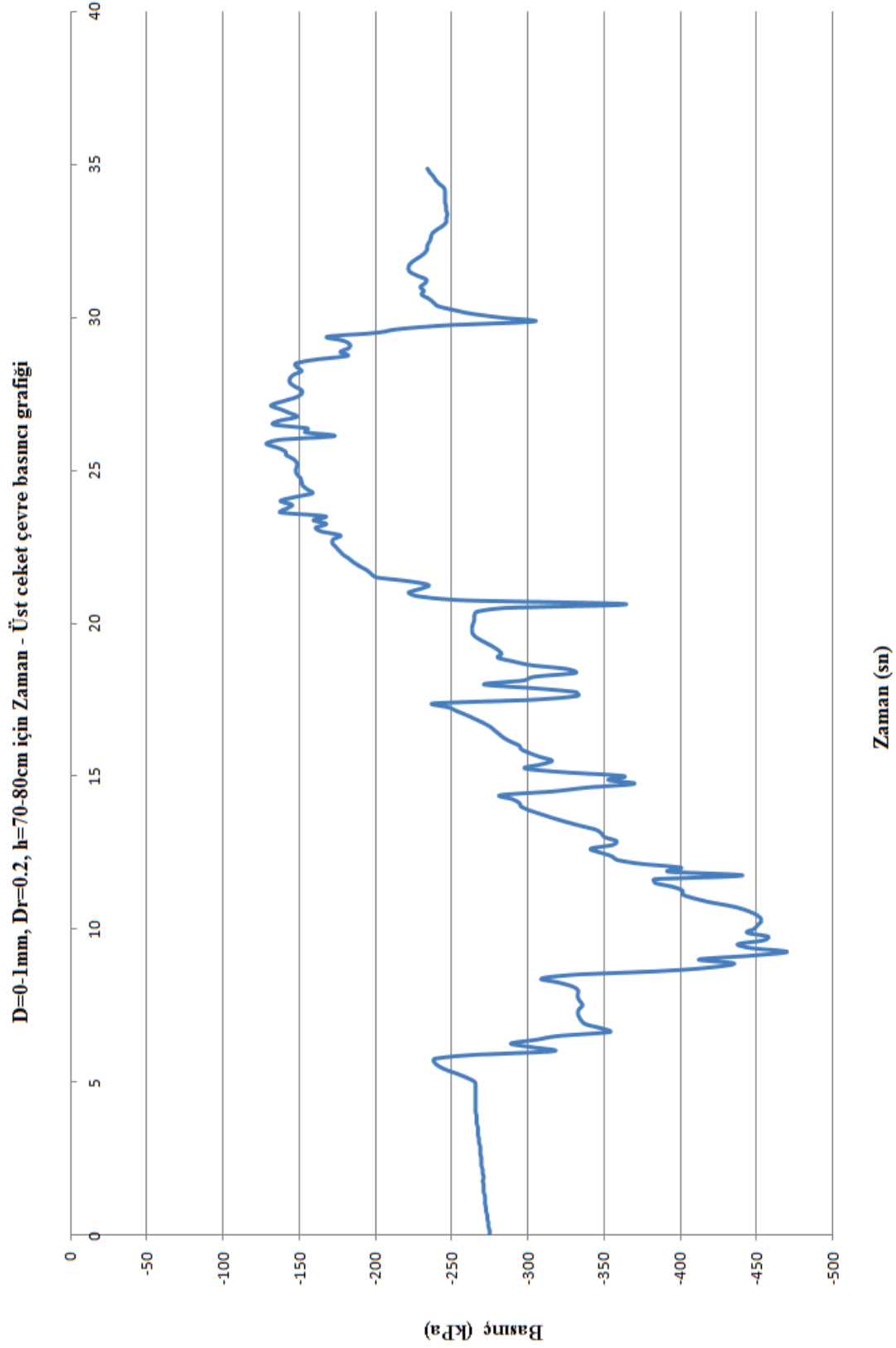
Ek A16



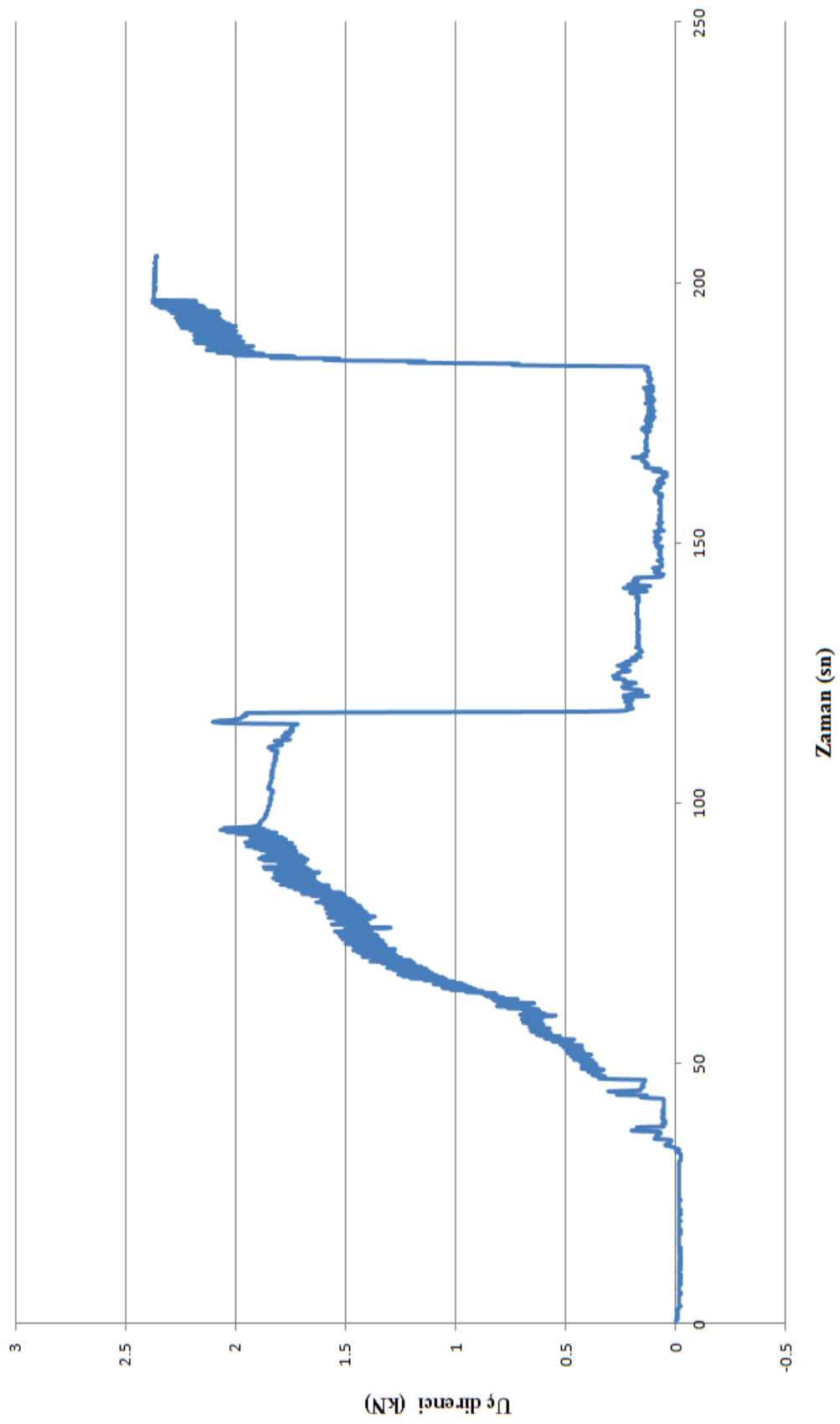
Ek A17

D=0-1mm, $D_r=0.2$, h=70-80cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği

Ek A18

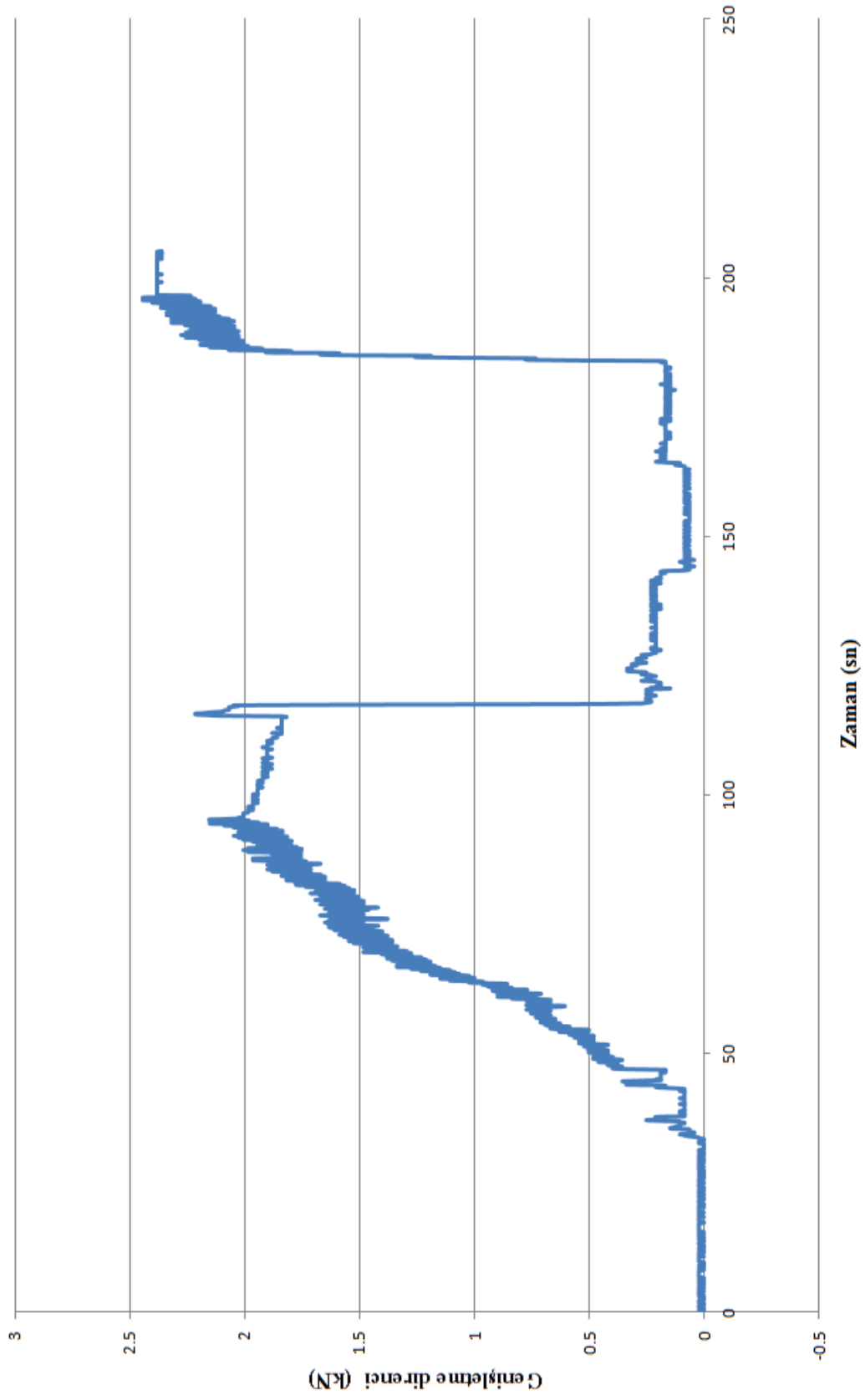


Ek A19

D=0-1mm, Dr=0.4, h=0-25cm için Zaman - Uç direnci grafiği

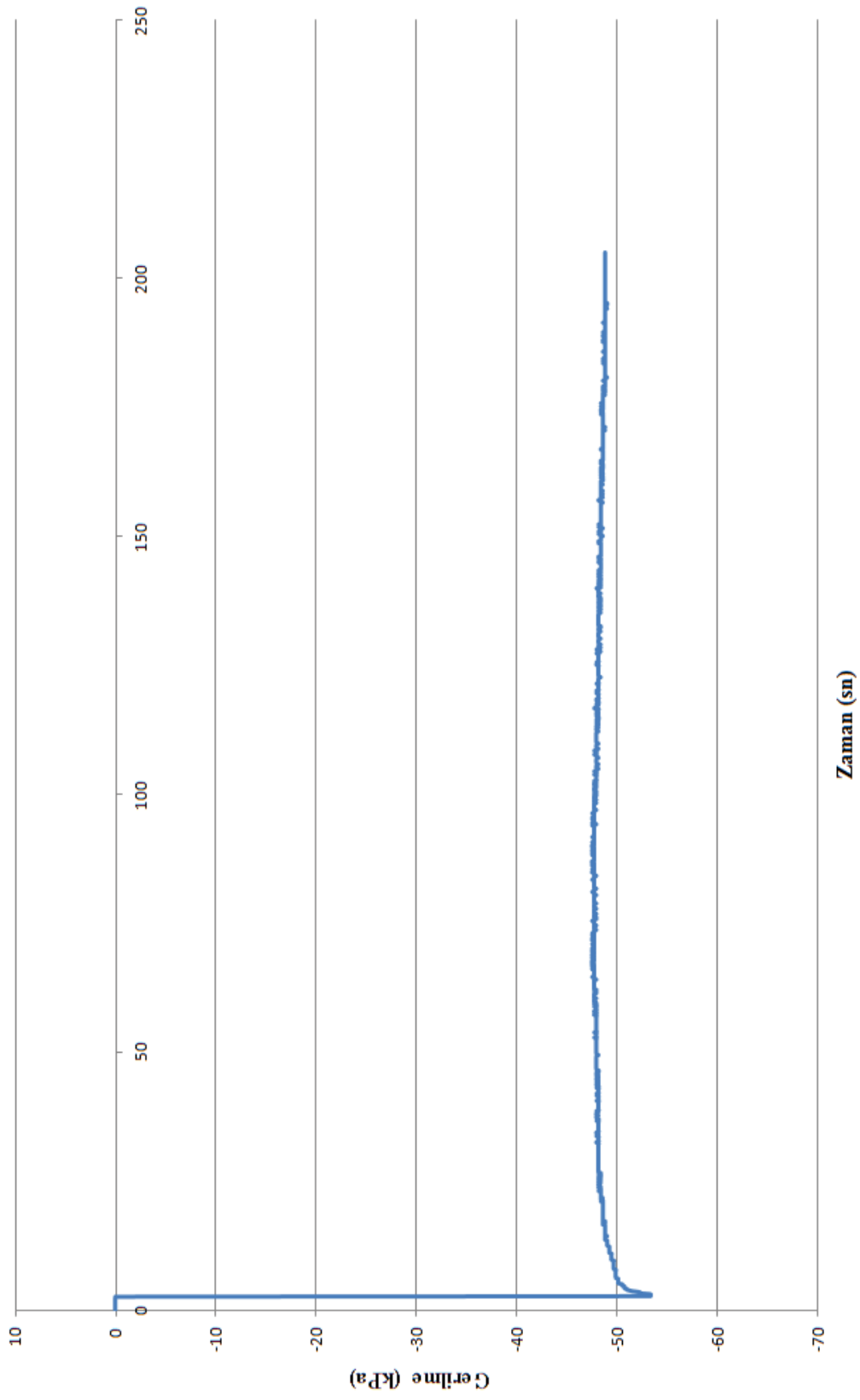
Ek A20

D=0.1mm, Dr=0.4, h=0.25cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği



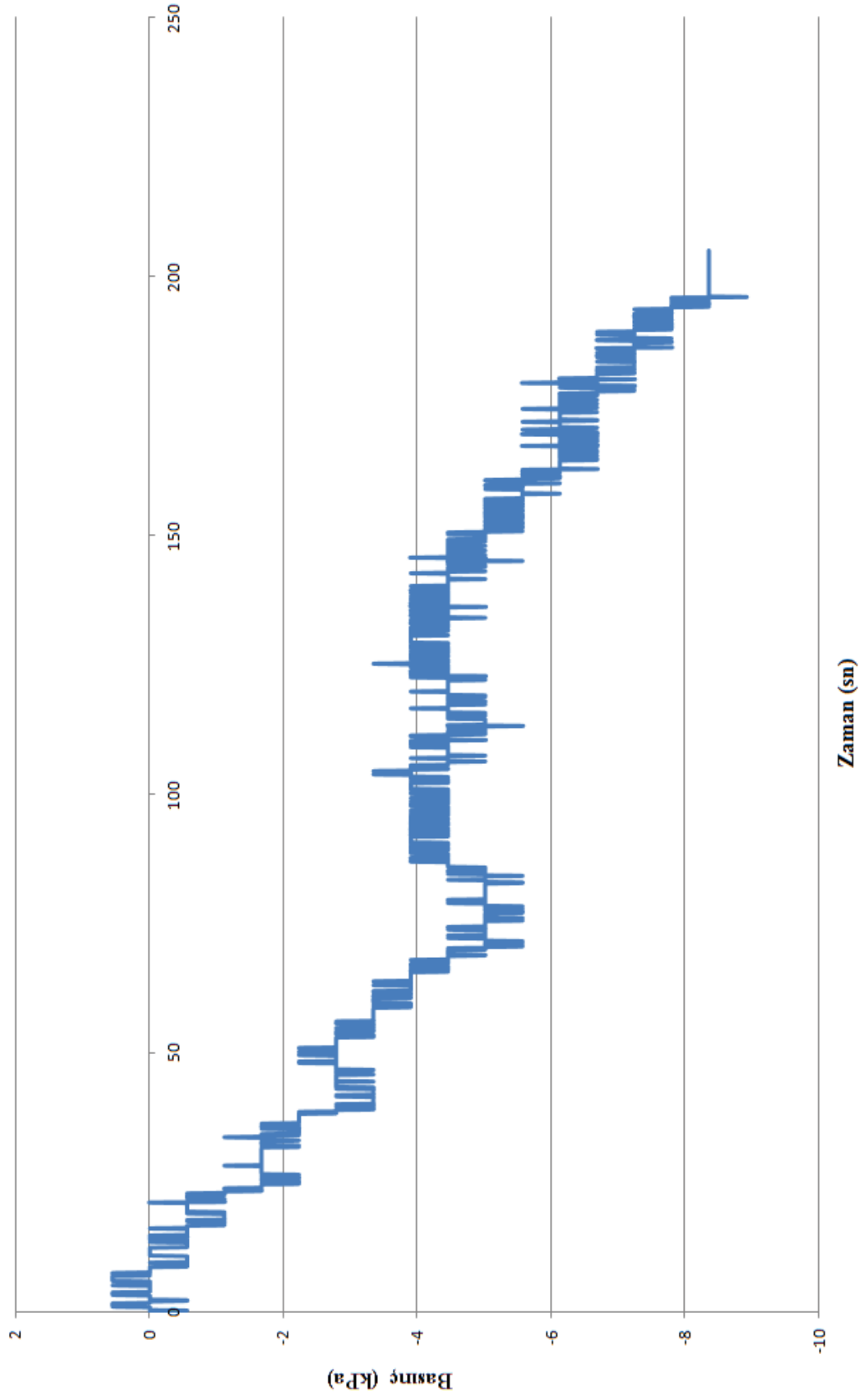
Ek A21

D=0-1mm, $D_r=0.4$, h=0-25cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği



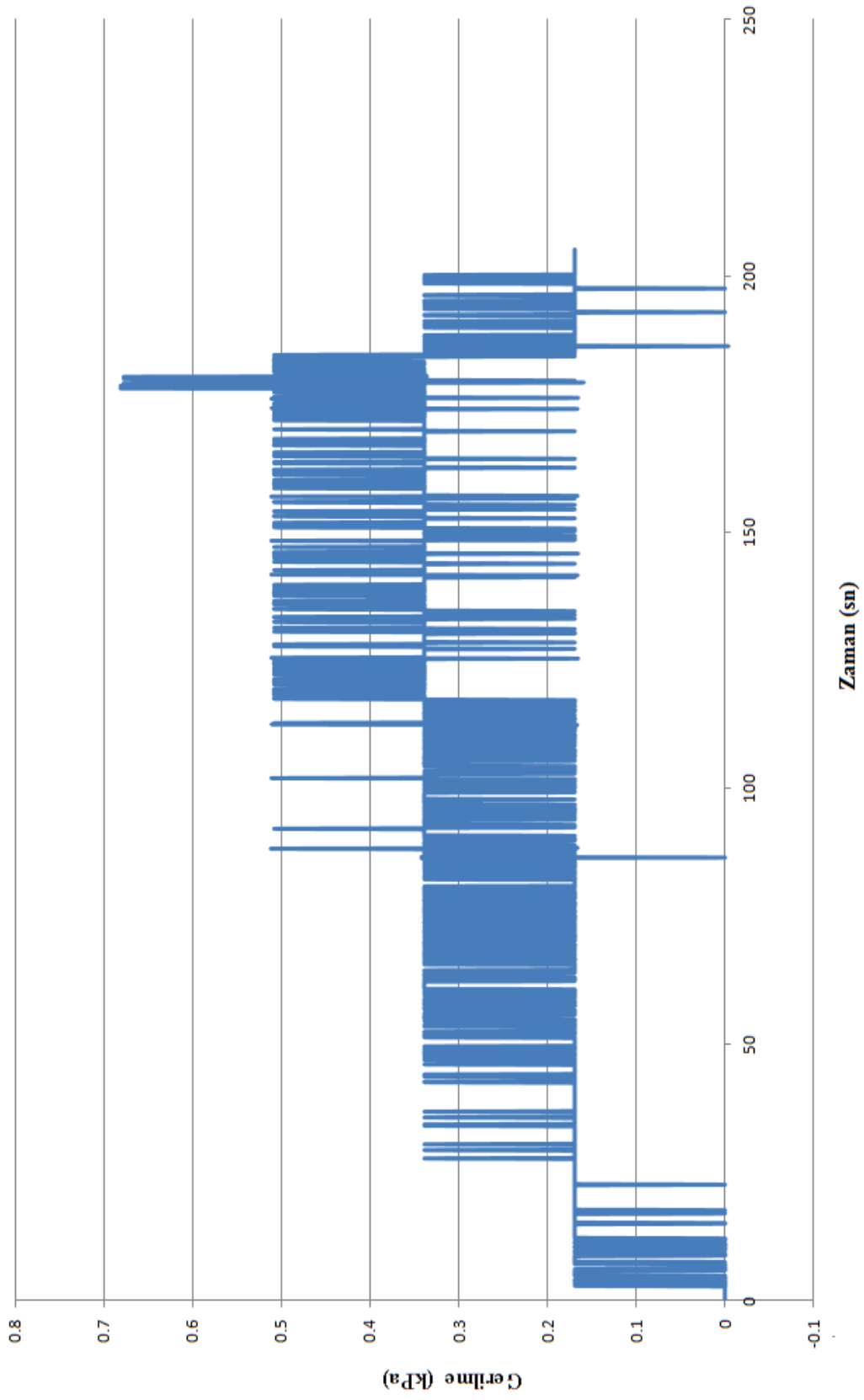
Ek A22

D=0-1mm, Dr=0.4, h=0-25cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

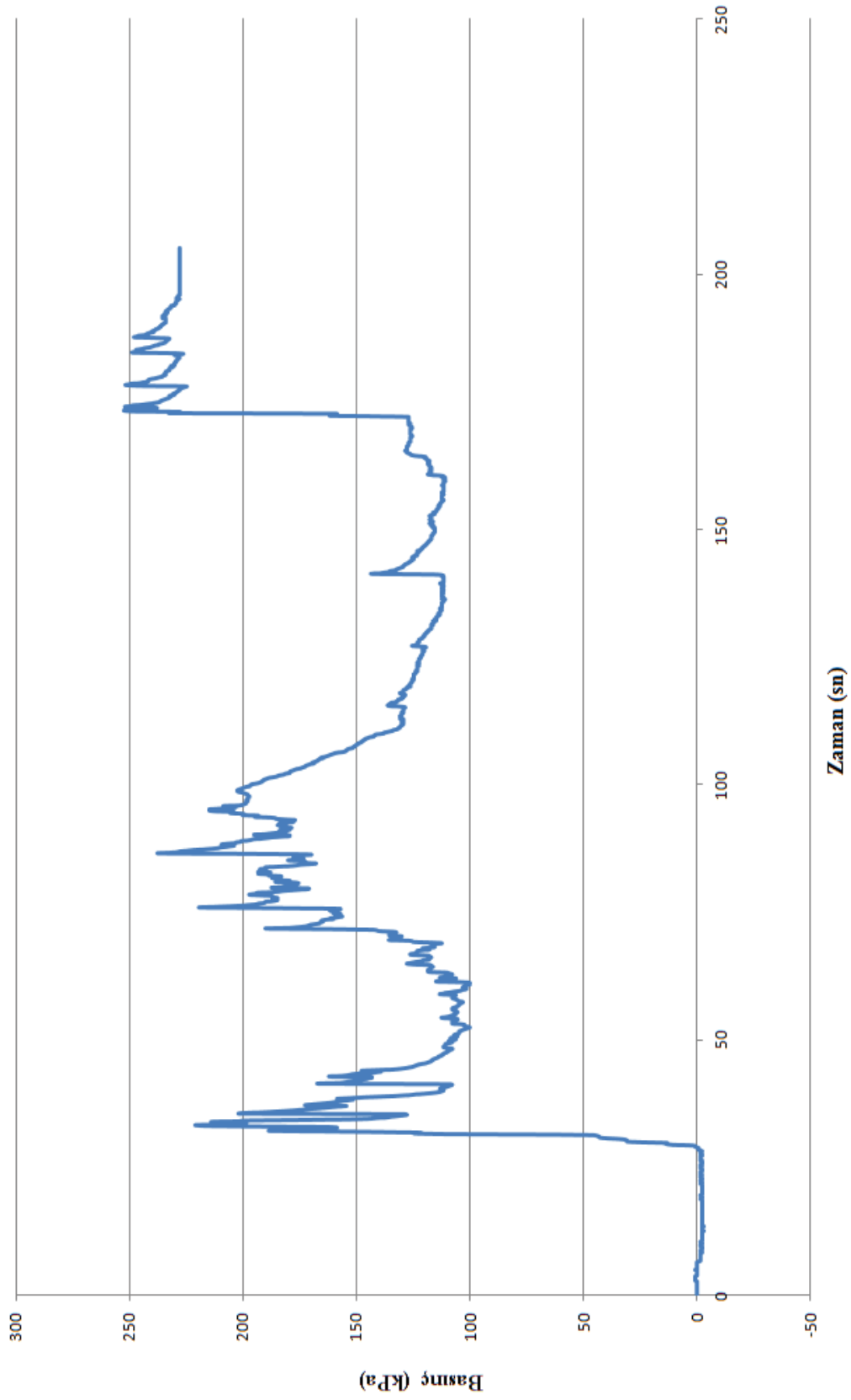


Ek A23

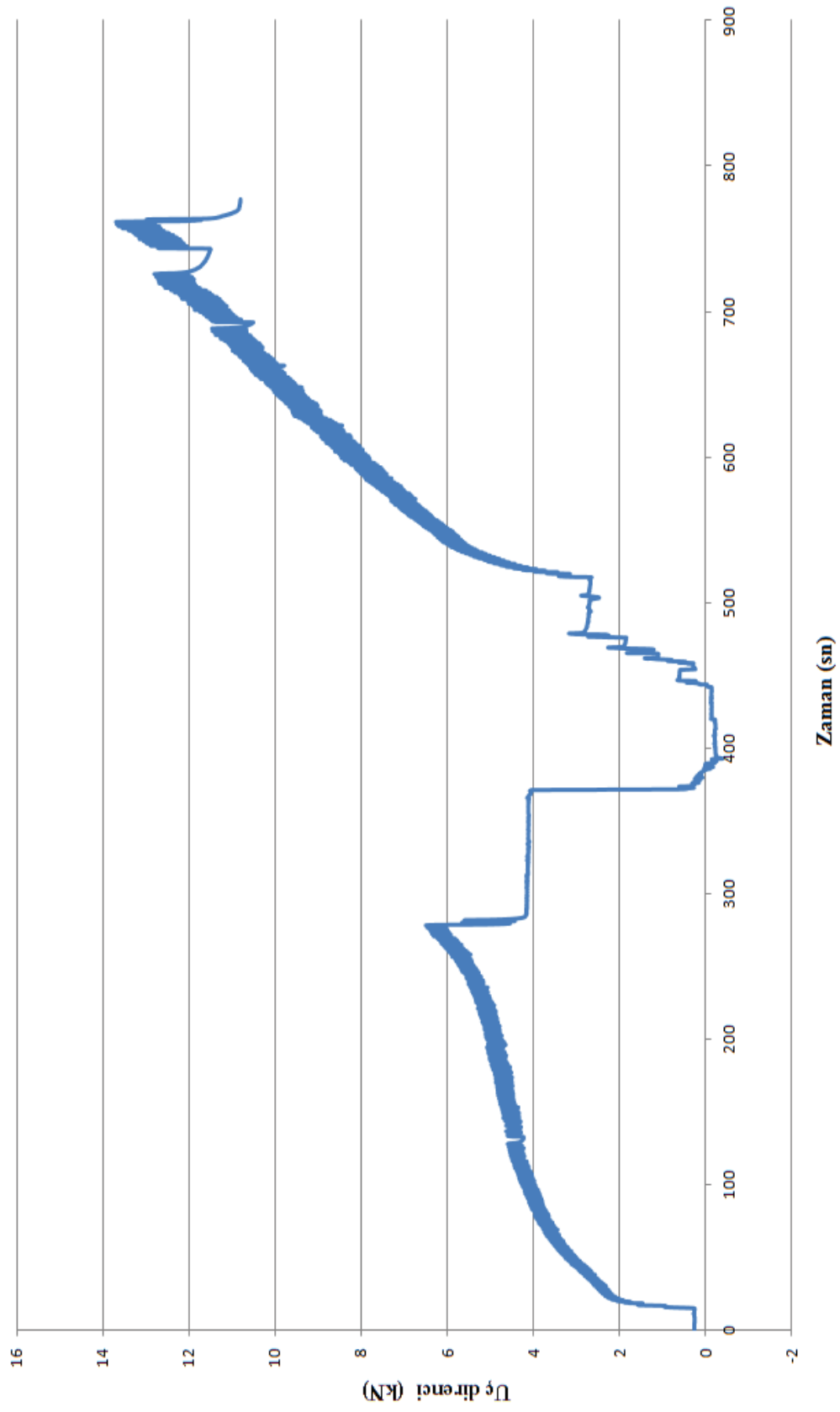
D=0-1mm, $D_r=0.4$, $h=0-25\text{cm}$ için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği



Ek A24

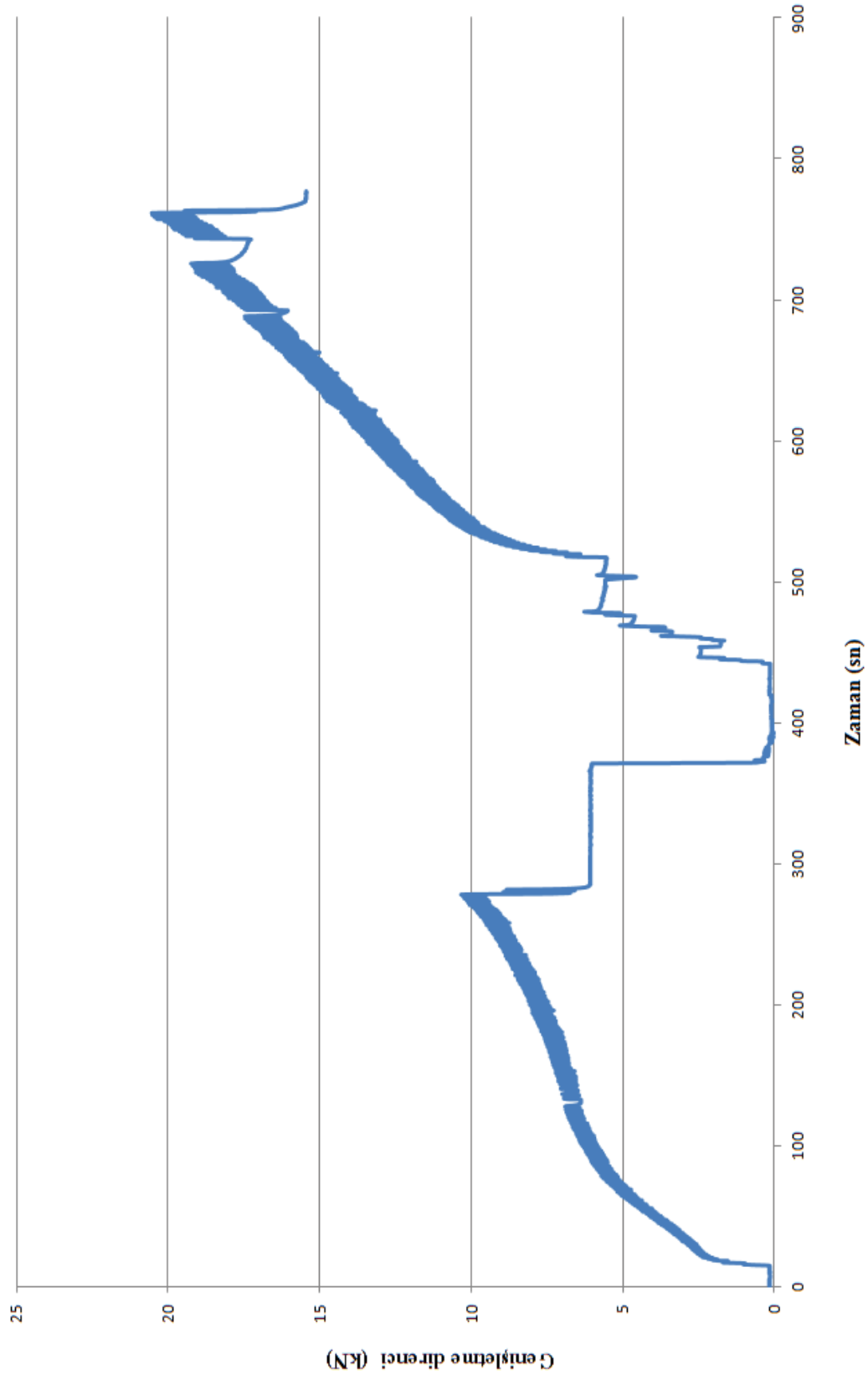
D=0-1mm, Dr=0.4, h=0-25cm için Zaman - Üst ceket çevre basıncı grafiği

Ek A25

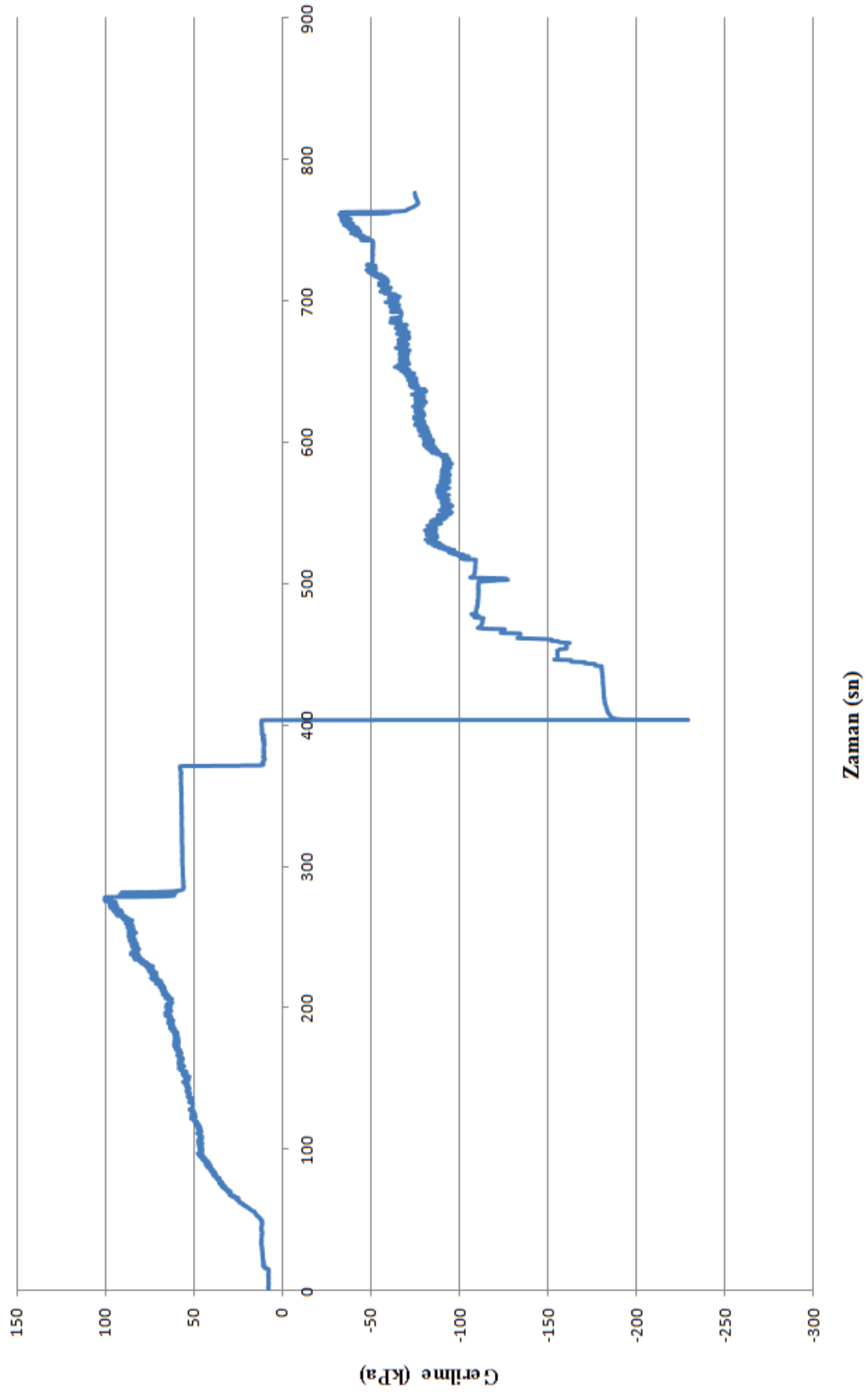
D=0.1mm, $D_r=0.4$, h=25-60cm için Zaman - Uç direnci grafiği

Ek A26

D=0-1mm, $D_r=0.4$, h=25-60cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği

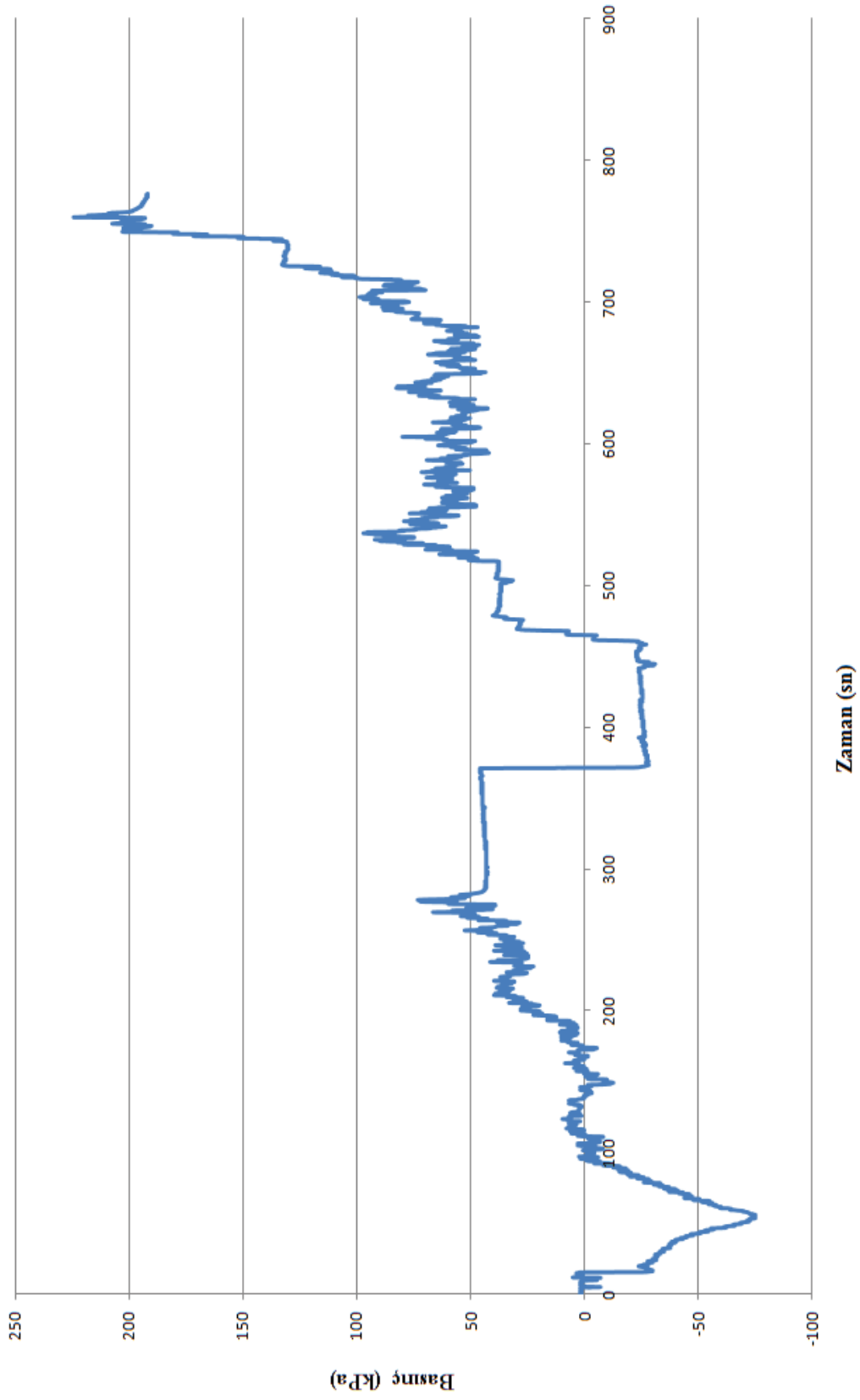


Ek A27

D=0-1mm, $D_r=0.4$, $h=25-60$ cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

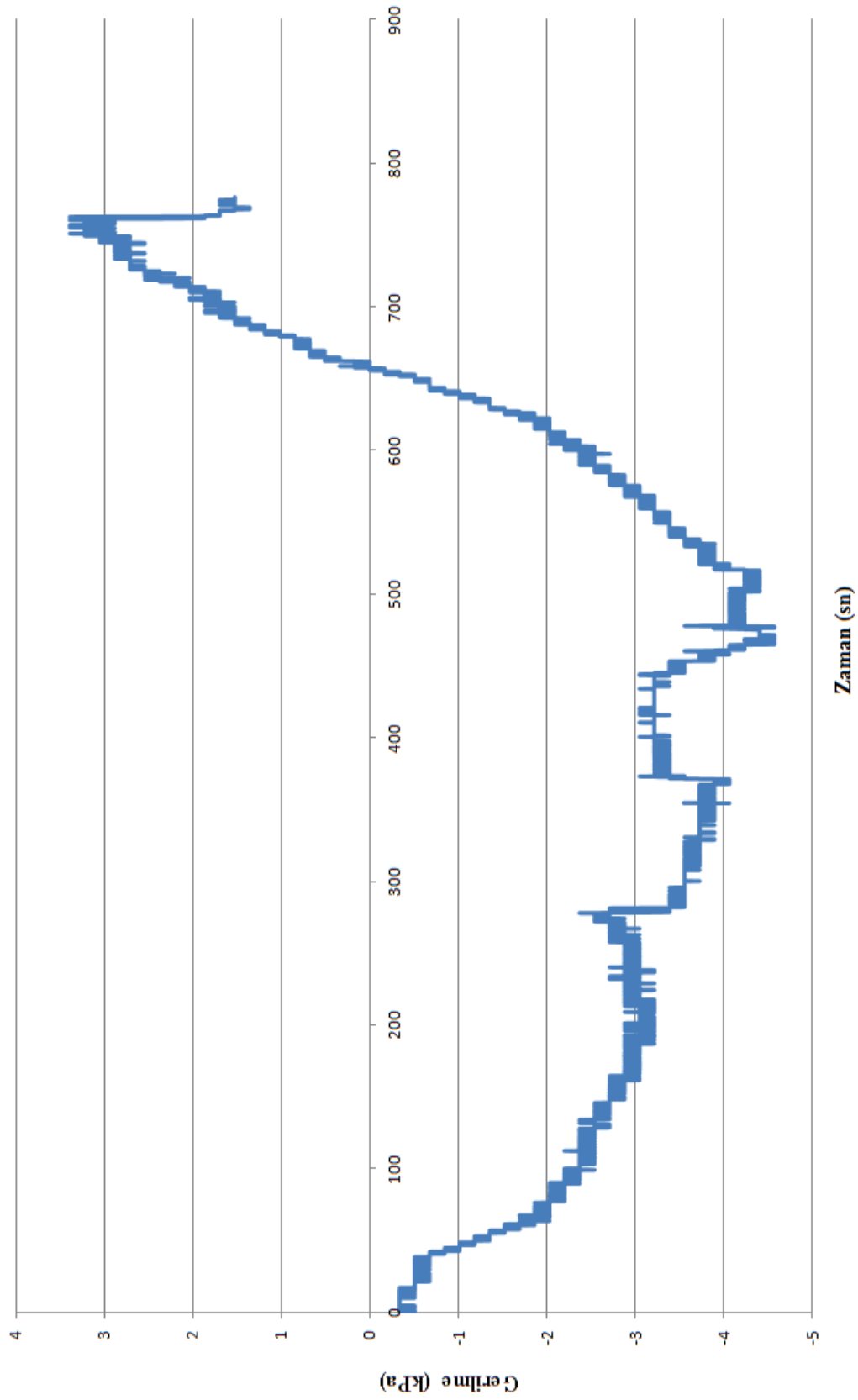
Ek A28

D=0-1mm, $D_r=0.4$, h=25-60cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

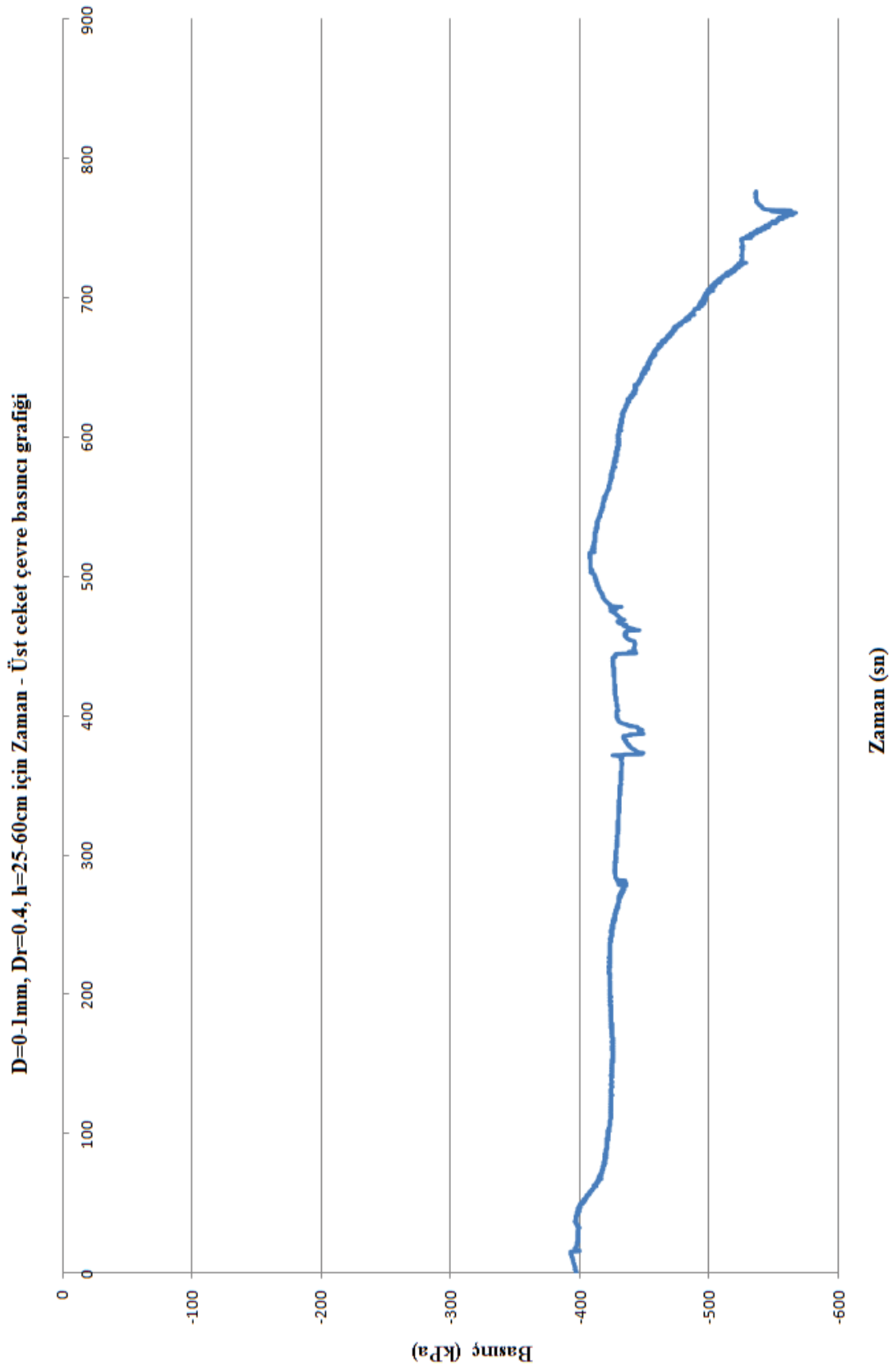


Ek A29

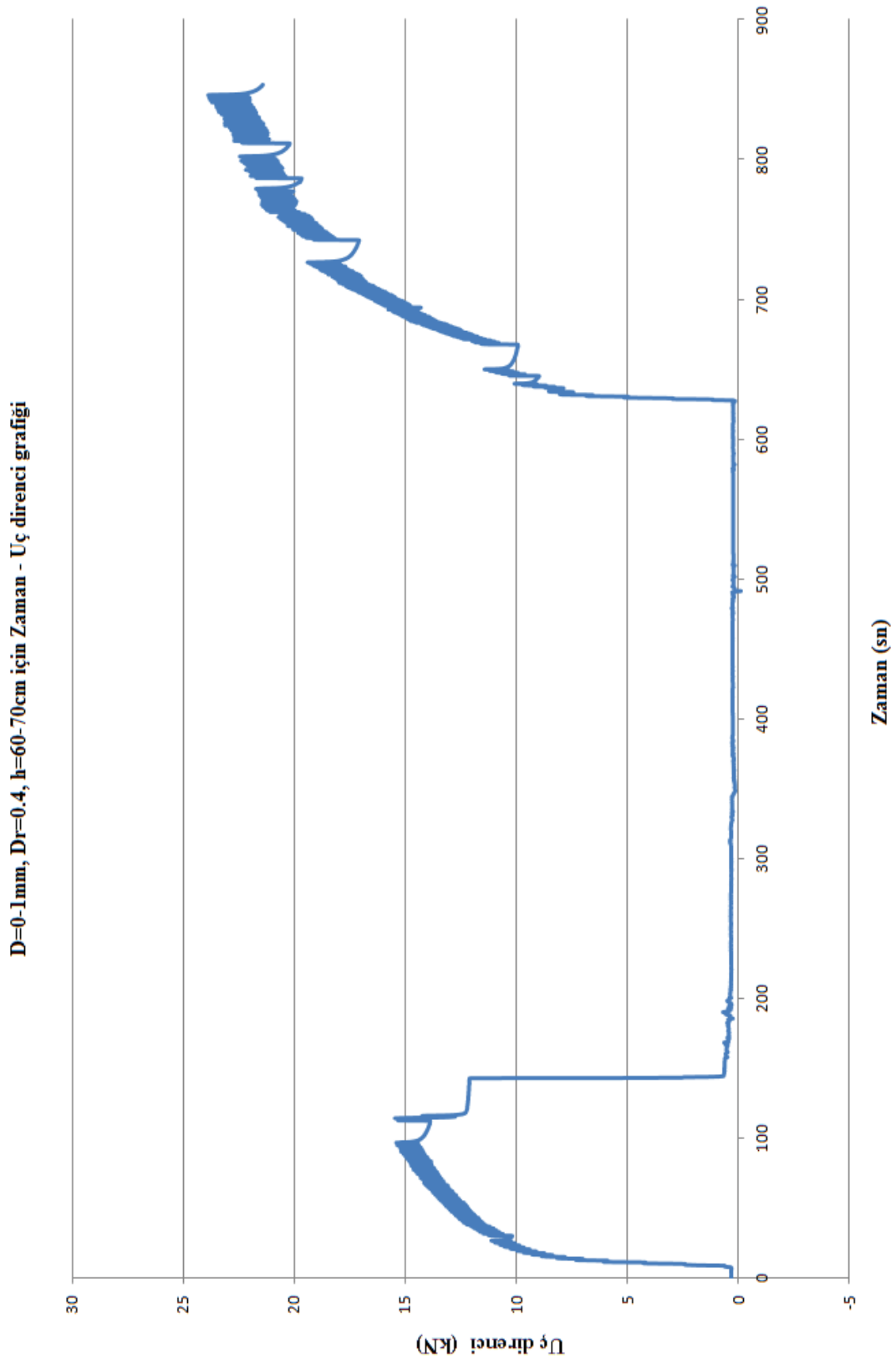
D=0-1mm, $D_r=0.4$, h=25-60cm için Zaman - Üst çeket kayma gerilmesi grafiği



Ek A30

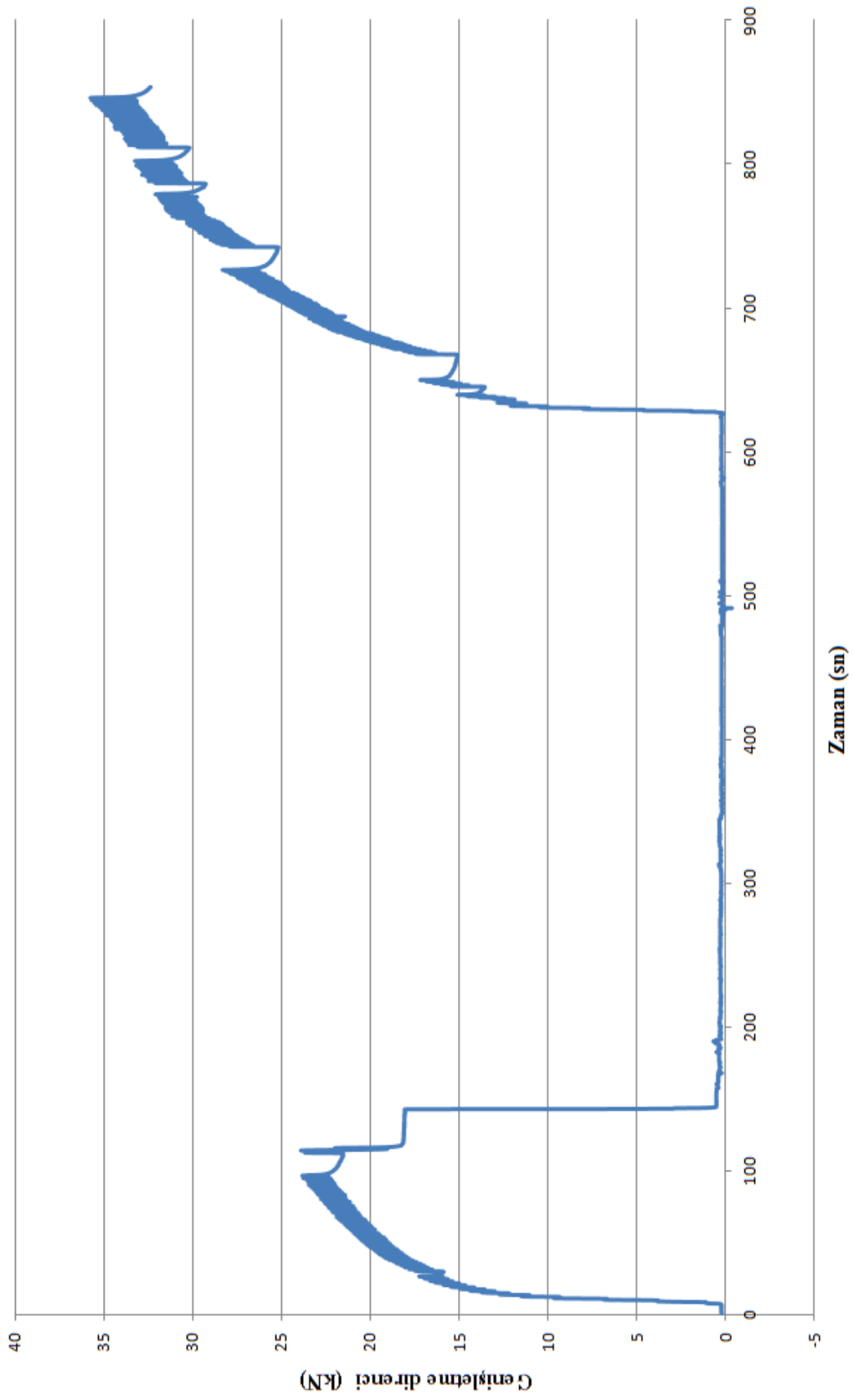


Ek A31



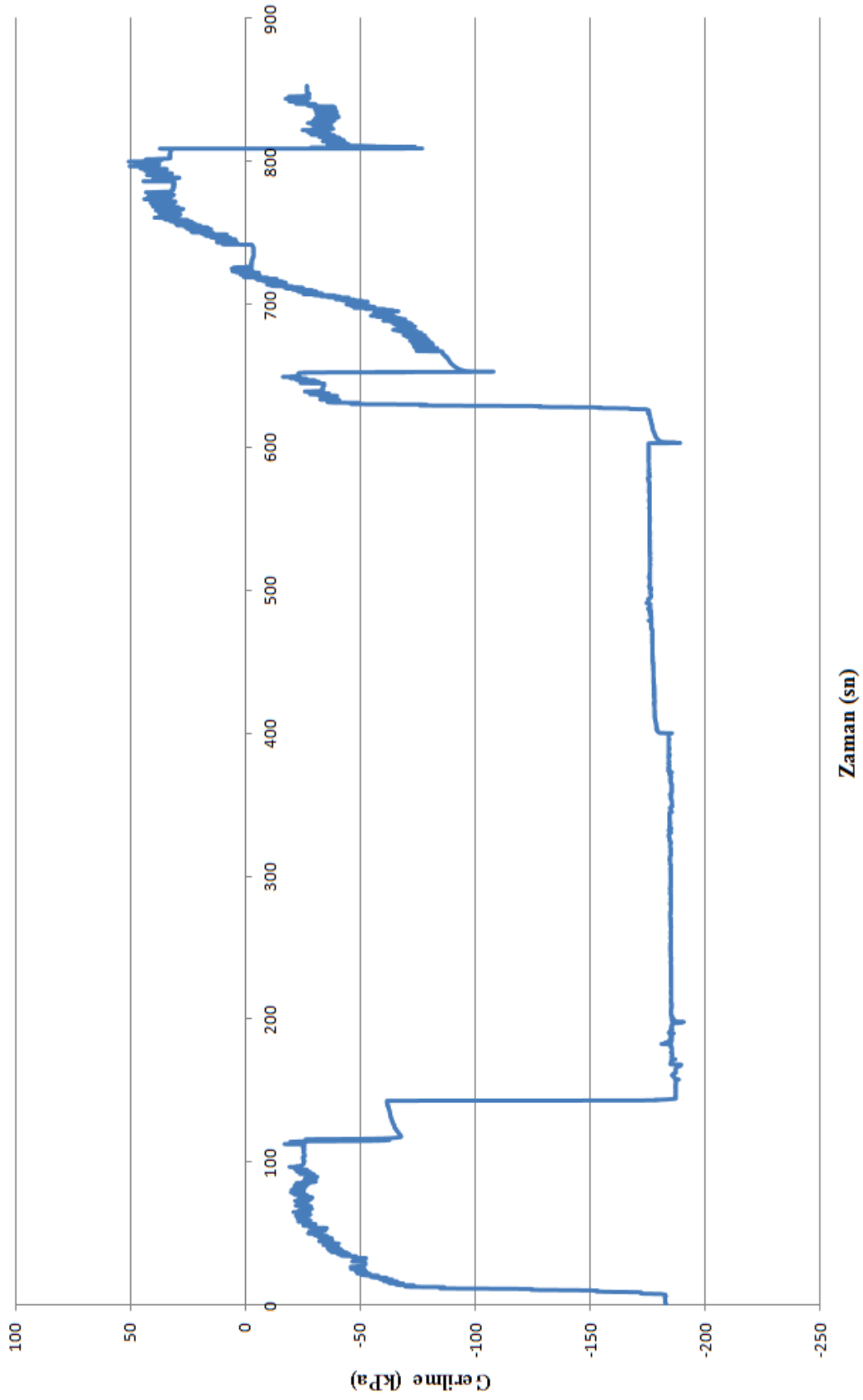
Ek A32

D=0-1mm, $D_r=0.4$, h=60-70cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği

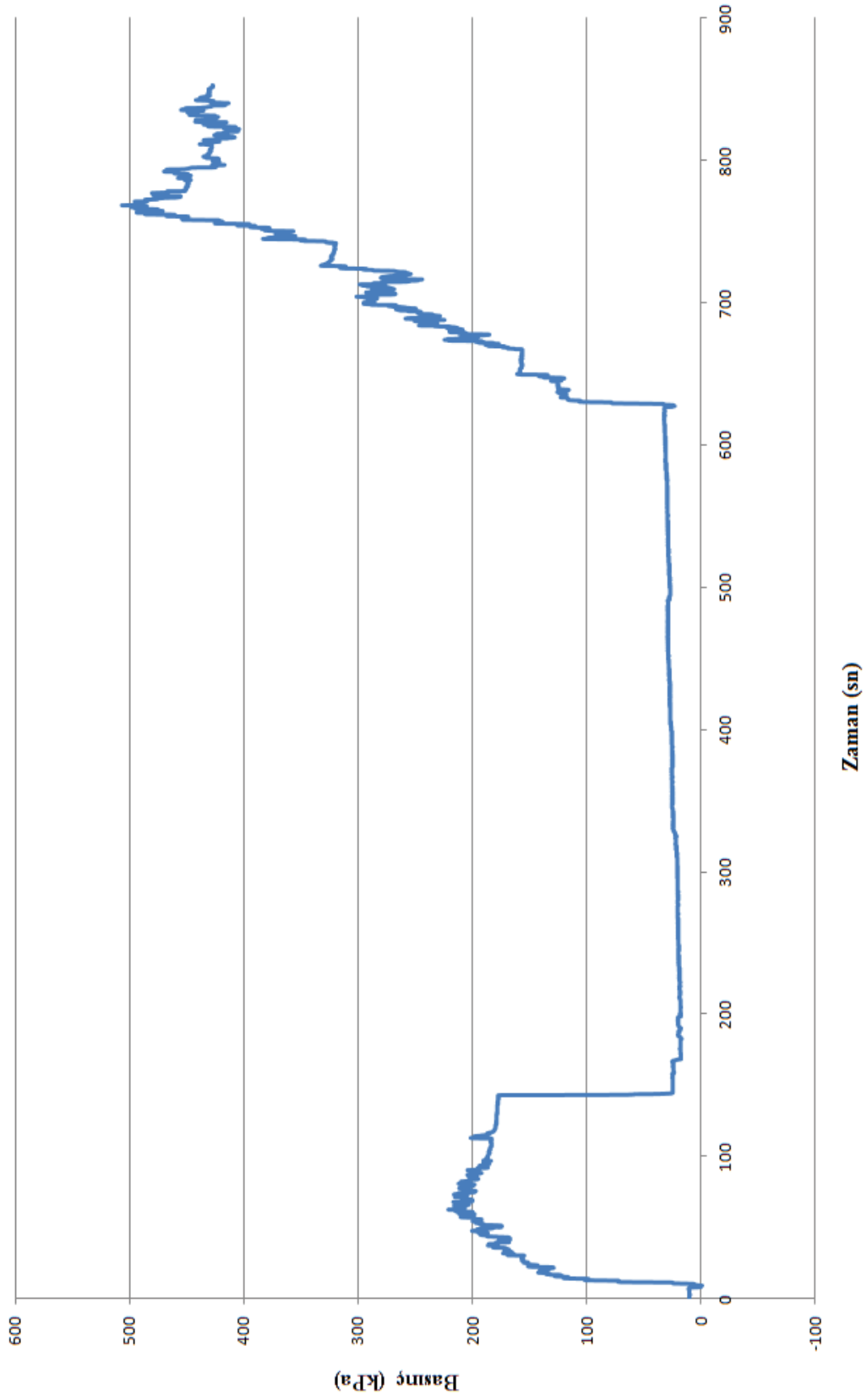


Ek A33

D=0-1mm, Dr=0.4, h=60-70cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

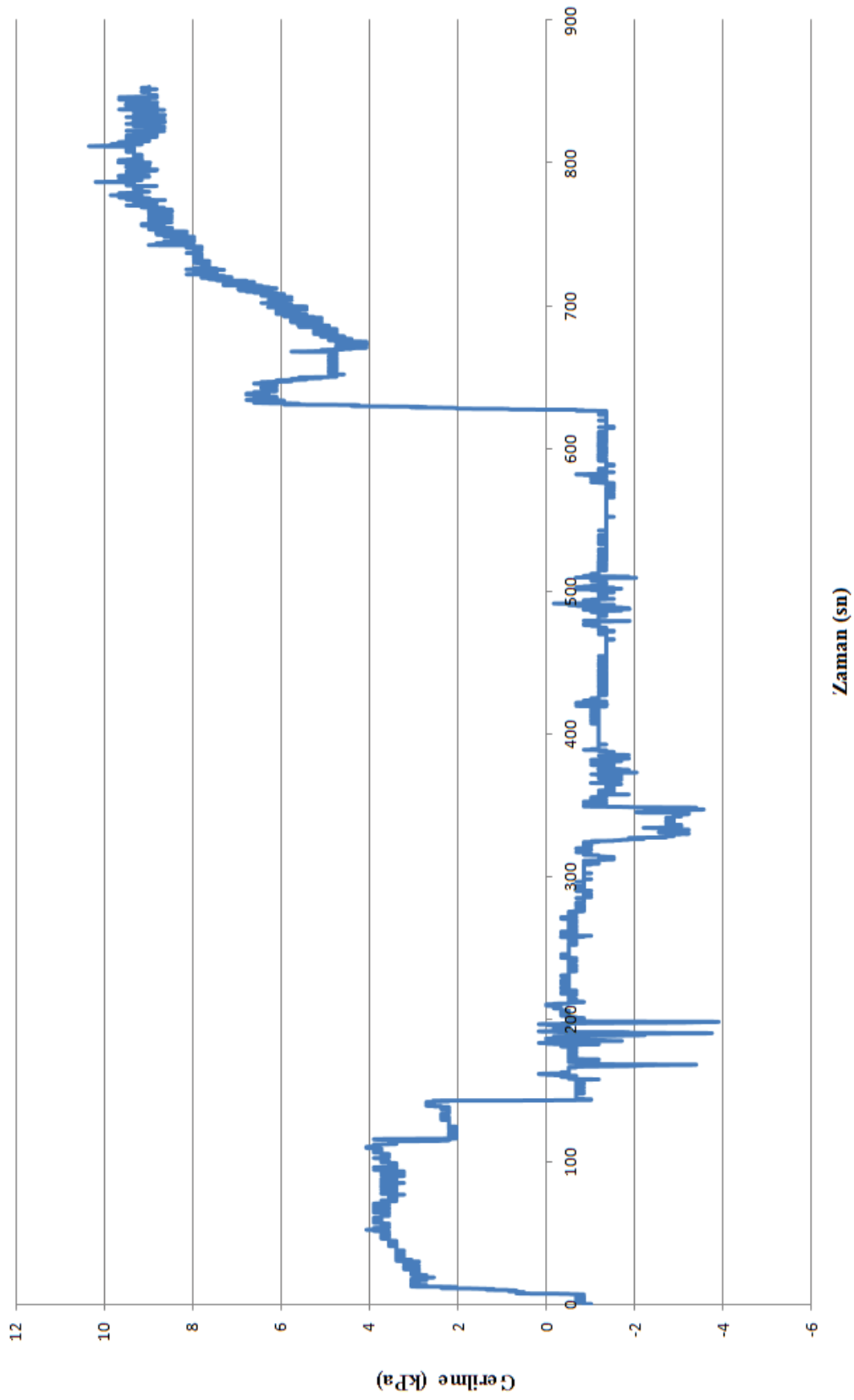


Ek A34

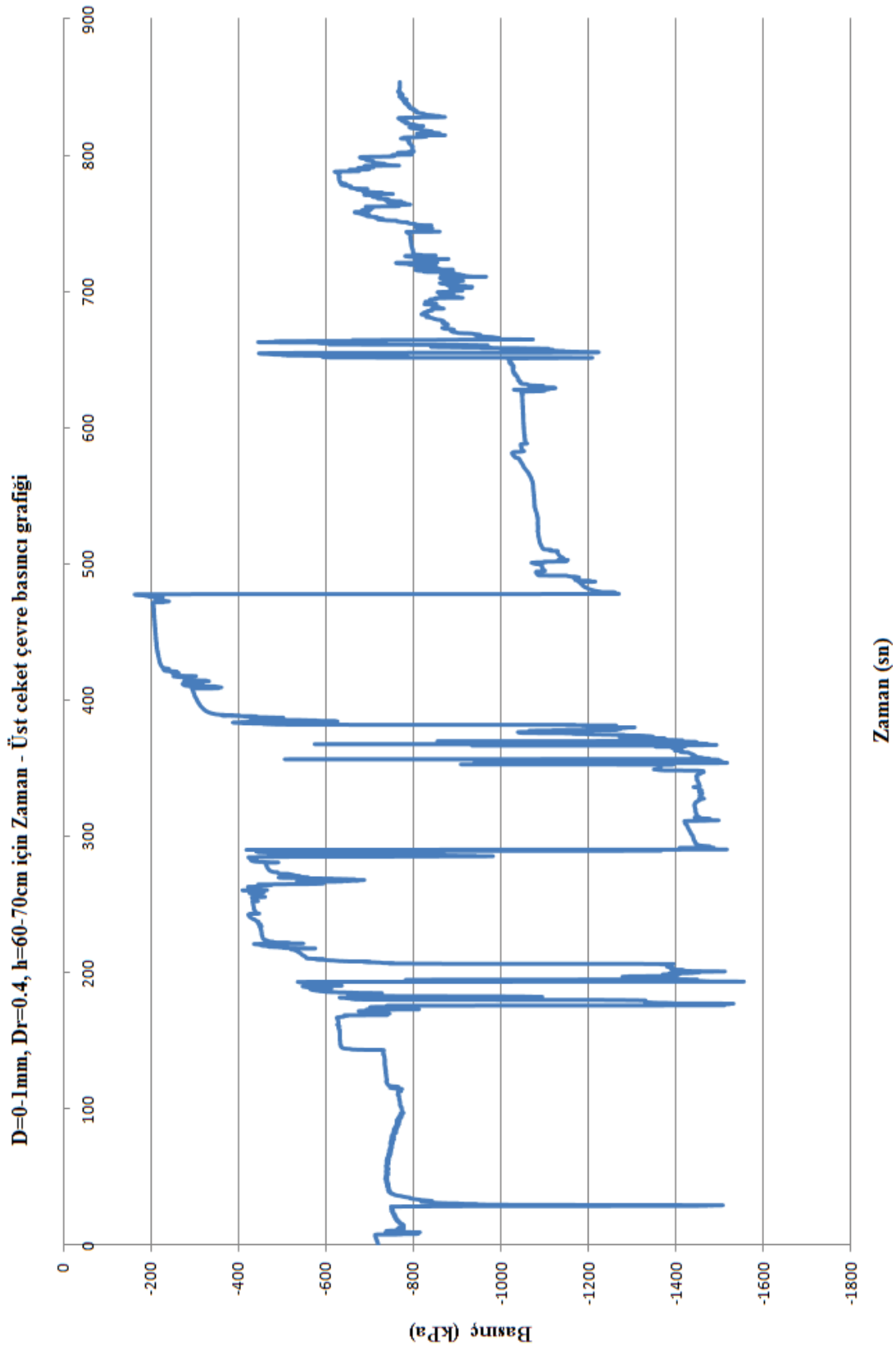
D=0-1mm, $D_r=0.4$, h=60-70cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

Ek A35

D=0.1mm, Dr=0.4, h=60-70cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği

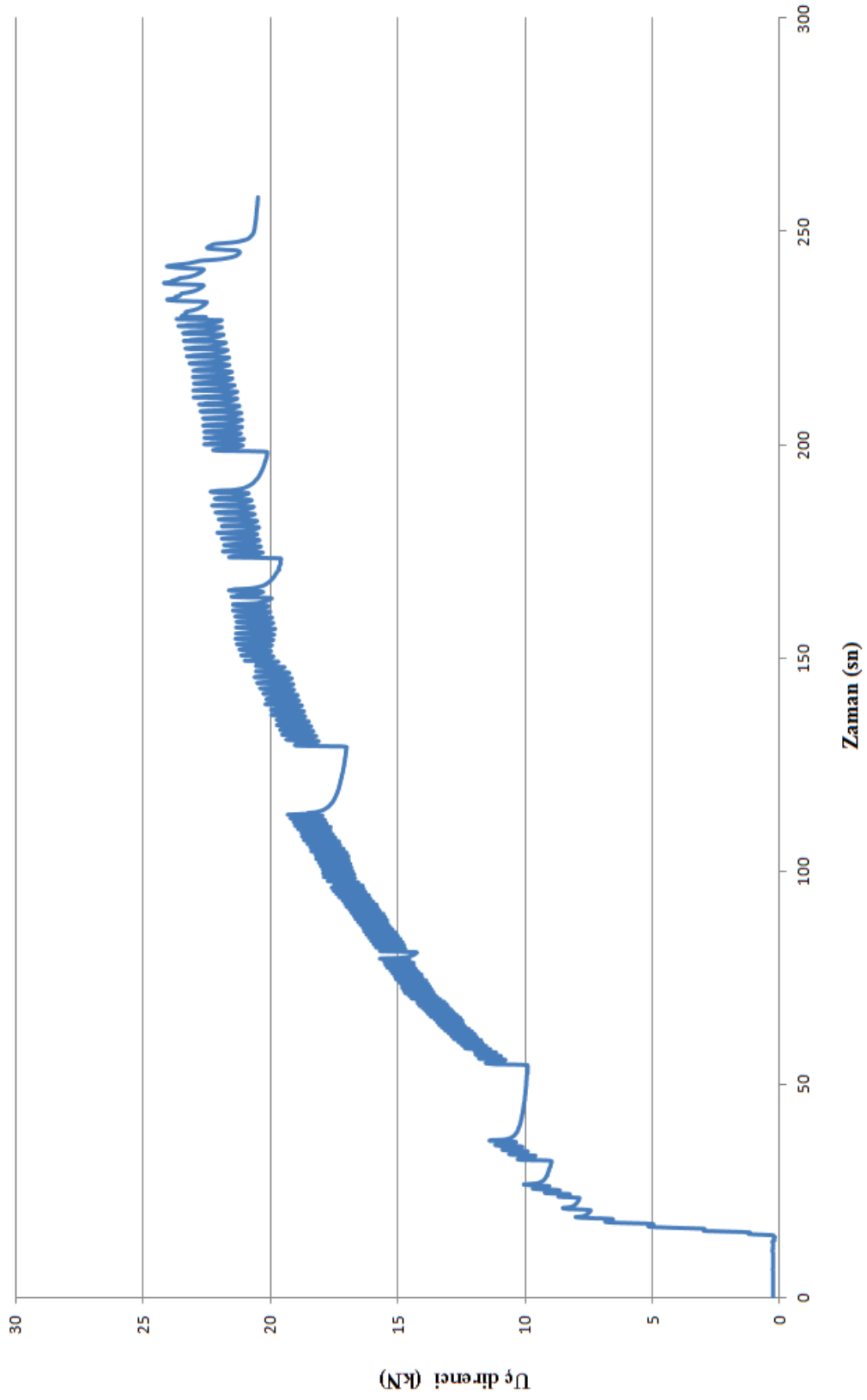


Ek A36

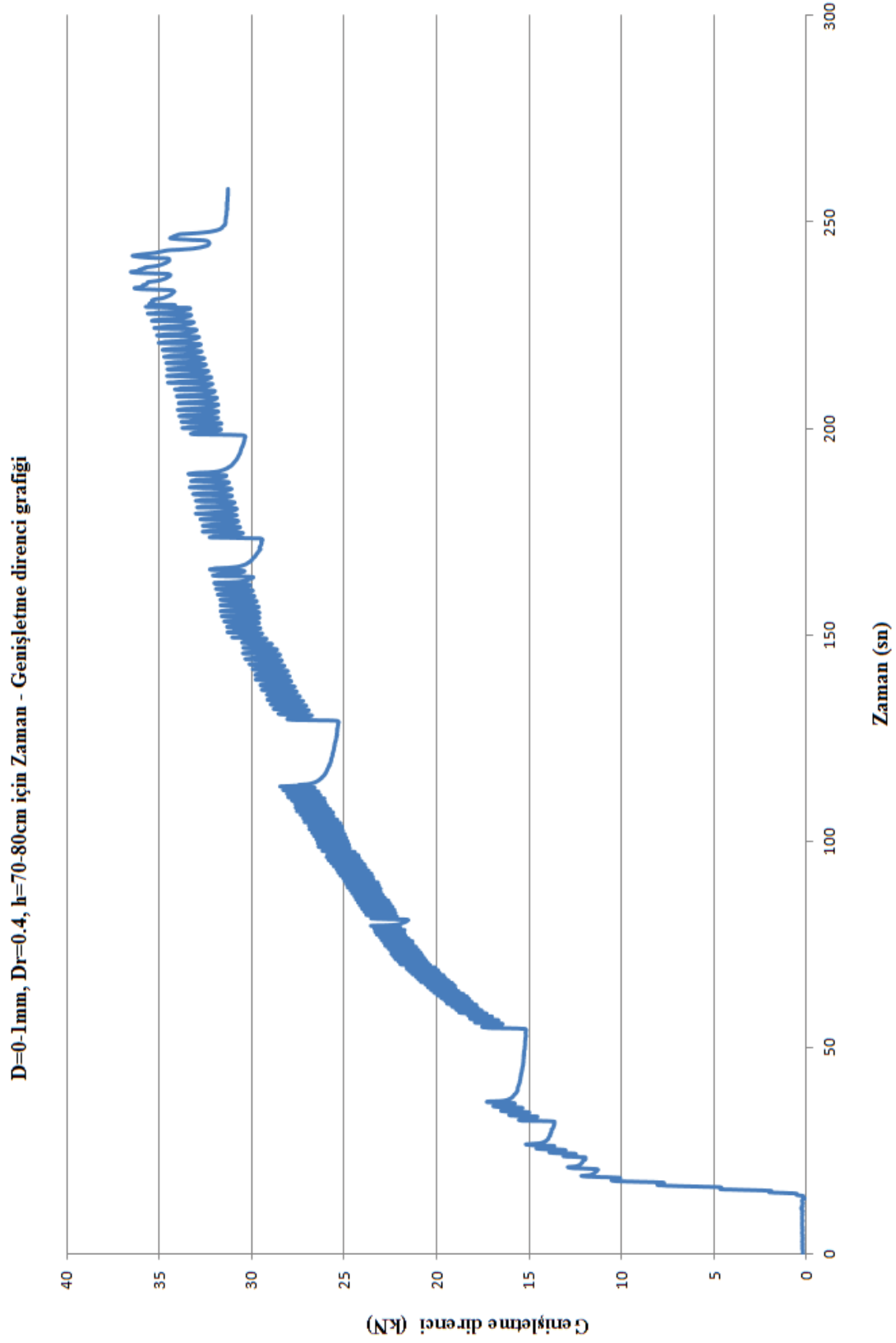


Ek A37

D=0.1mm, Dr=0.4, h=70-80cm için Zaman - Uç direnci grafiği

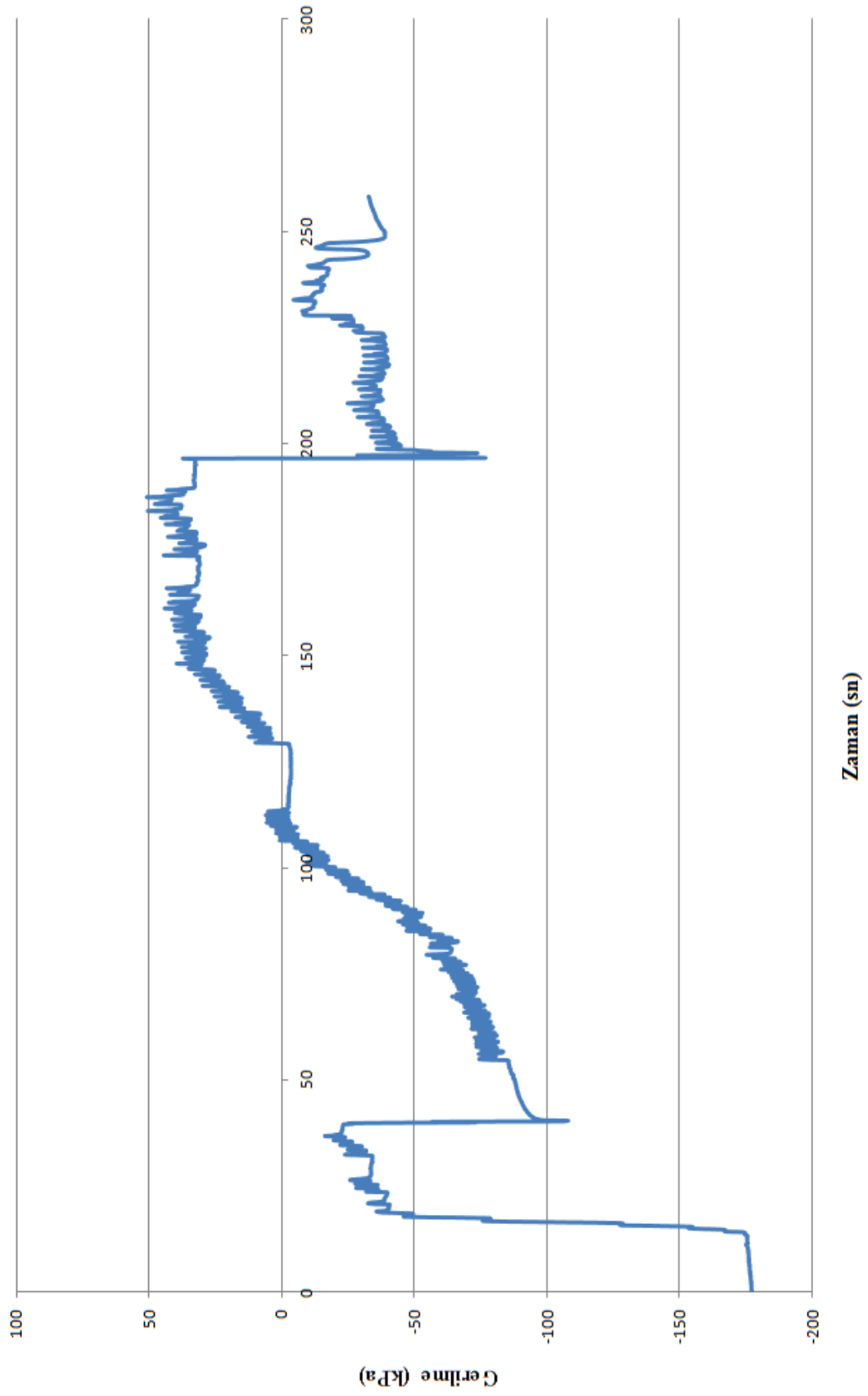


Ek A38



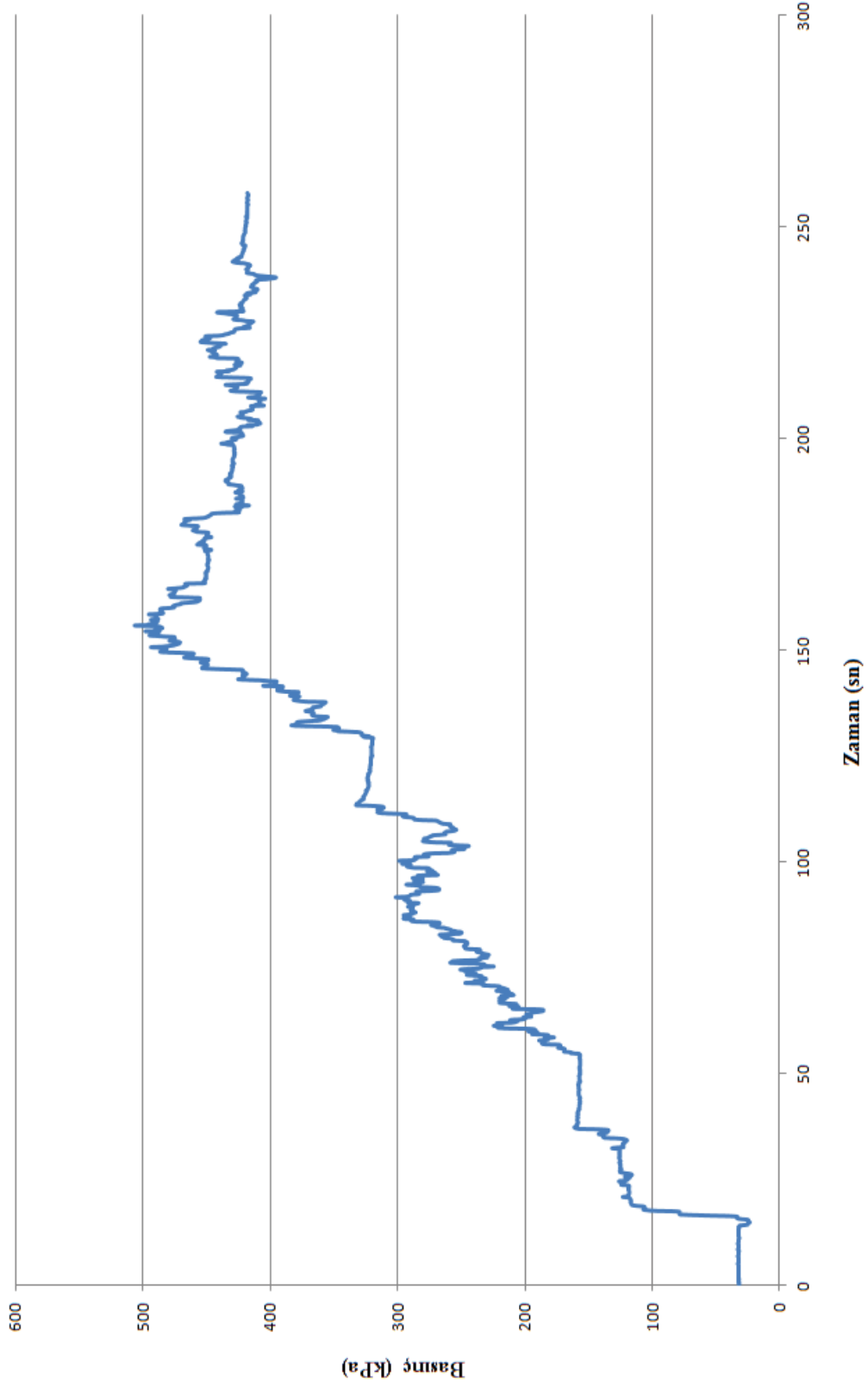
Ek A39

D=0-1mm, $D_r=0.4$, h=70-80cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği



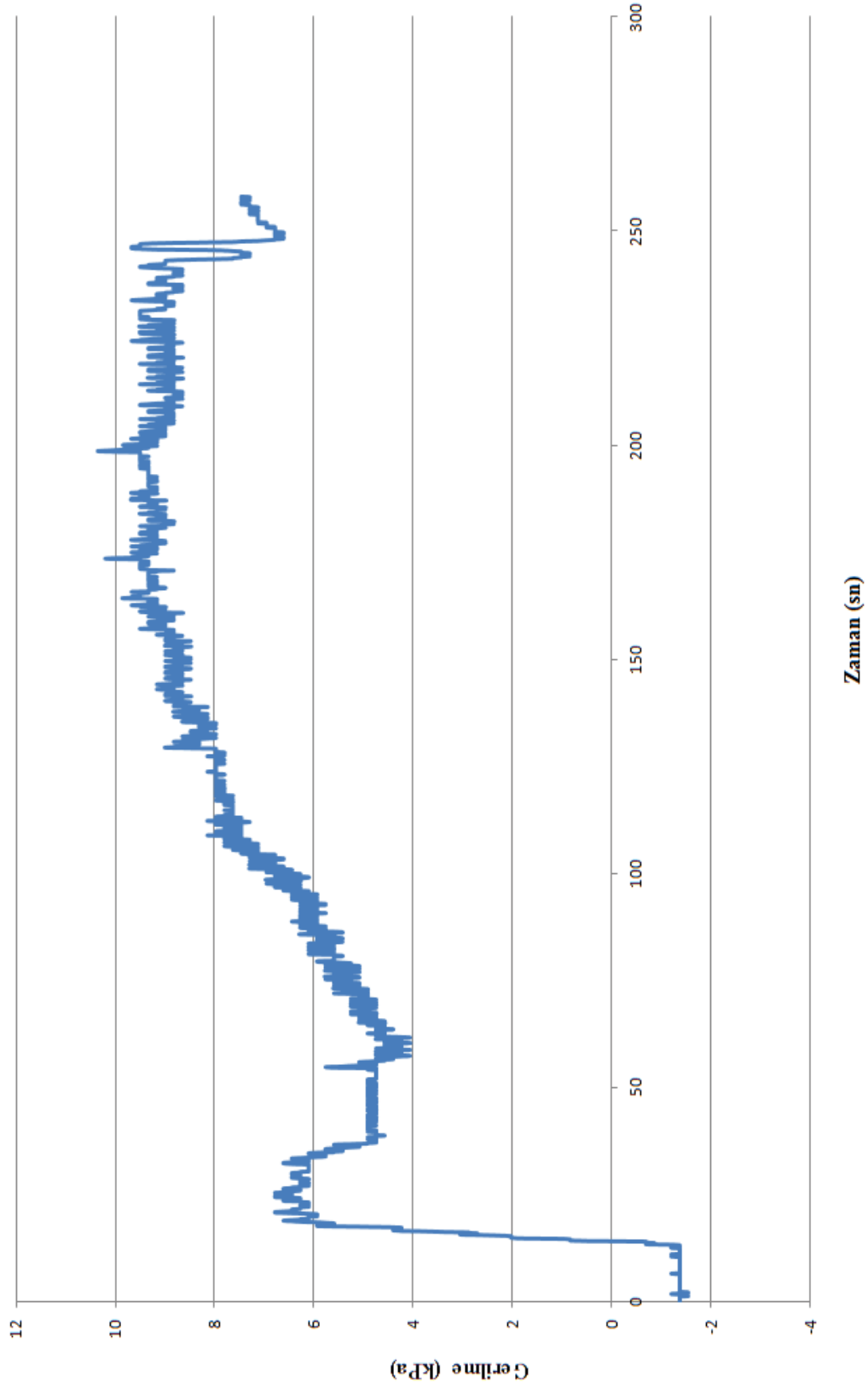
Ek A40

D=0-1mm, $D_r=0.4$, h=70-80cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

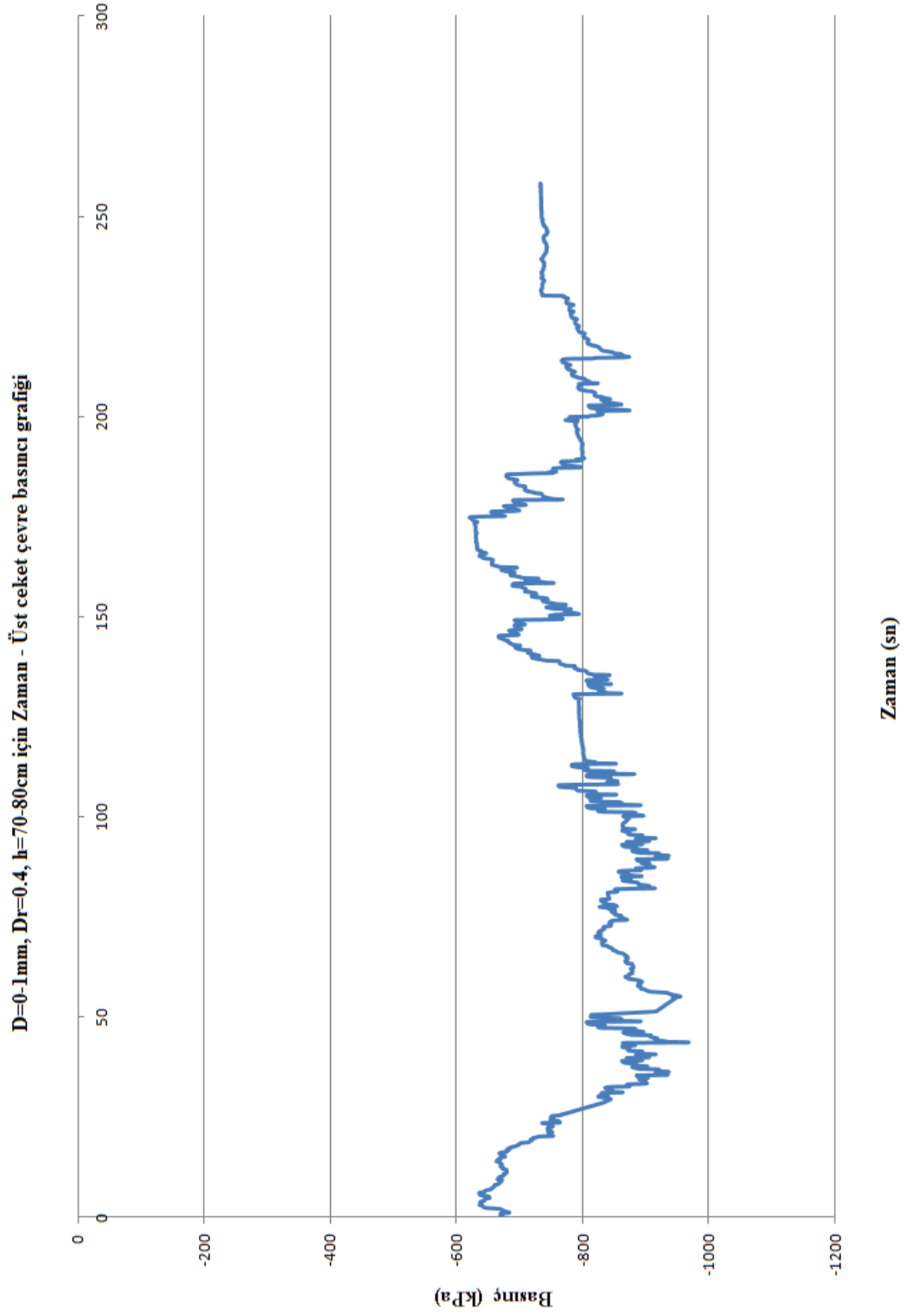


Ek A41

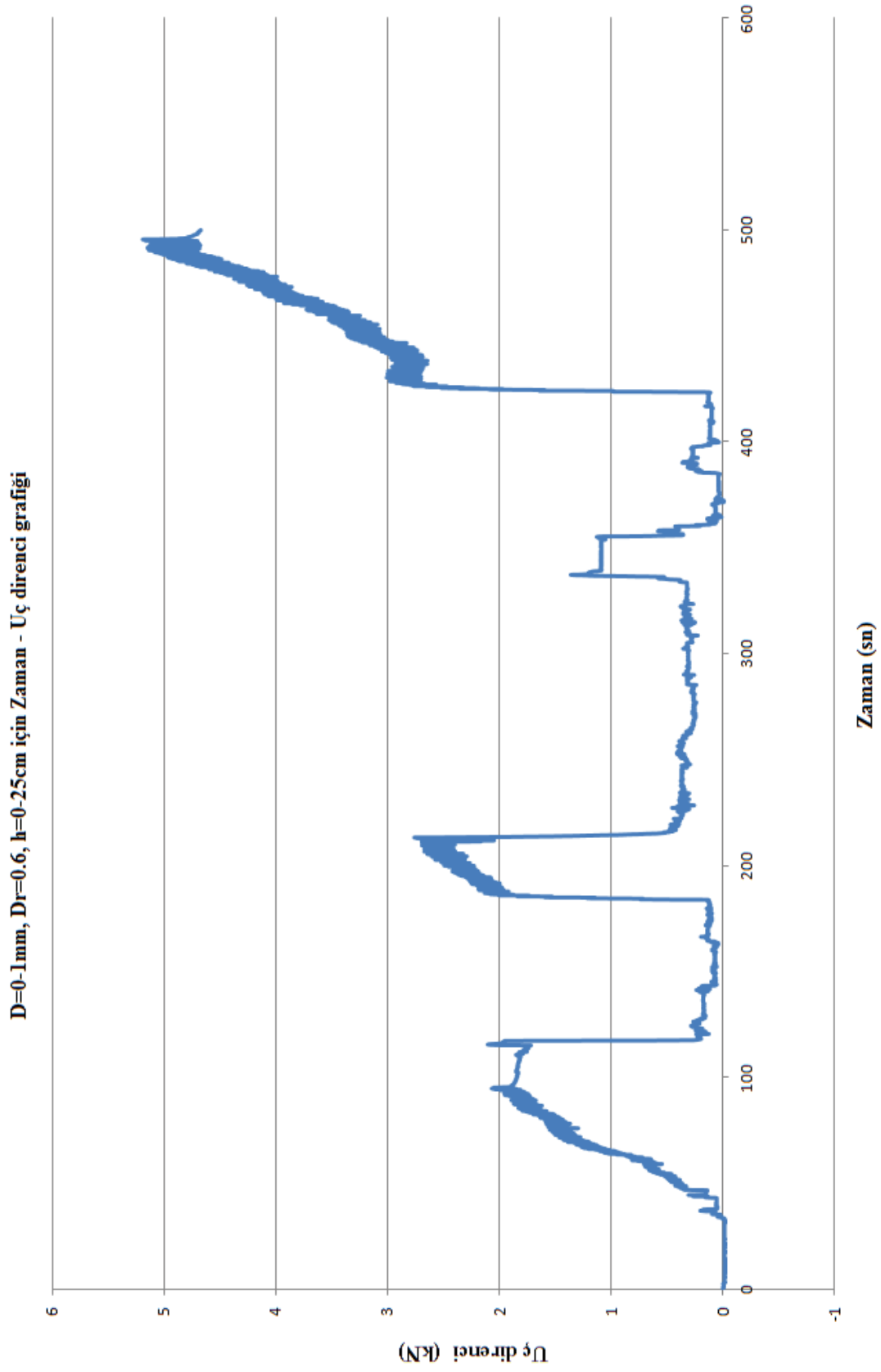
D=0-1mm, $D_r=0.4$, h=70-80cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği



Ek A42

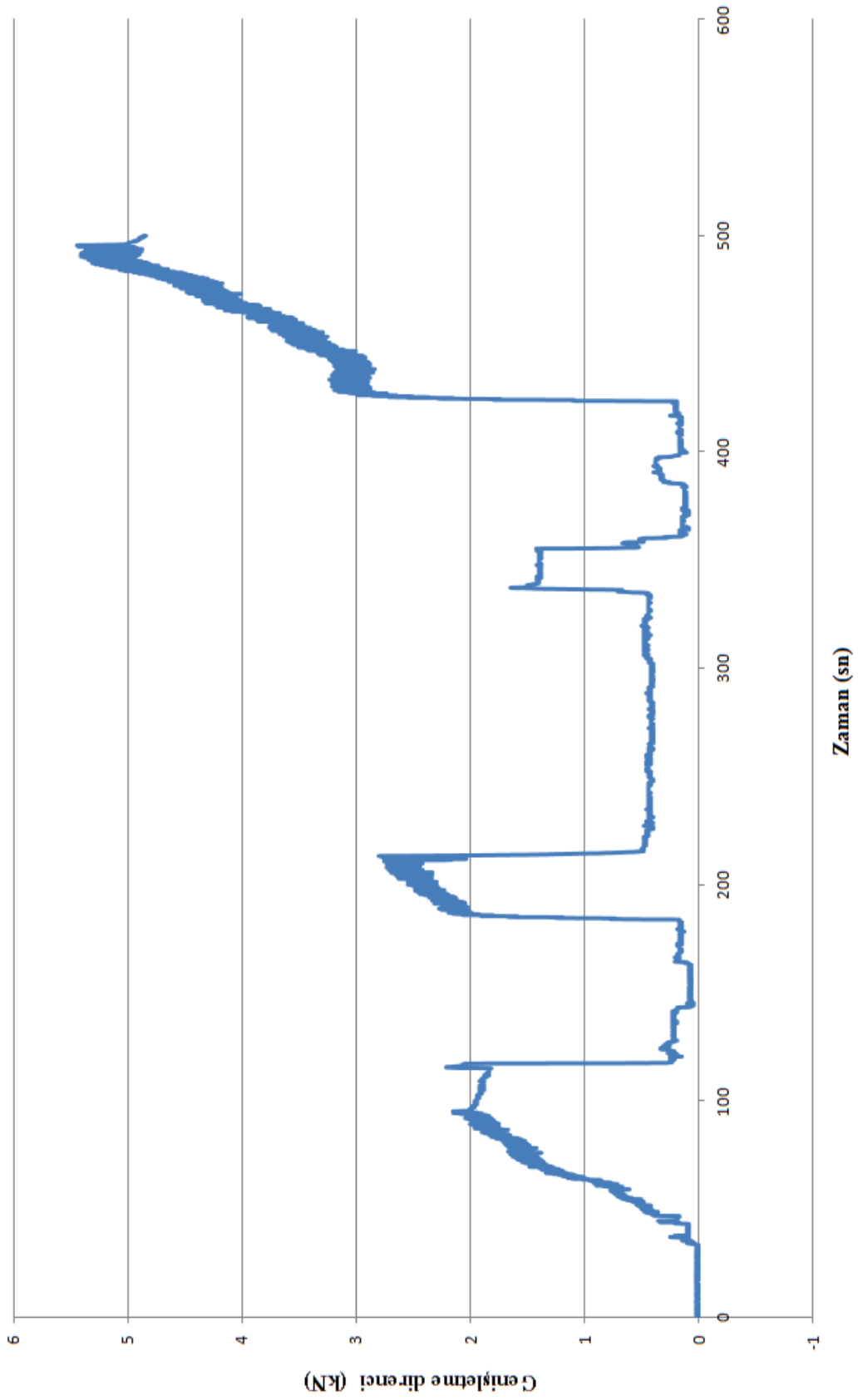


Ek A43

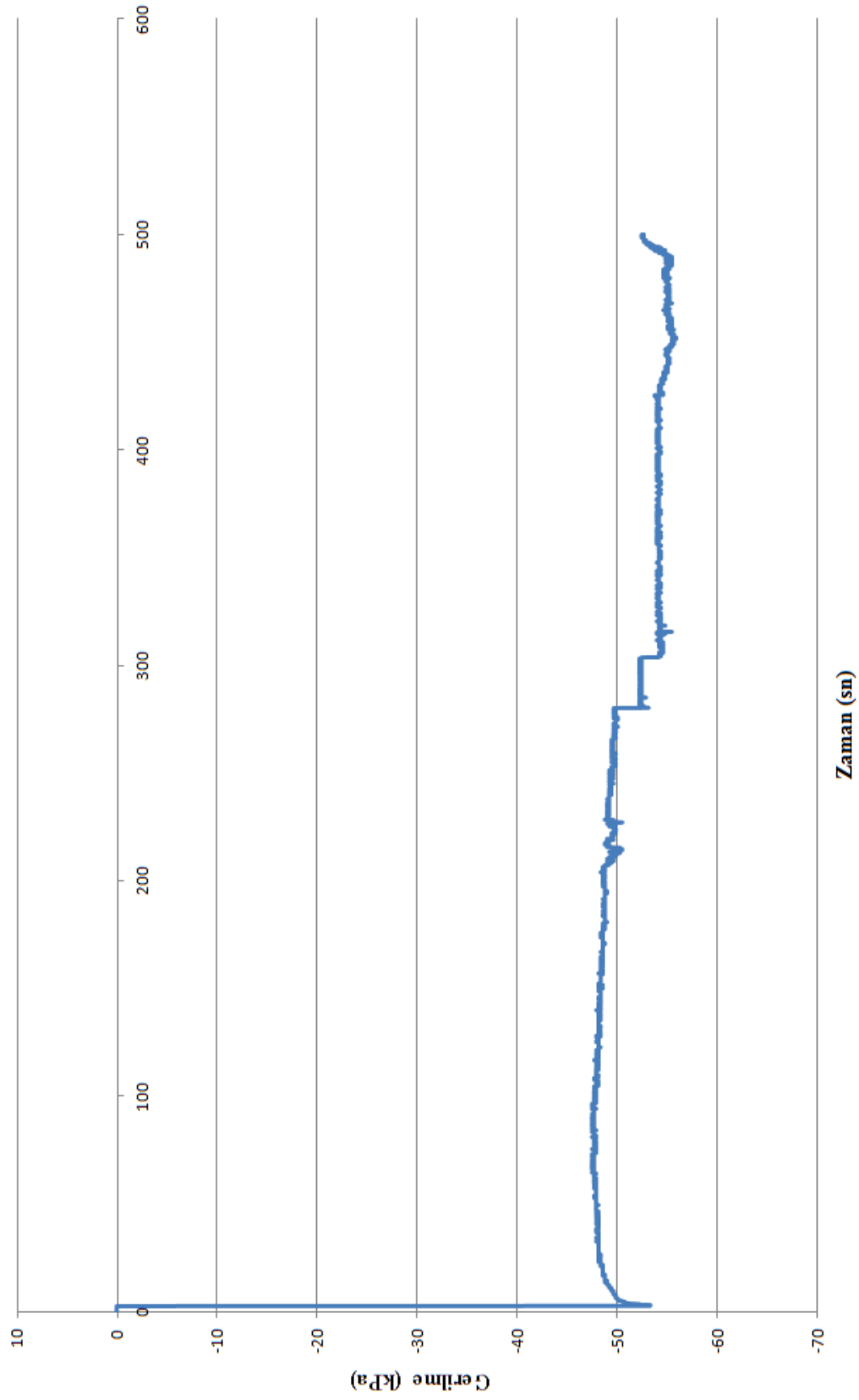


Ek A44

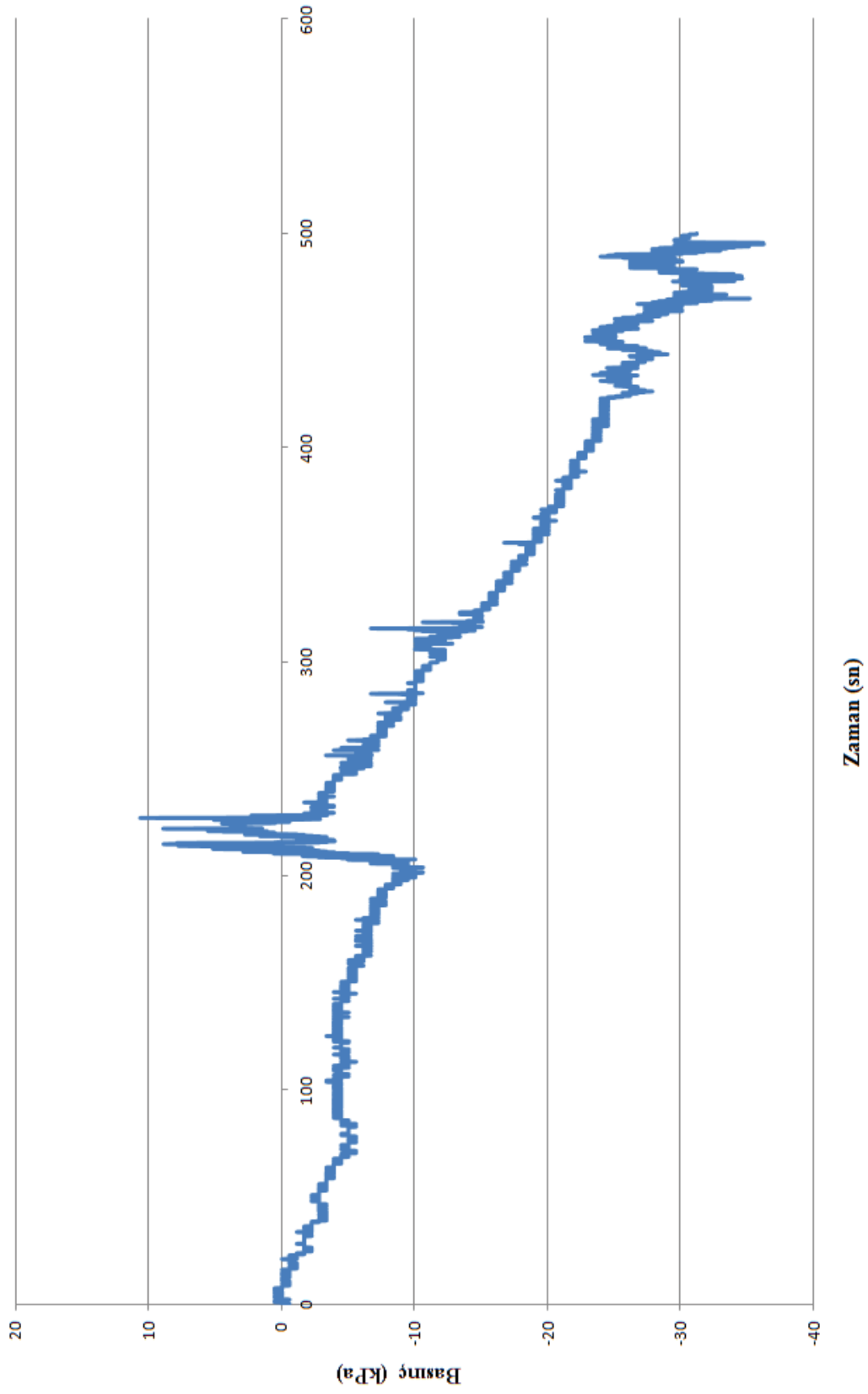
D=0-1mm, $D_r=0.6$, $h=0.25$ cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği



Ek A45

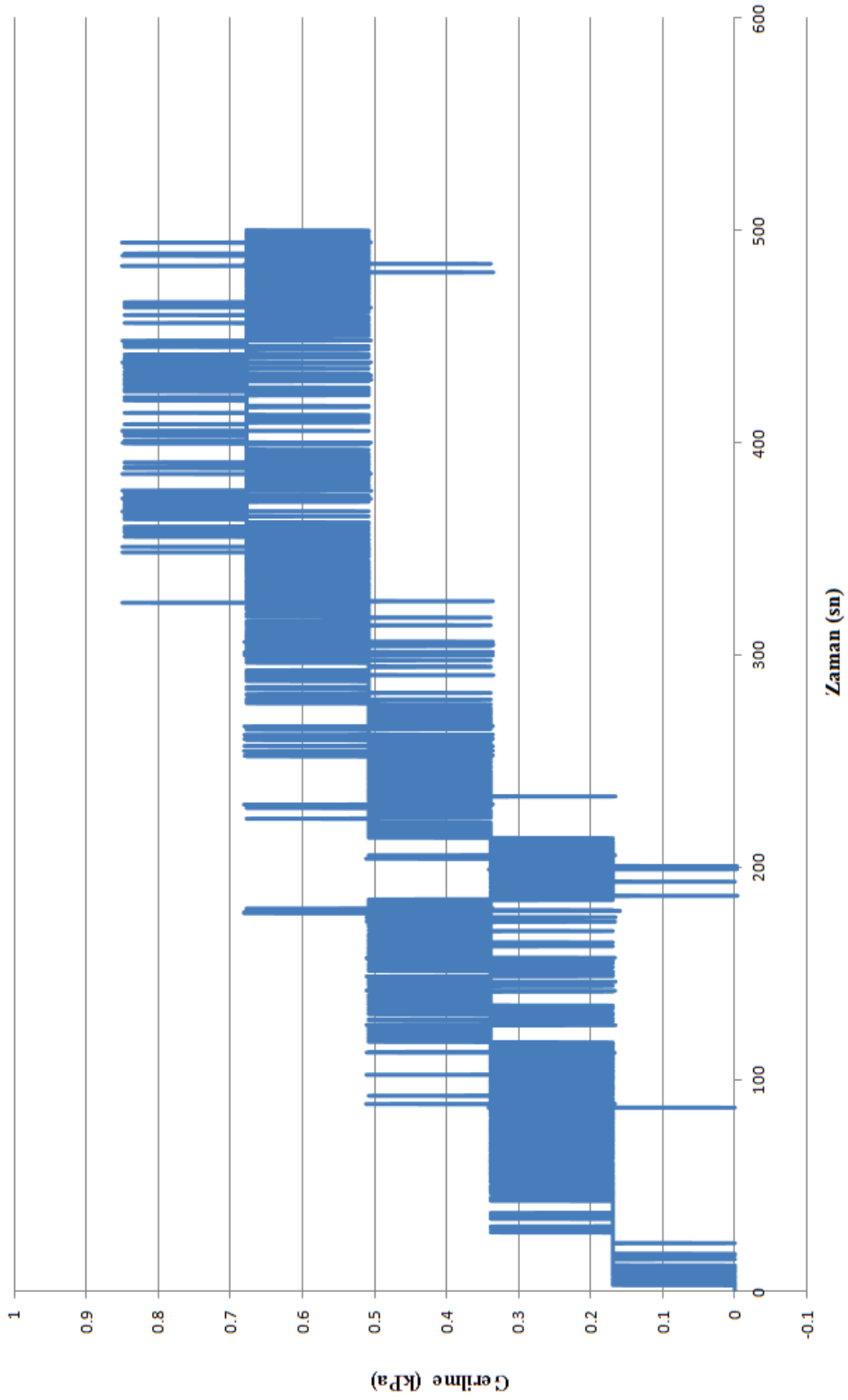
D=0-1mm, $D_r=0.6$, $h=0-25\text{cm}$ için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

Ek A46

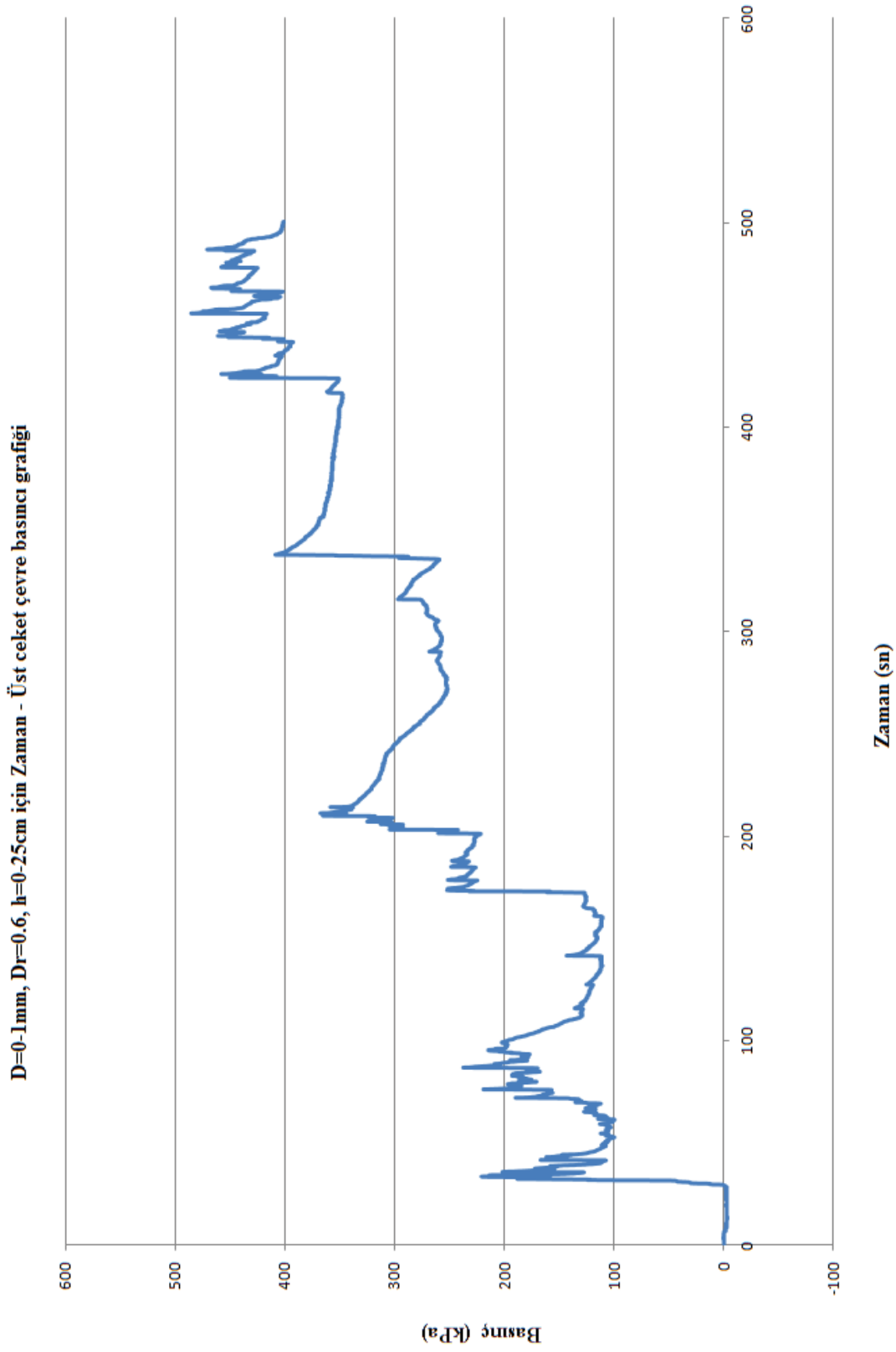
D=0-1mm, Dr=0.6, h=0-25cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

Ek A47

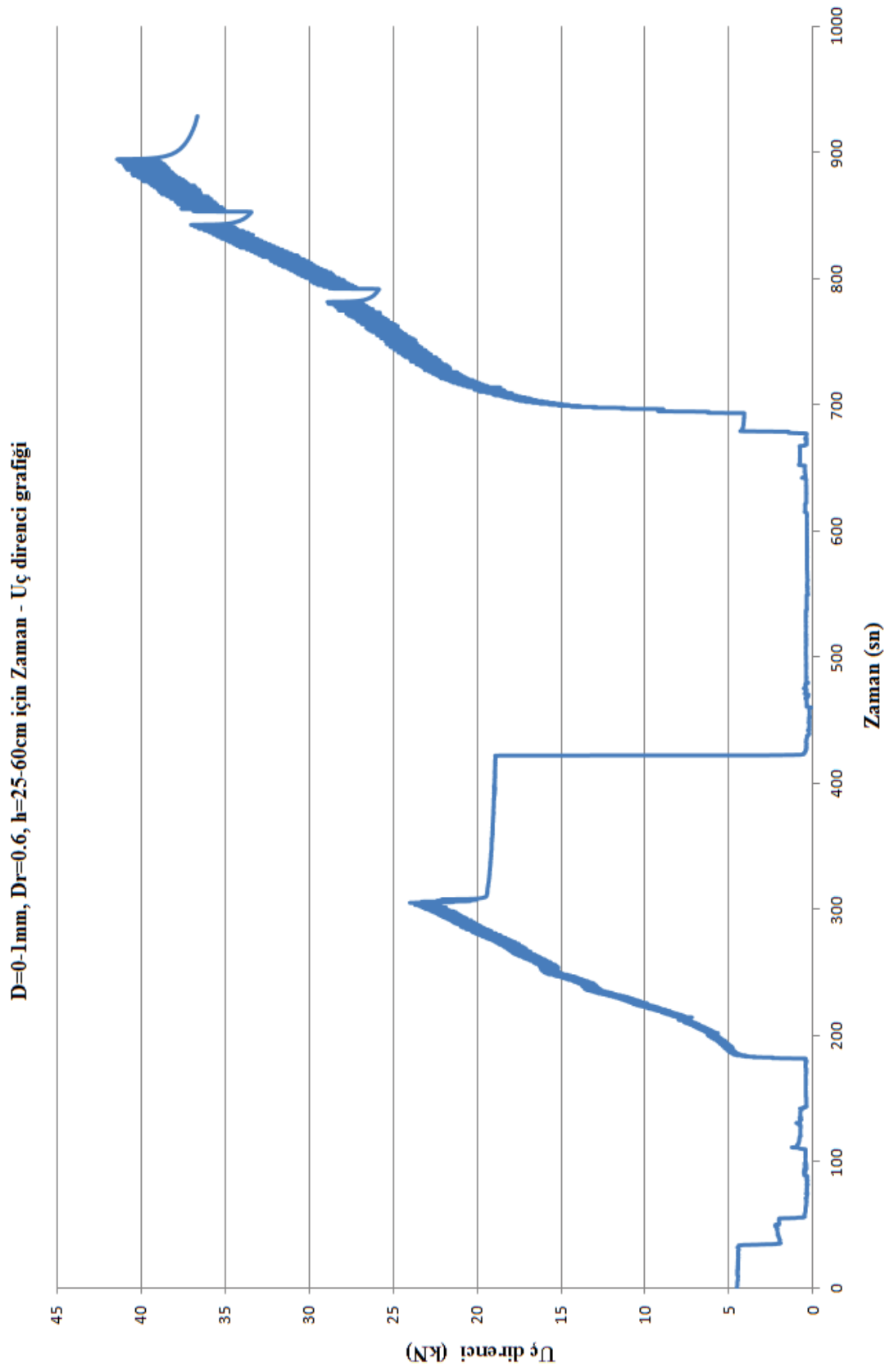
D=0.1mm, Dr=0.6, h=0-25cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği



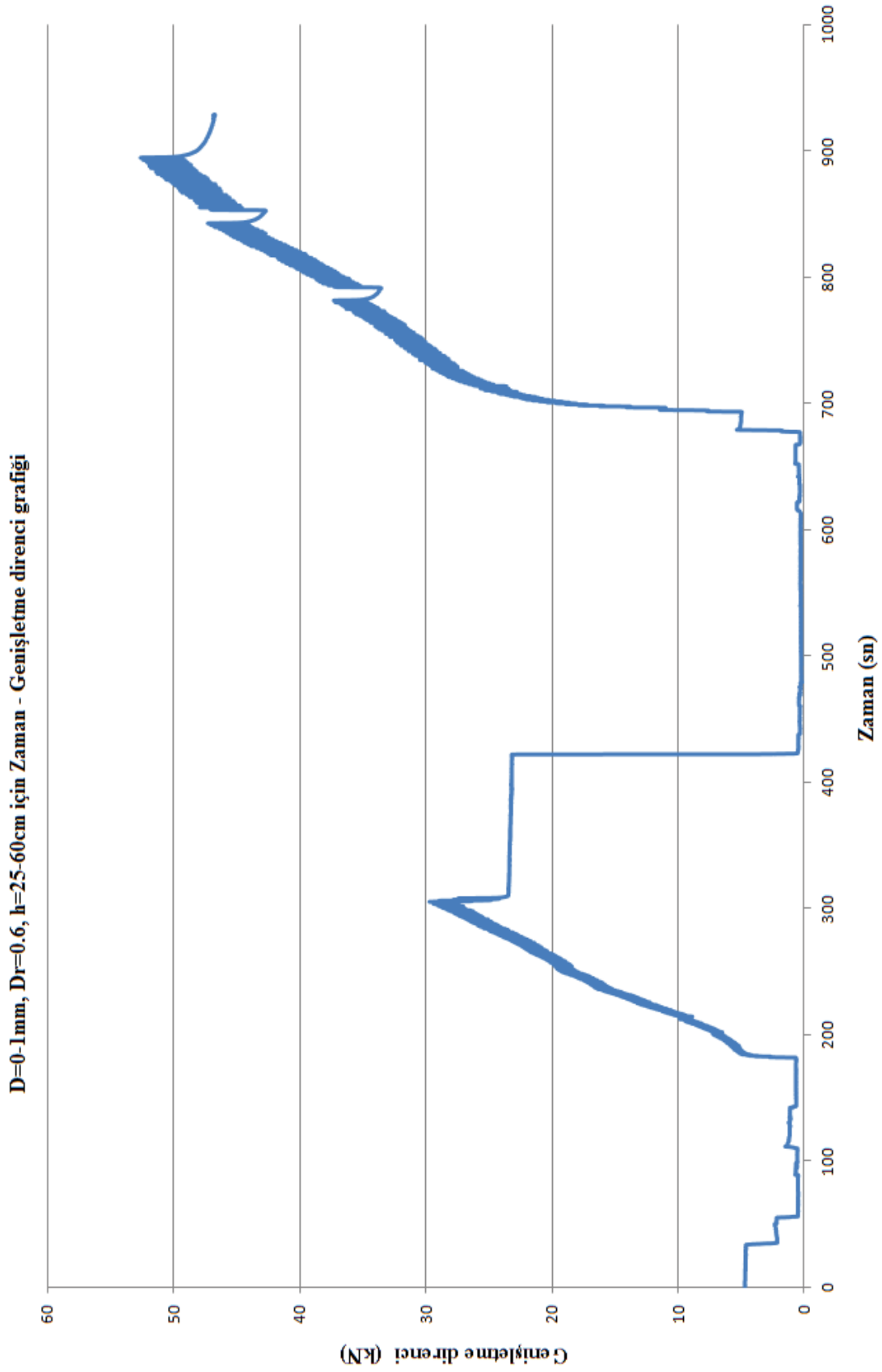
Ek A48



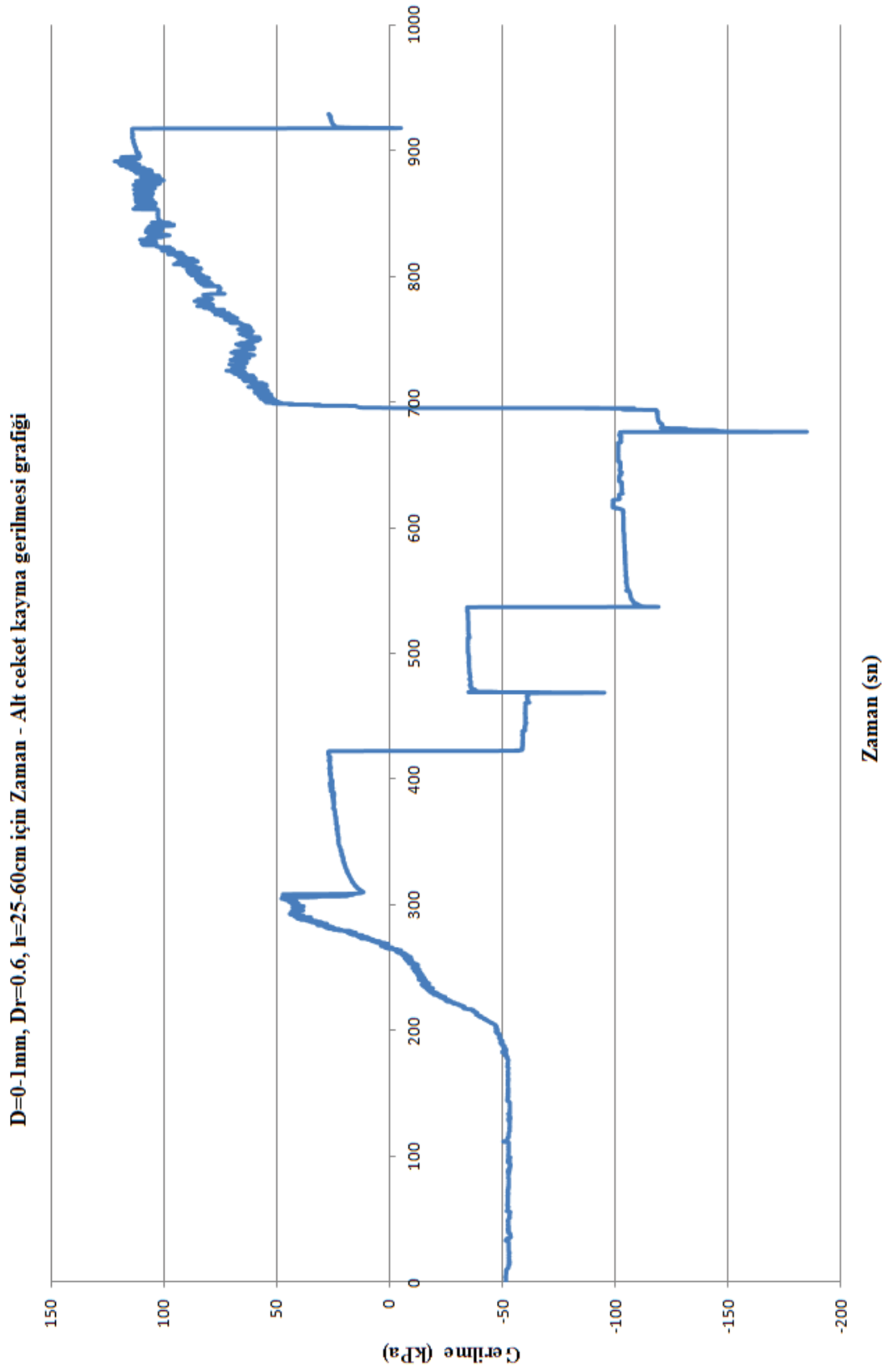
Ek A49



Ek A50

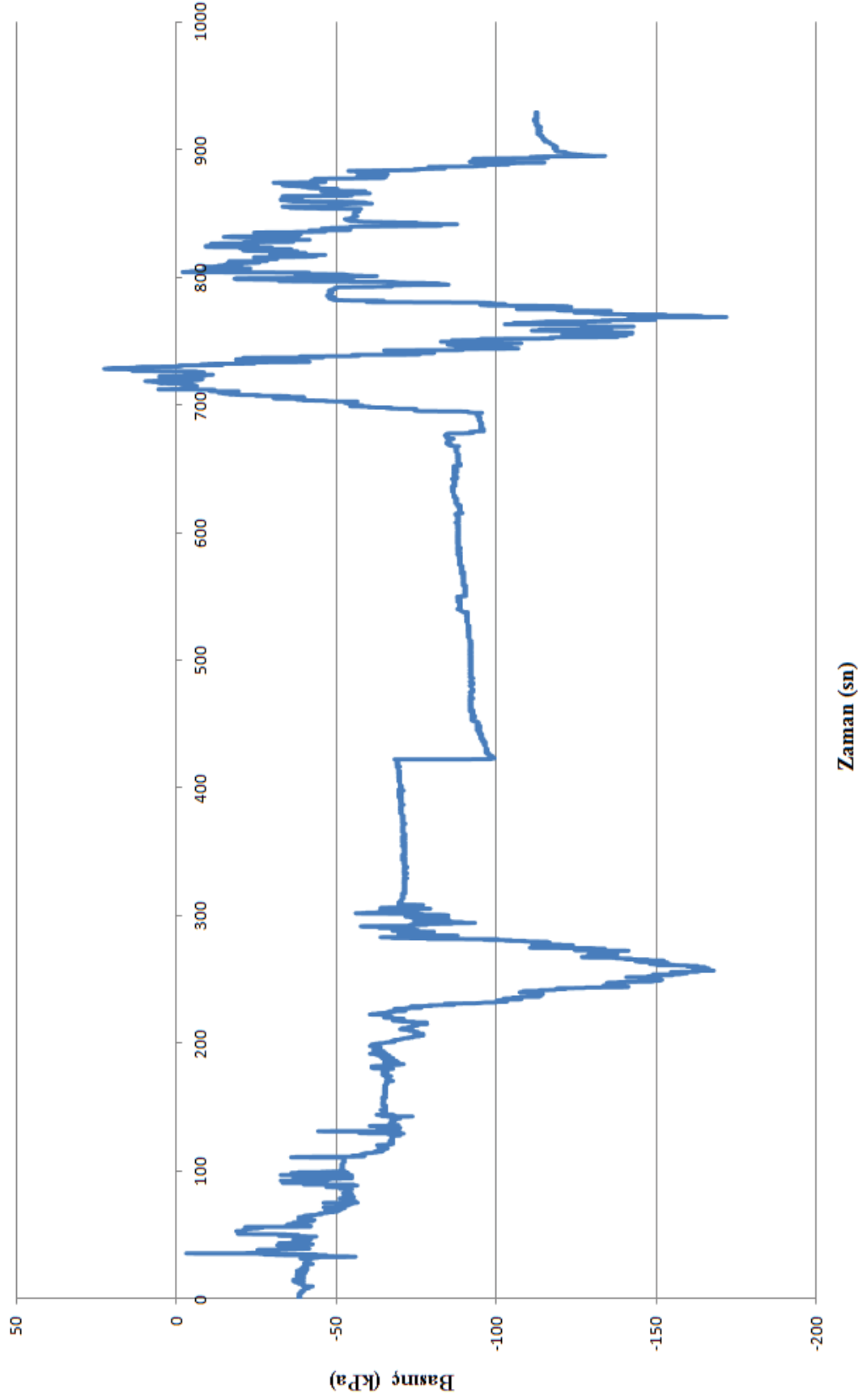


Ek A51

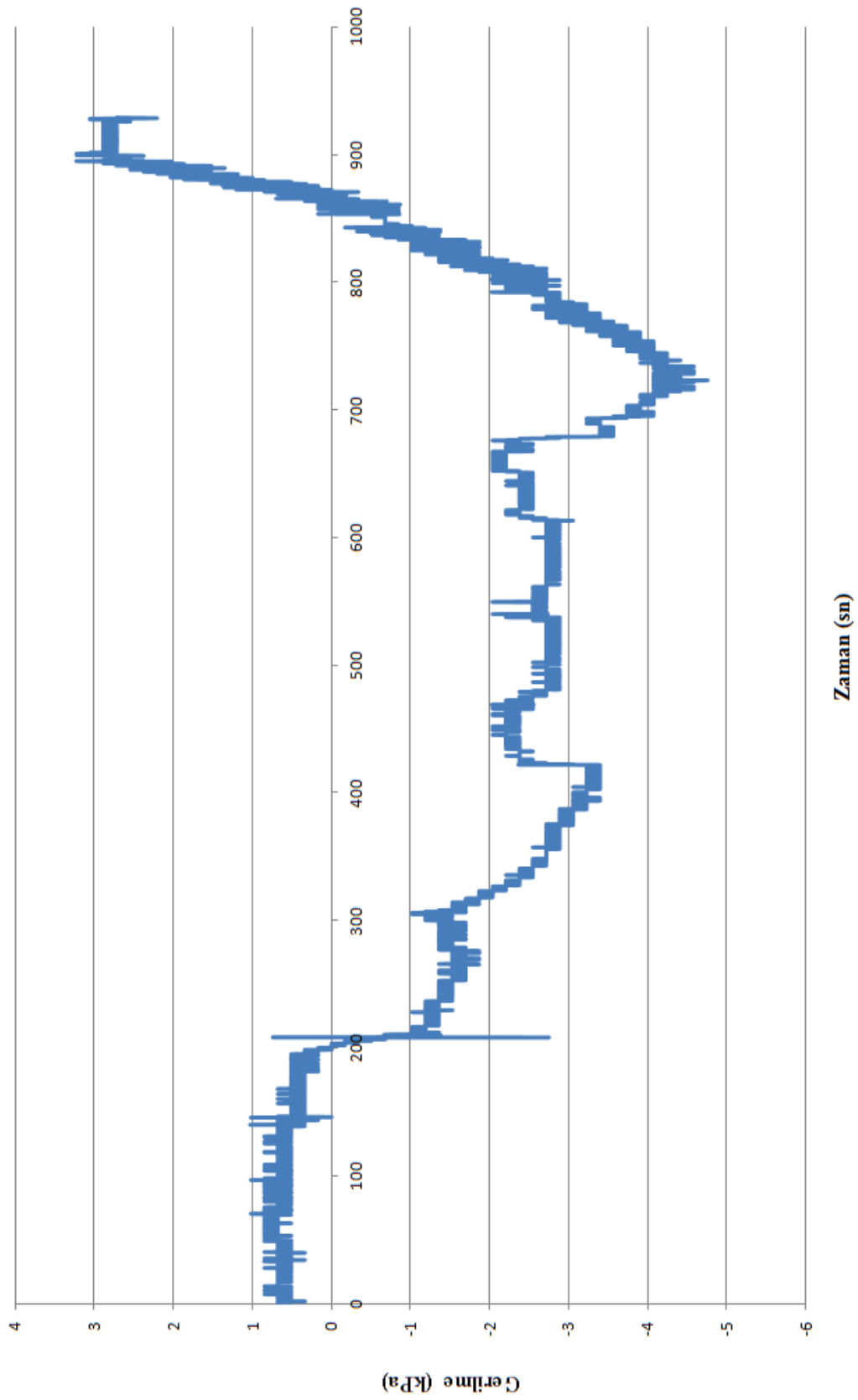


Ek A52

D=0-1mm, Dr=0.6, h=25-60cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

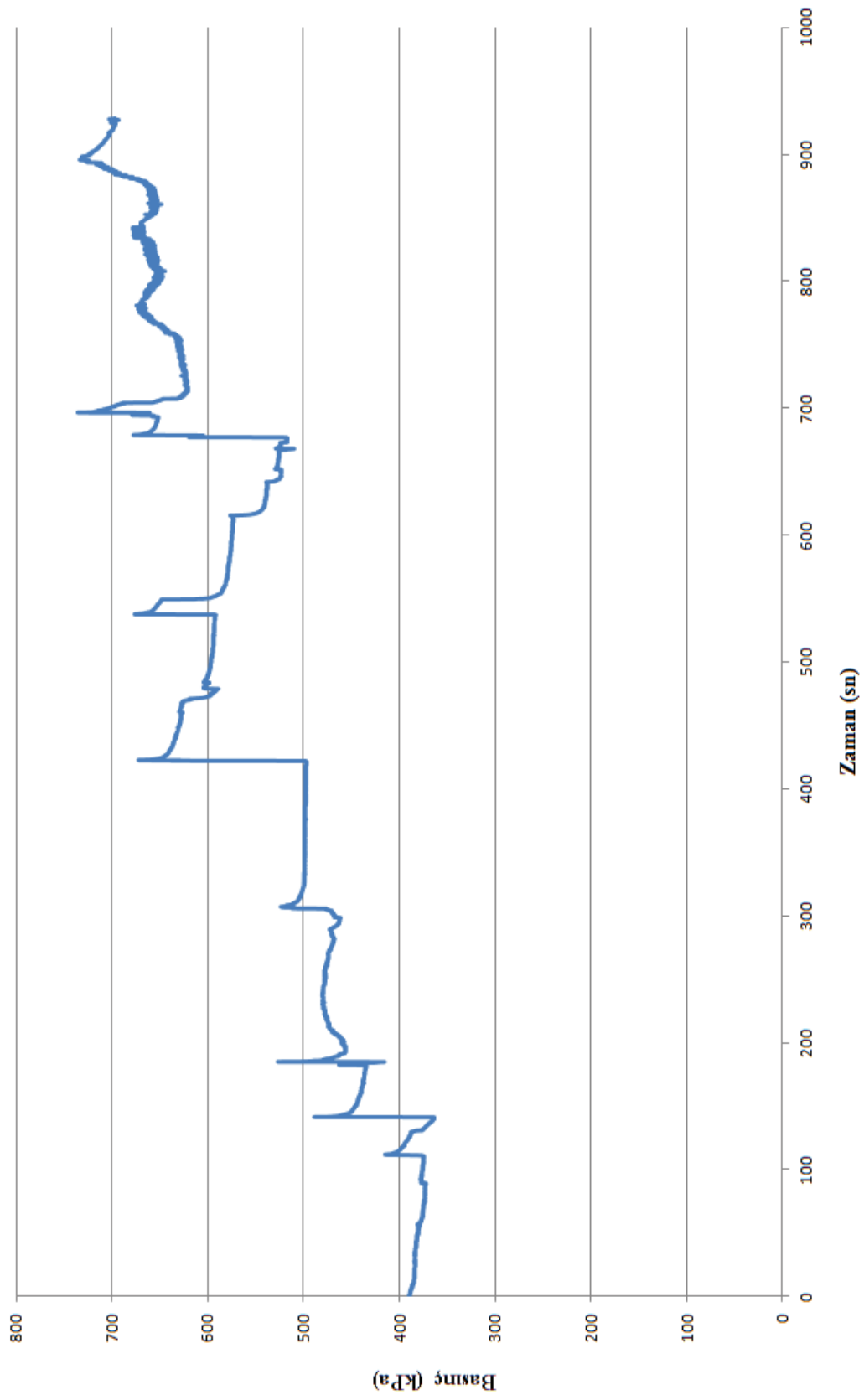


Ek A53

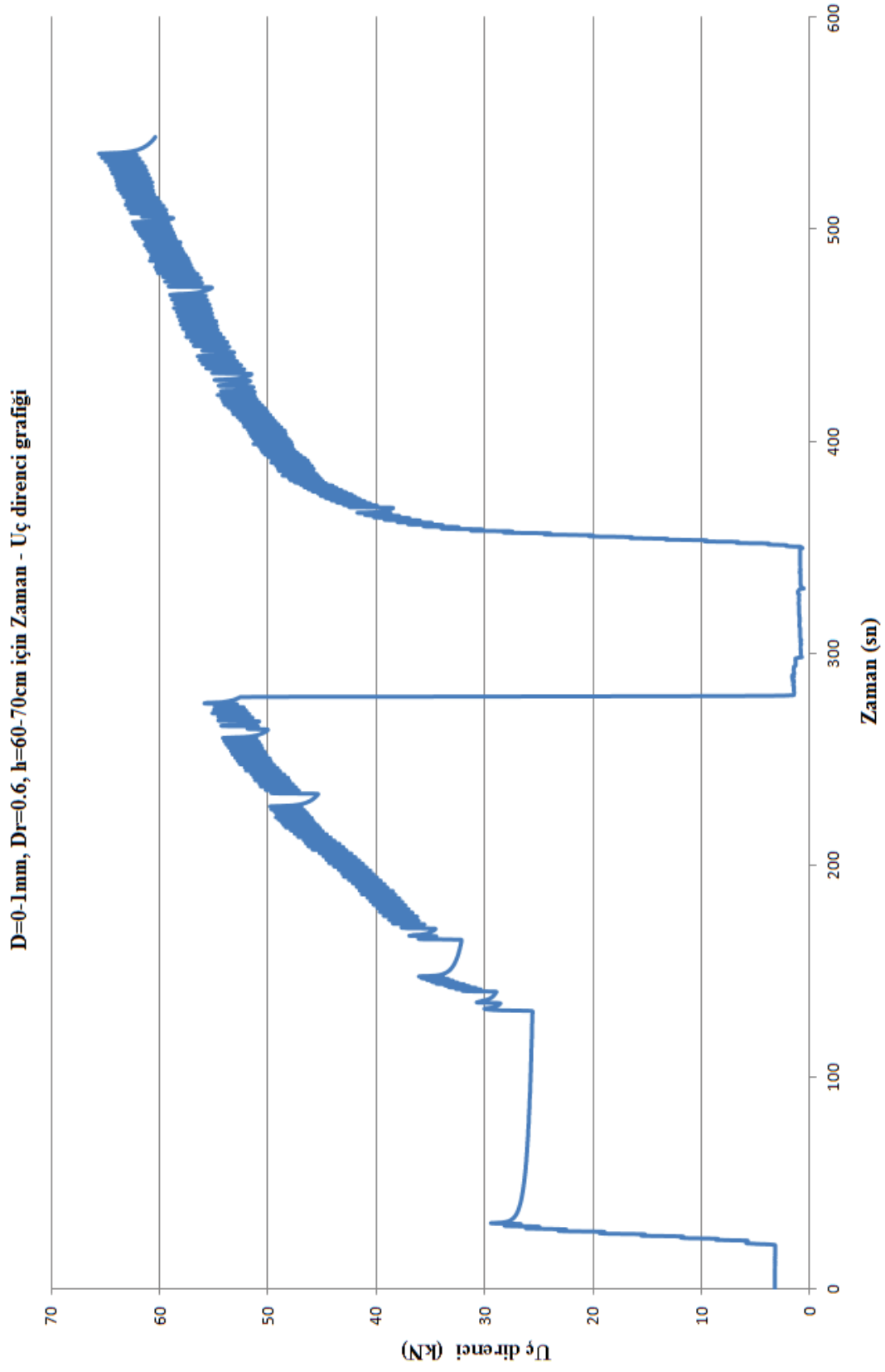
D=0-1mm, $D_r=0.6$, h=25-60cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği

Ek A54

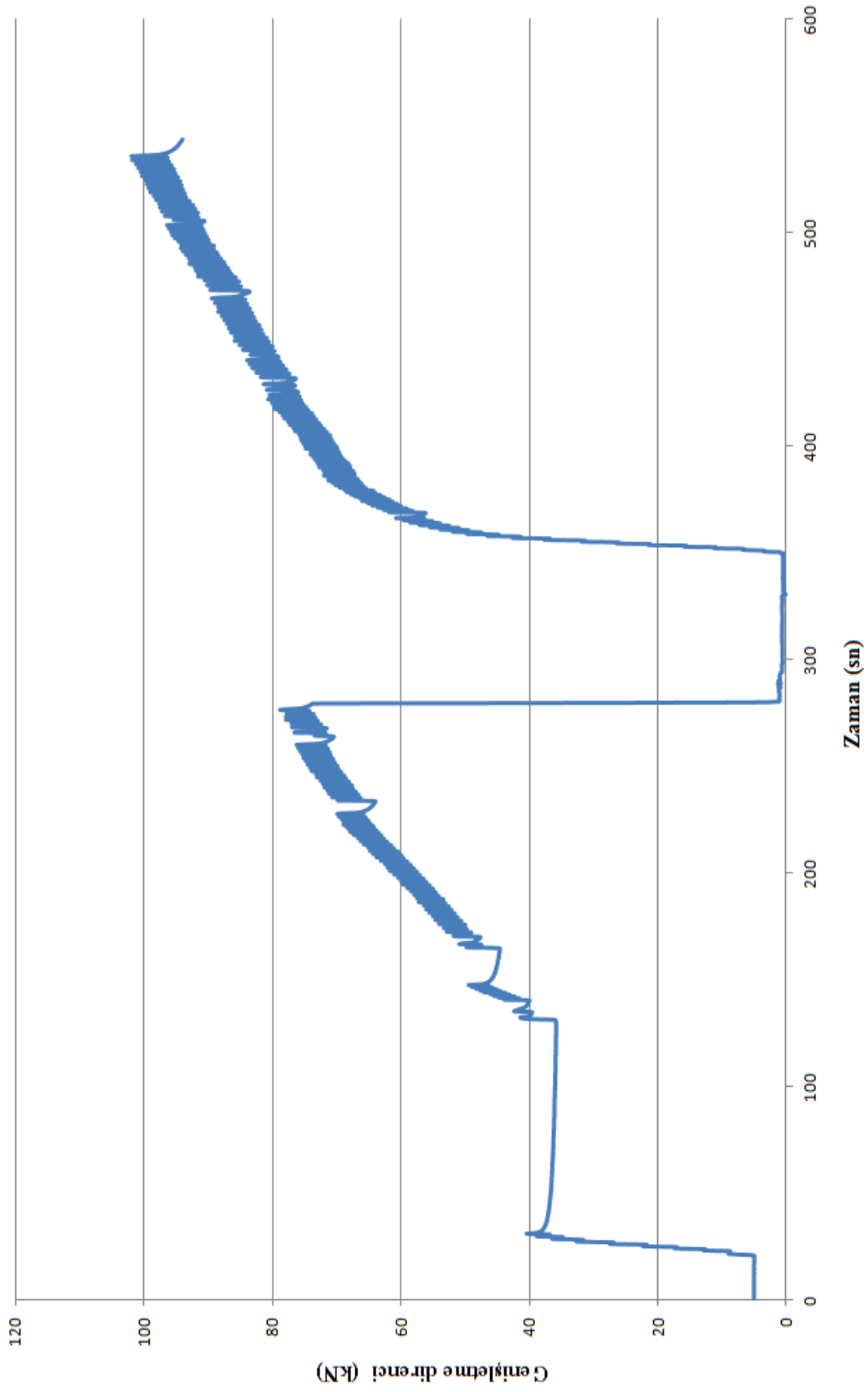
D=0-1mm, $D_r=0.6$, h=25-60cm için Zaman - Üst ceket çevre basıncı grafiği



Ek A55

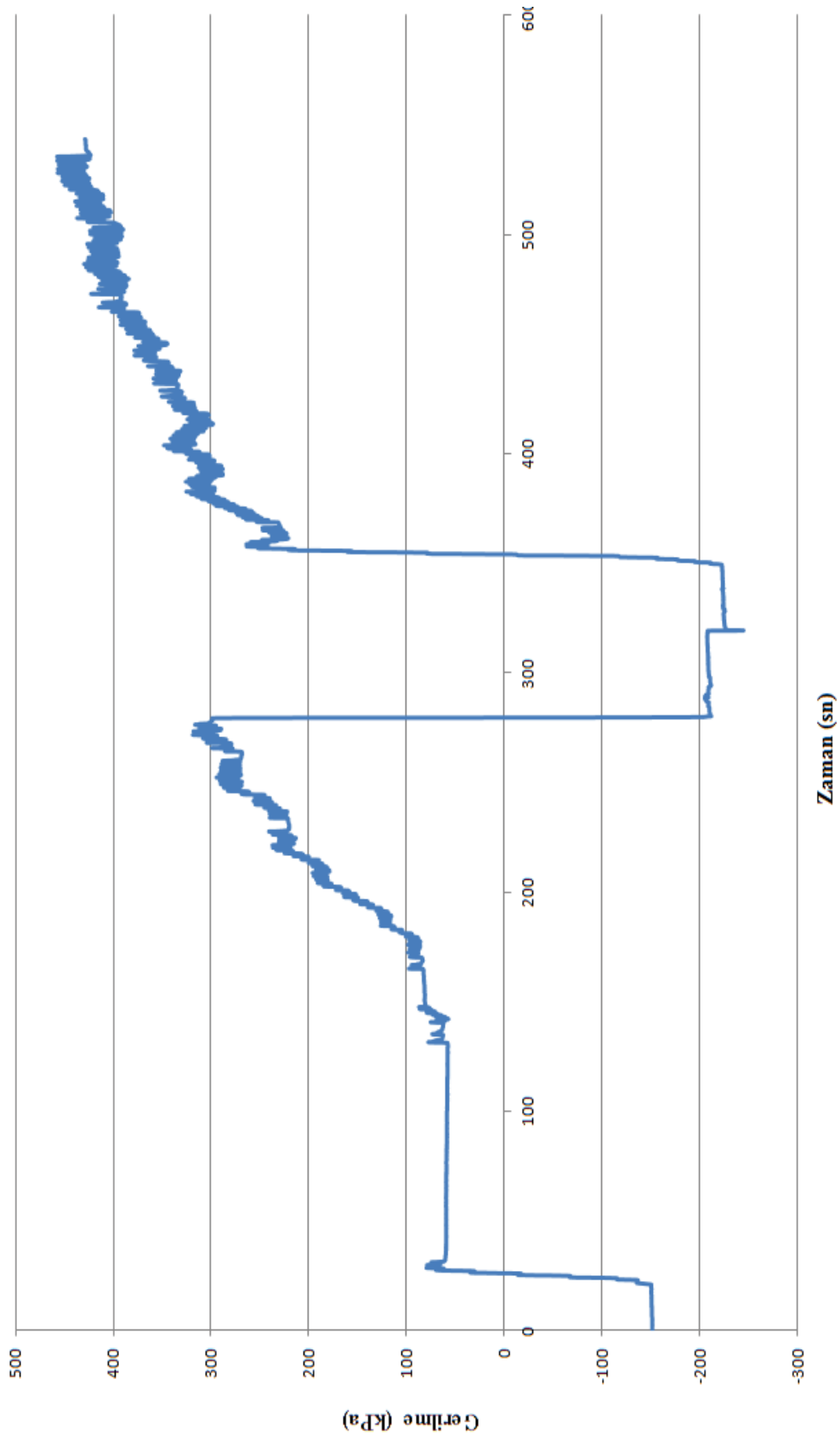


Ek A56

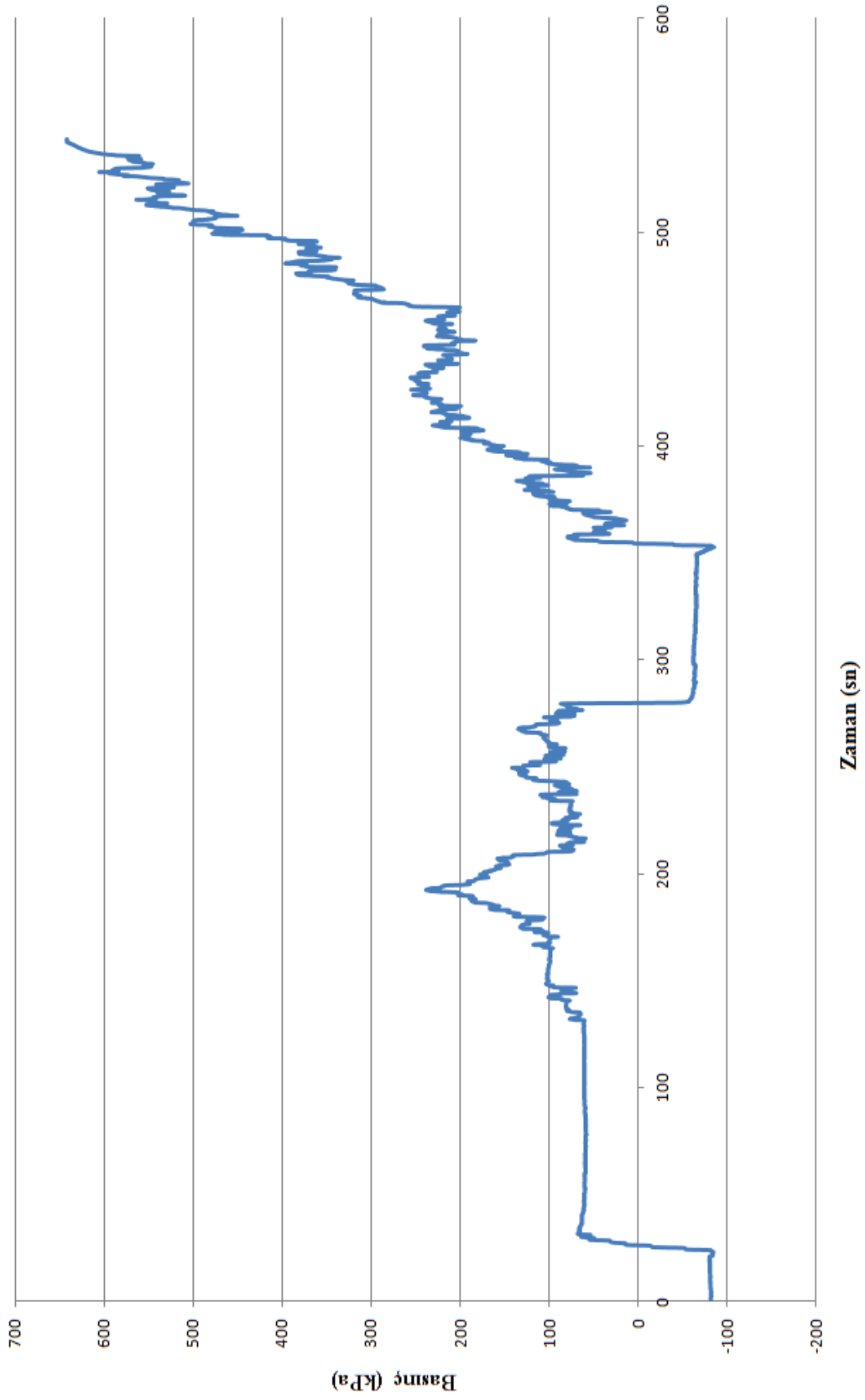
D=0-1mm, $D_r=0.6$, $h=60-70$ cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği

Ek A57

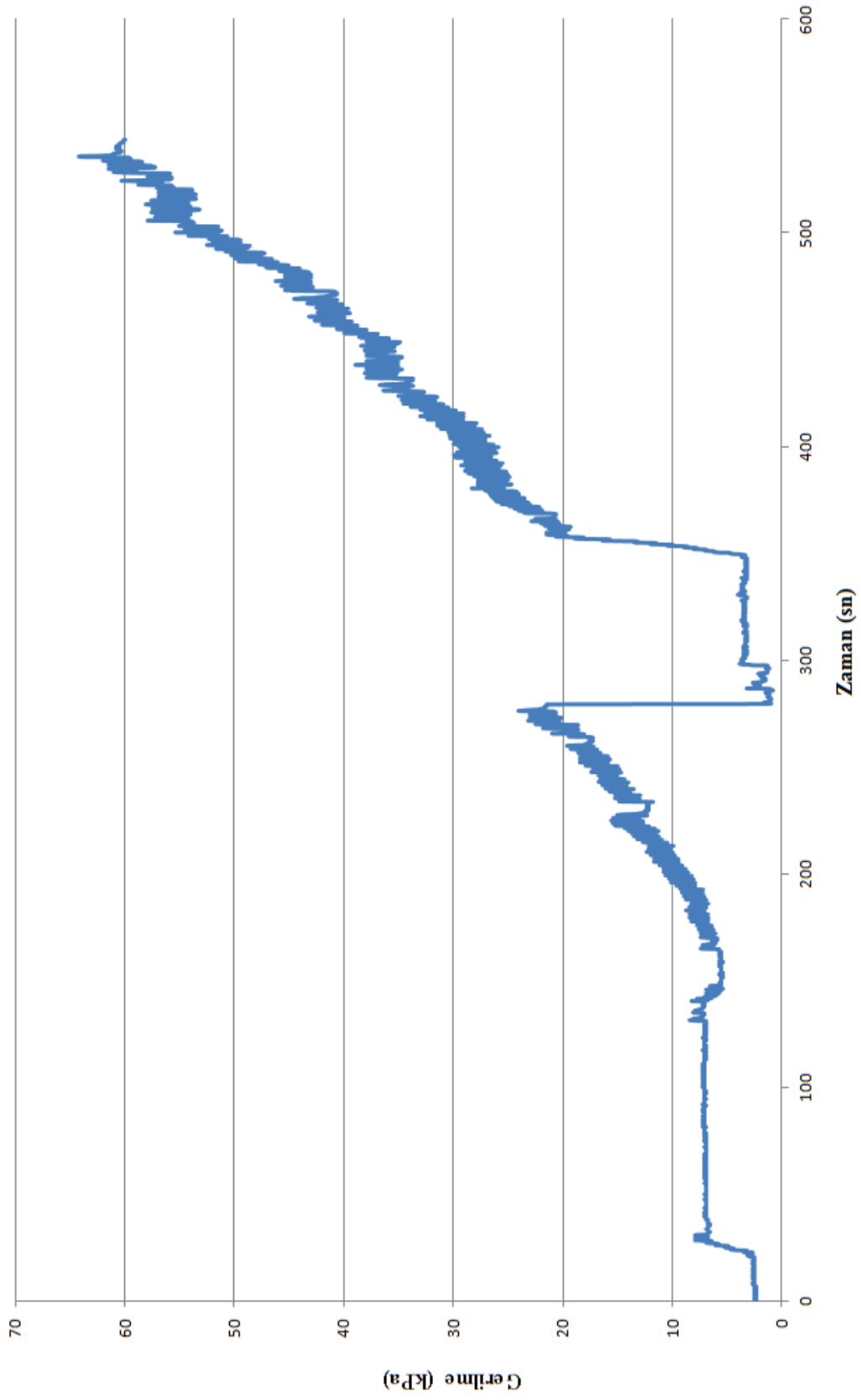
D=0-1mm, $D_r=0.6$, h=60-70cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği



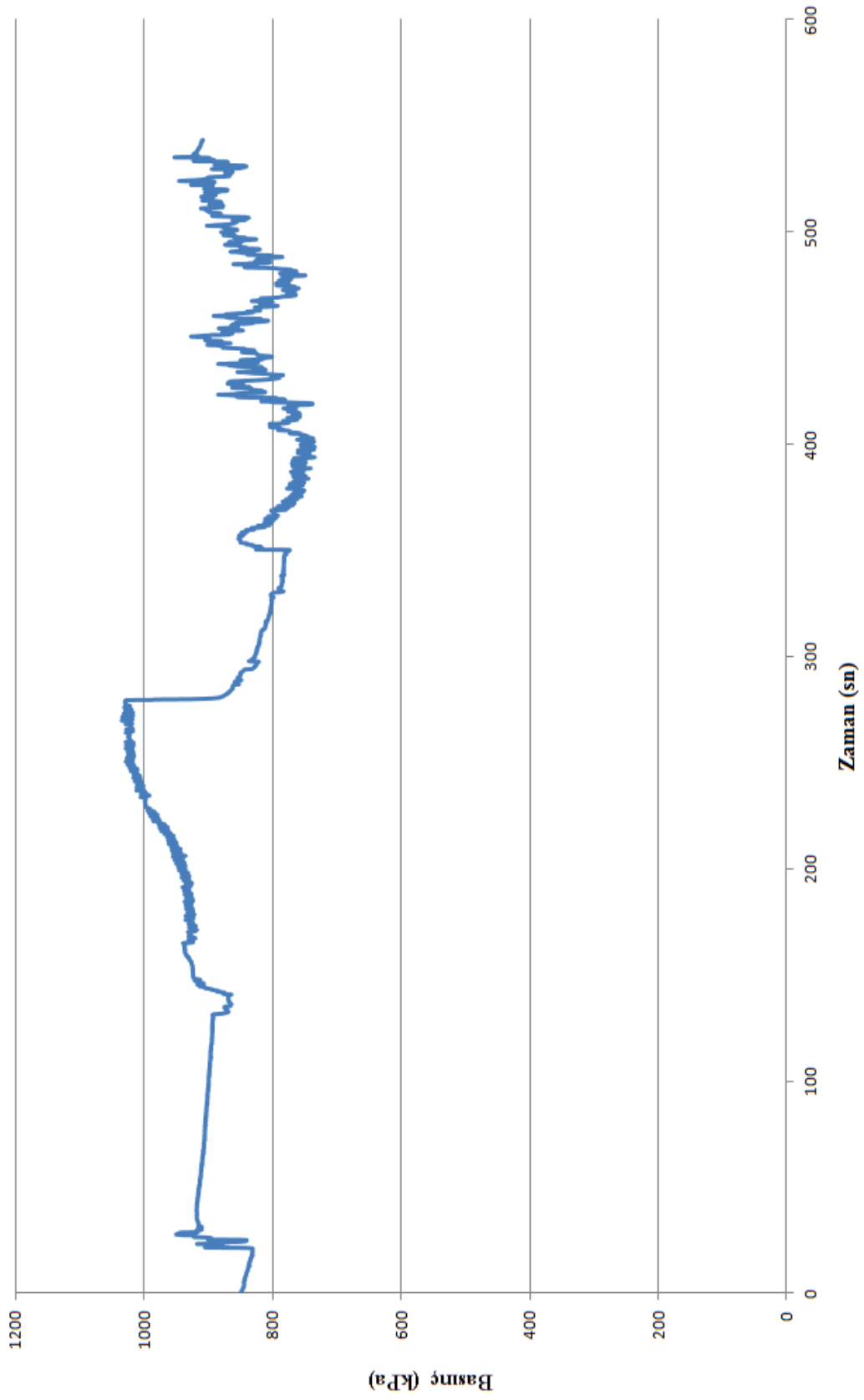
Ek A58

D=0-1mm, $D_r=0.6$, h=60-70cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

Ek A59

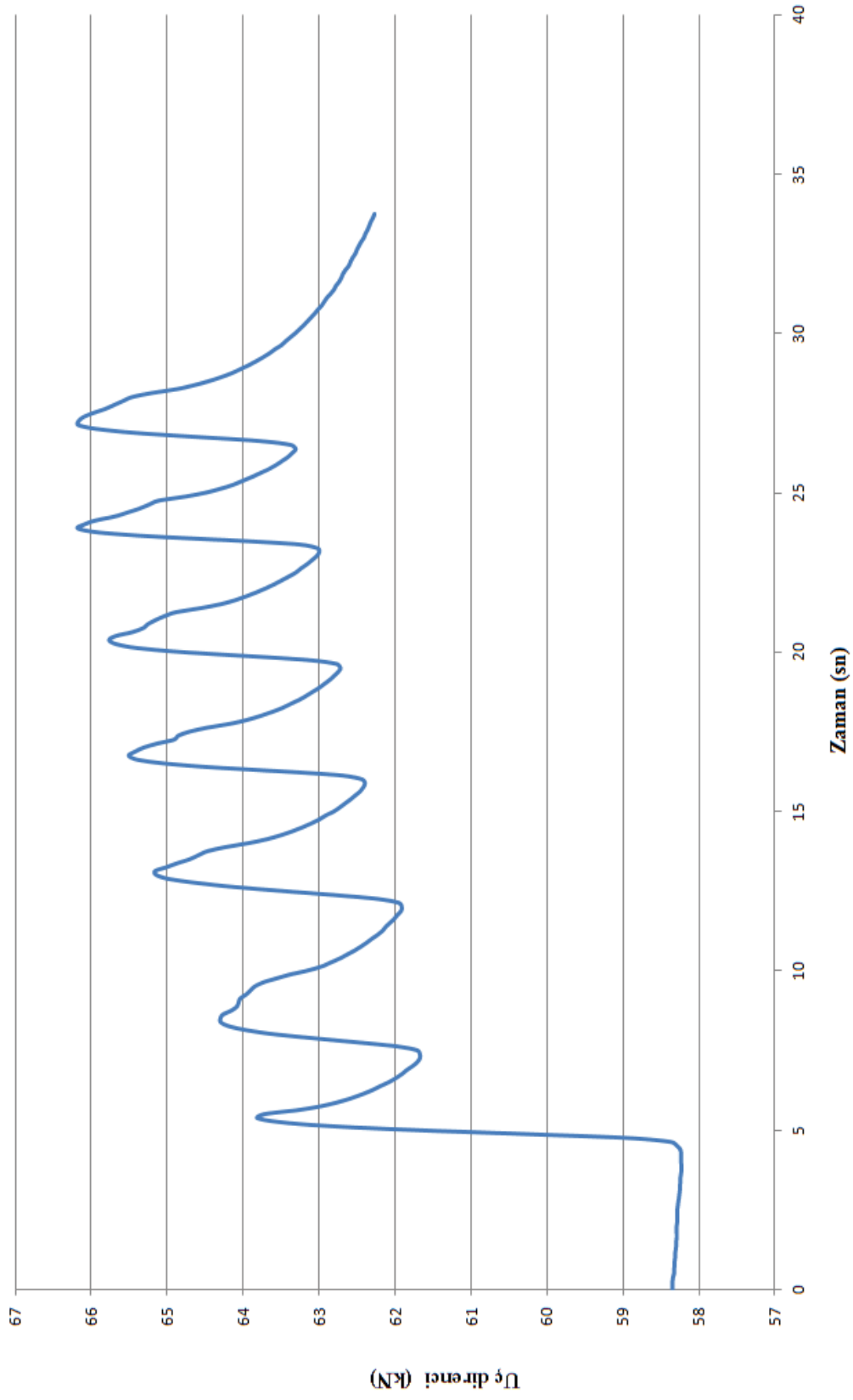
D=0-1mm, $D_r=0.6$, h=60-70cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği

Ek A60

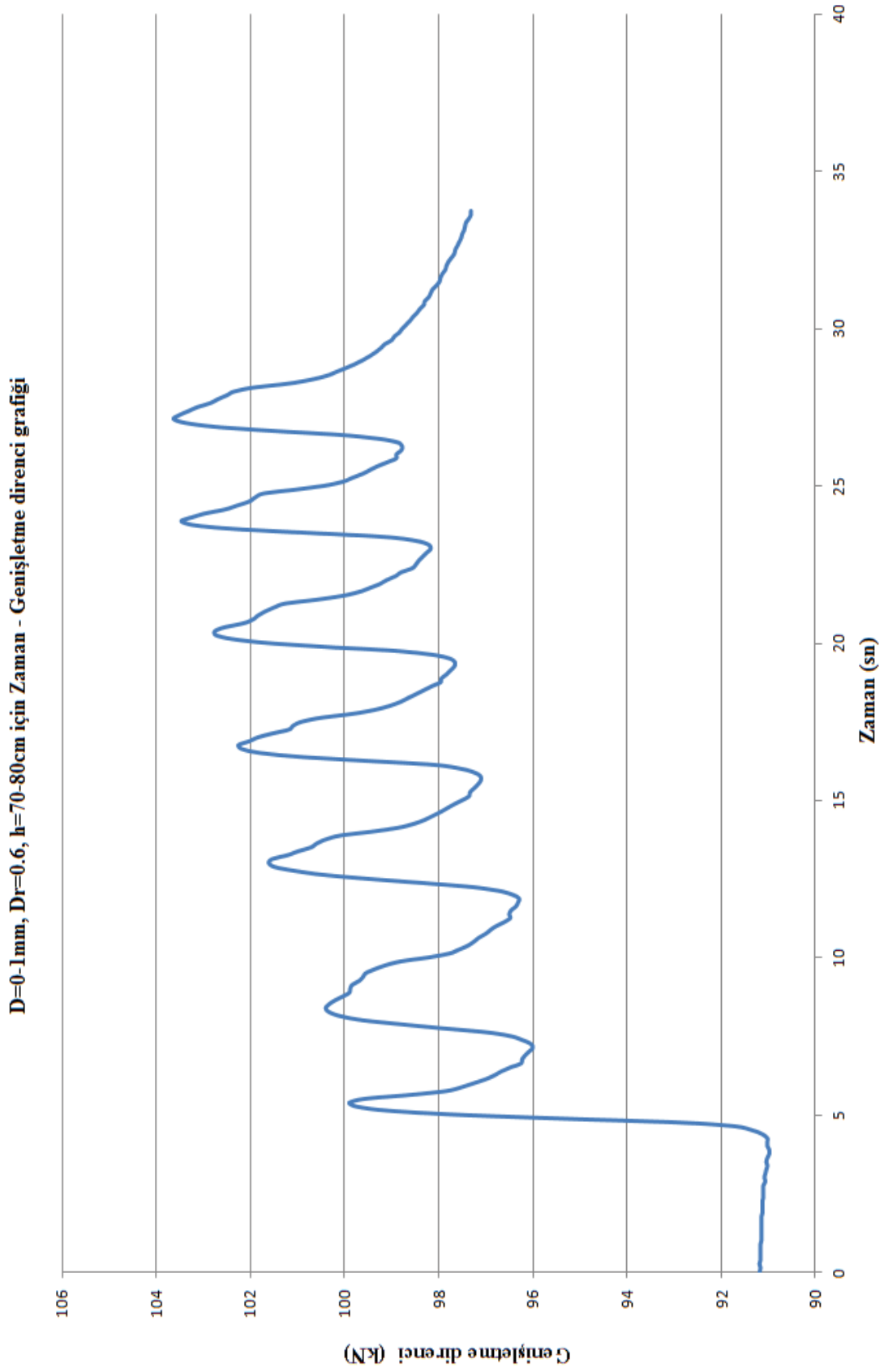
D=0-1mm, $D_r=0.6$, h=60-70cm için Zaman - Üst ceket çevre basıncı grafiği

Ek A61

D=0-1mm, $D_r=0.6$, $h=70-80$ cm için Zaman - Uç direnci grafiği

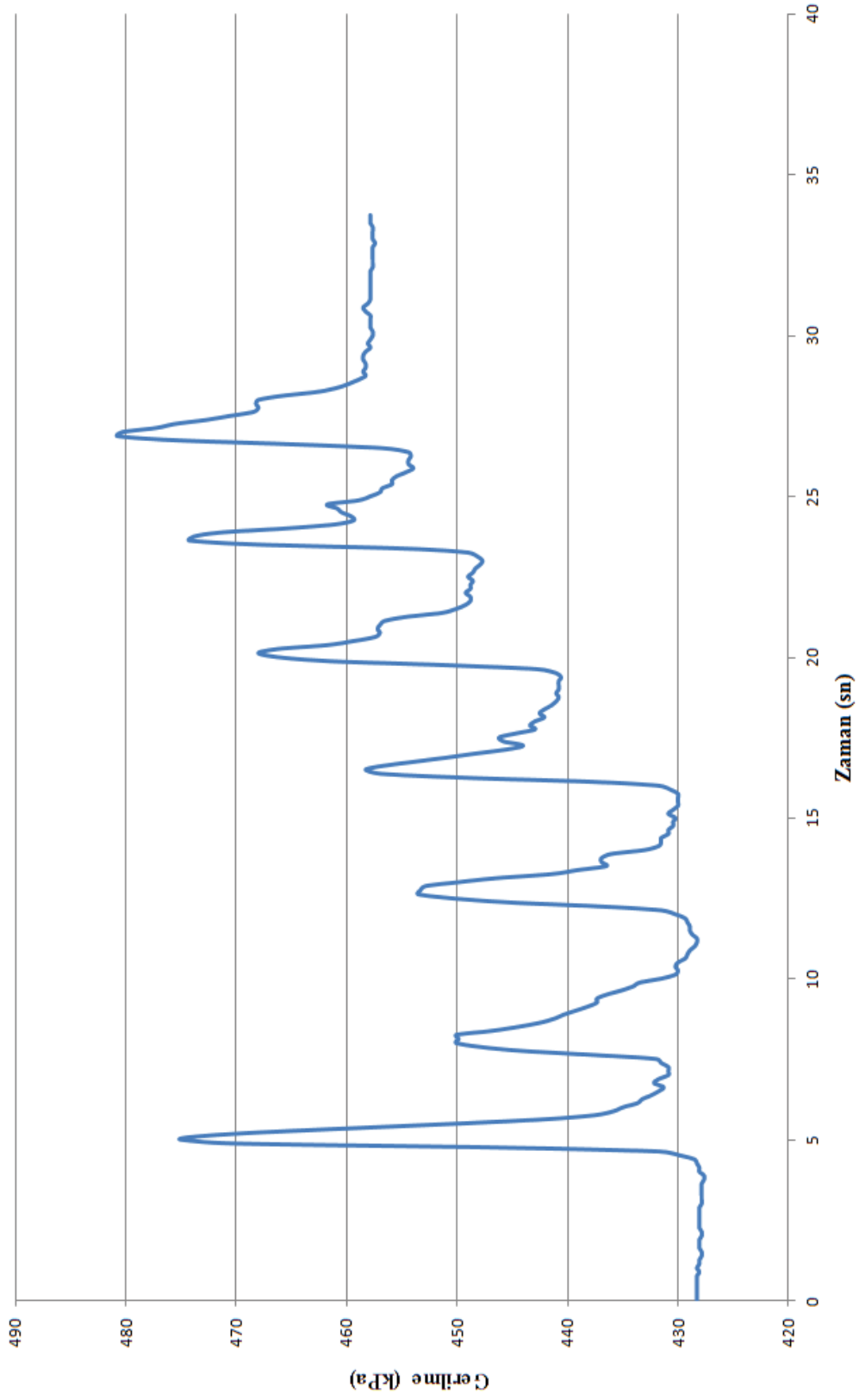


Ek A62



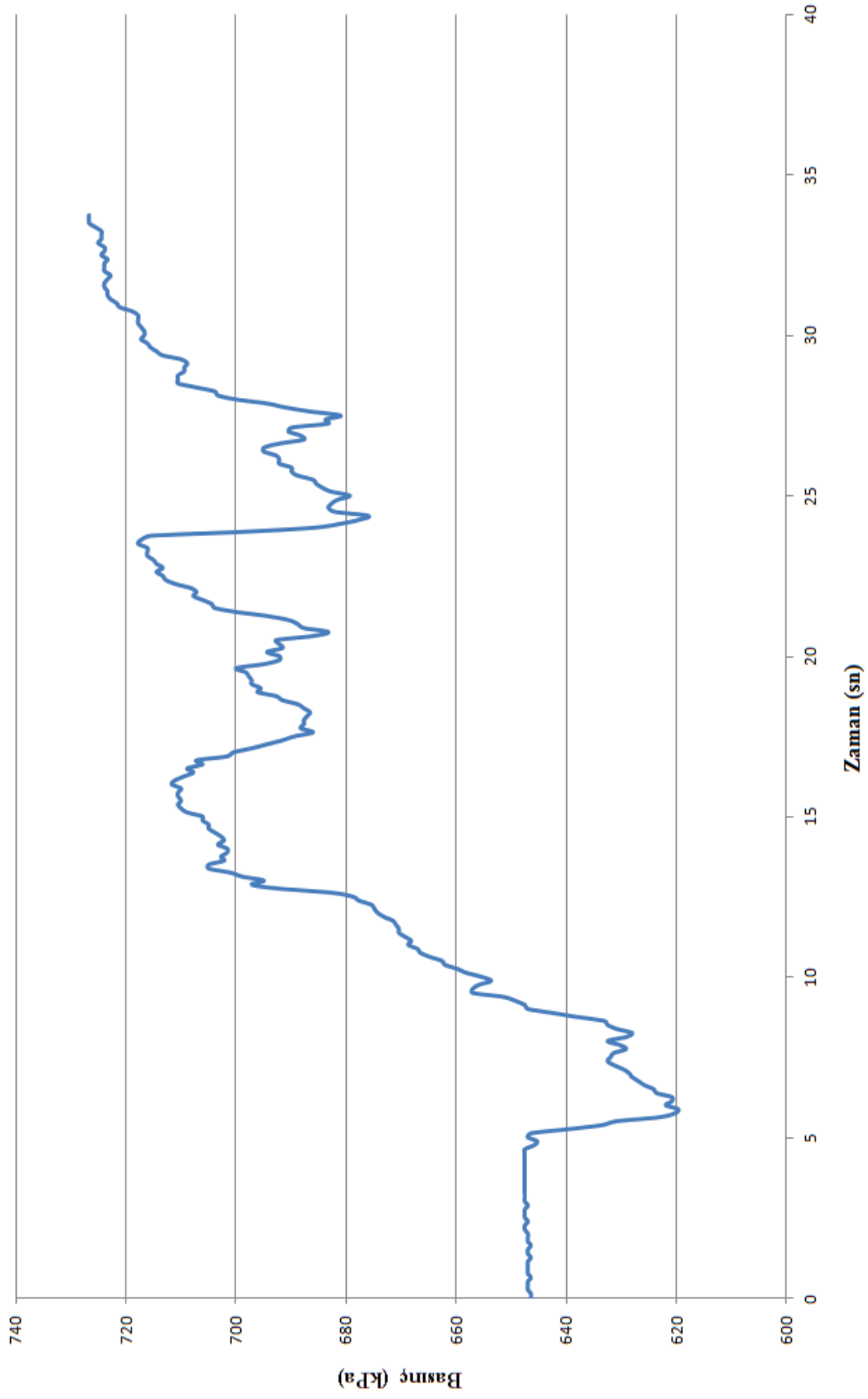
Ek A63

D=0.1mm, Dr=0.6, h=70-80cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği



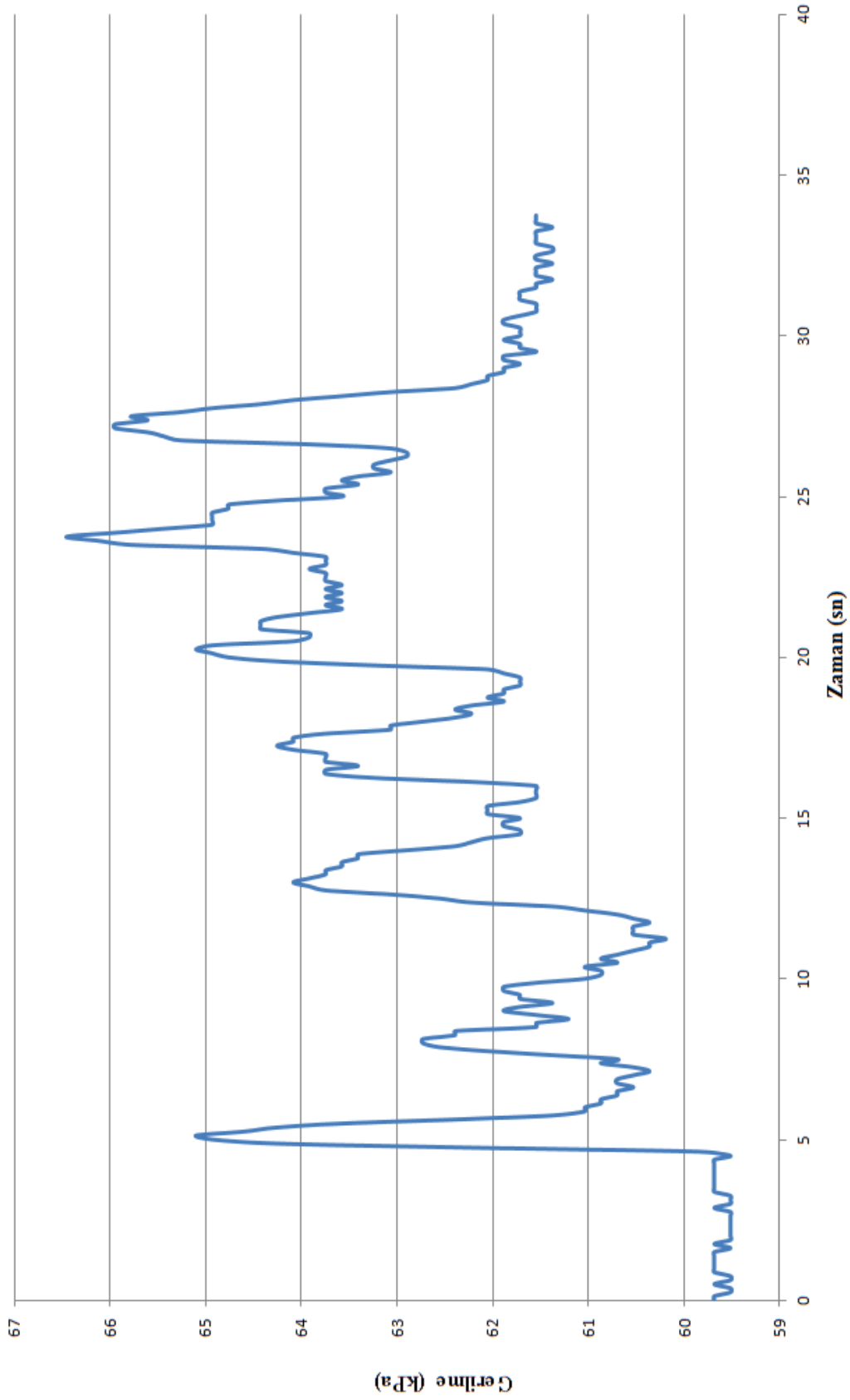
Ek A64

D=0.1mm, Dr=0.6, h=70-80cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği



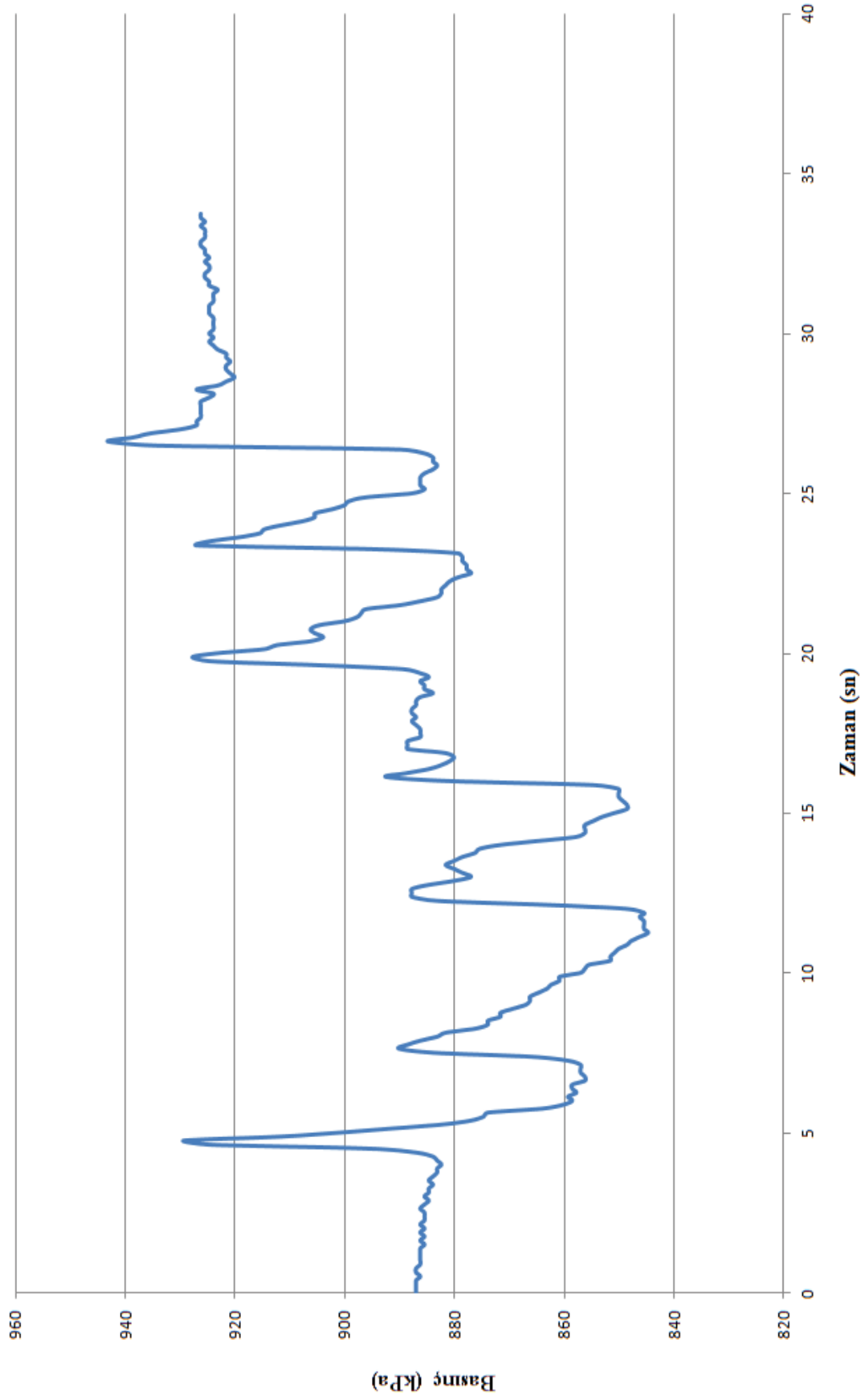
Ek A65

D=0-1mm, $D_r=0.6$, $h=70-80$ cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği



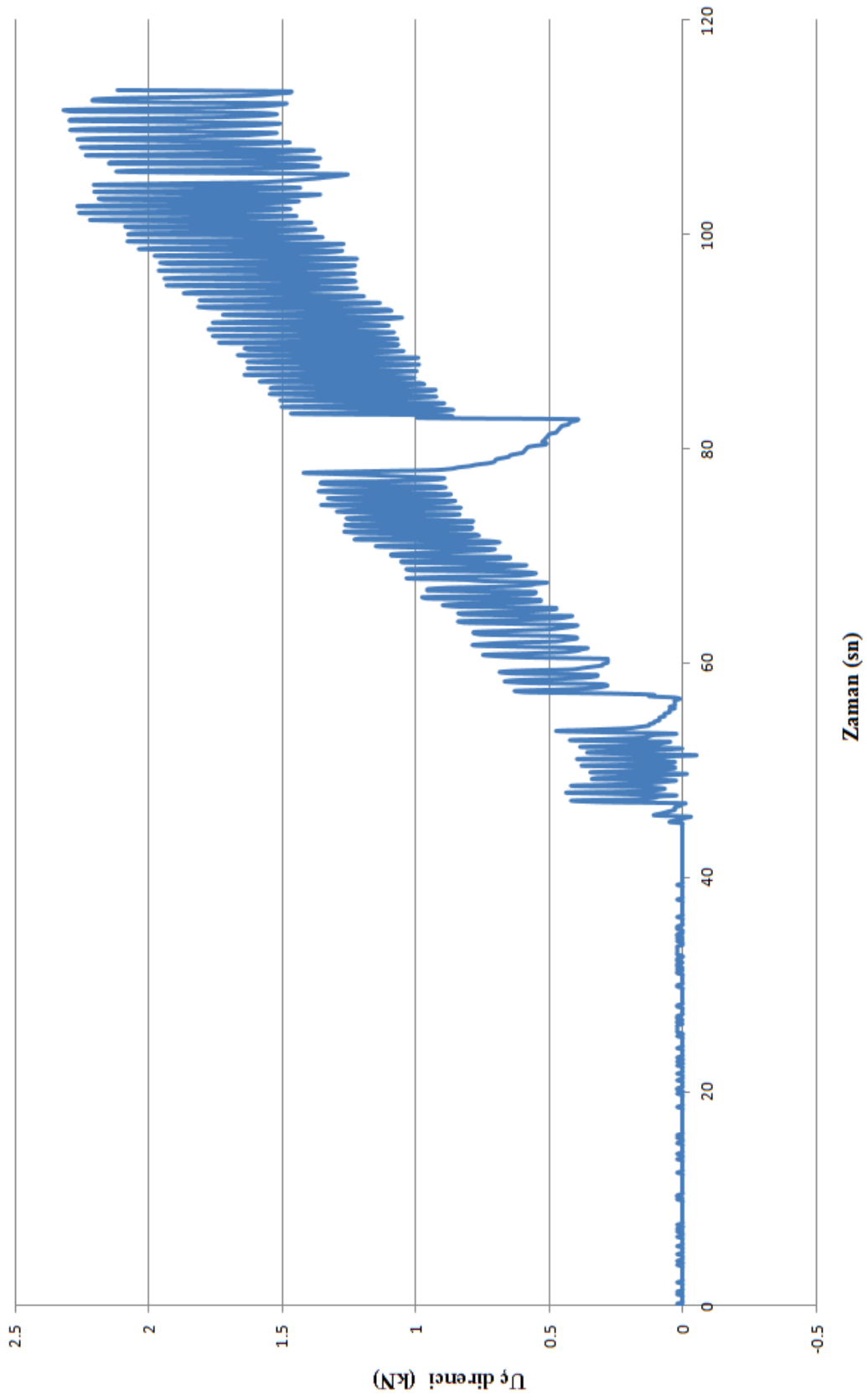
Ek A66

D=0-1mm, Dr=0.6, h=70-80cm için Zaman - Üst ceket çevre basıncı grafiği

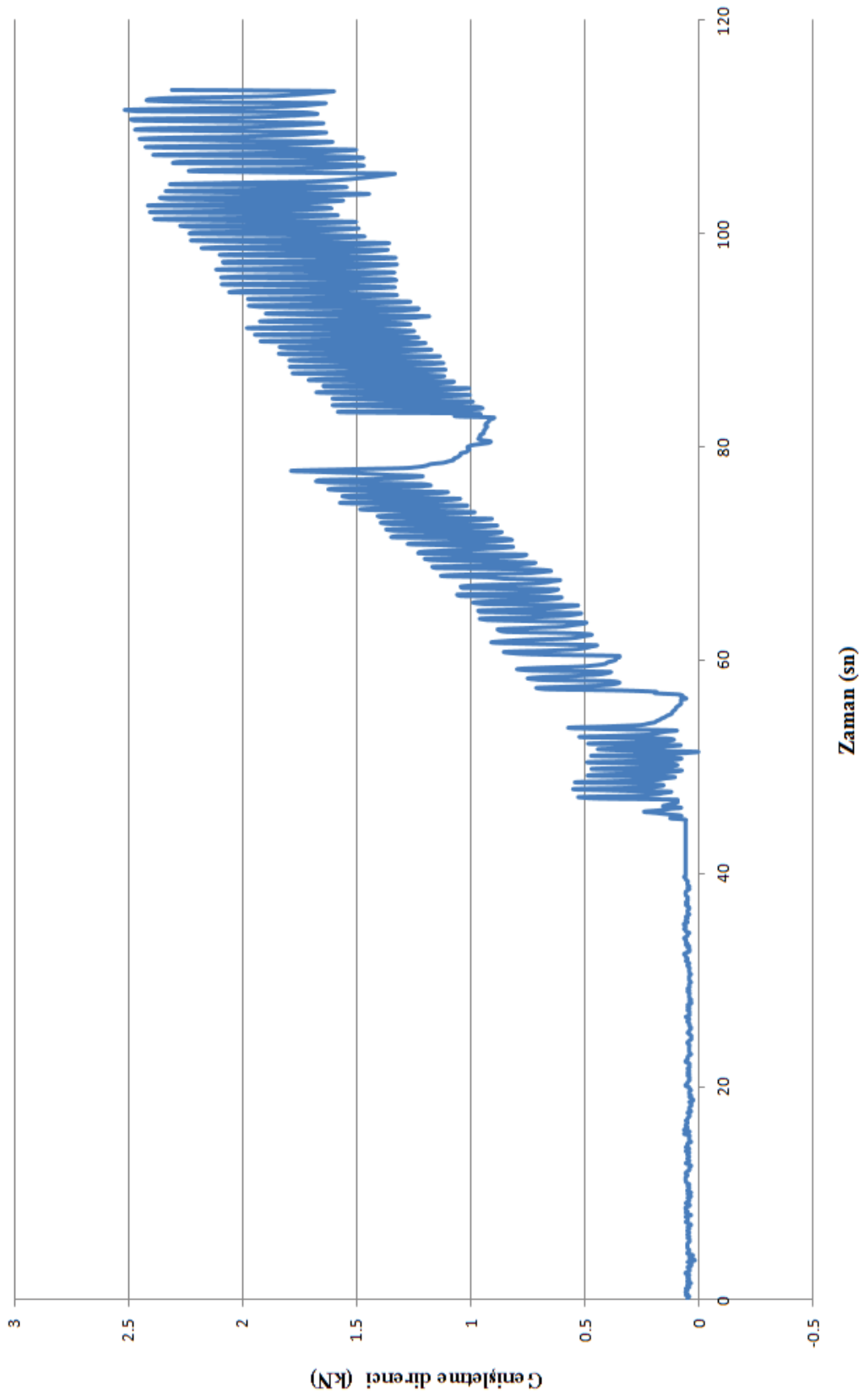


Ek B1

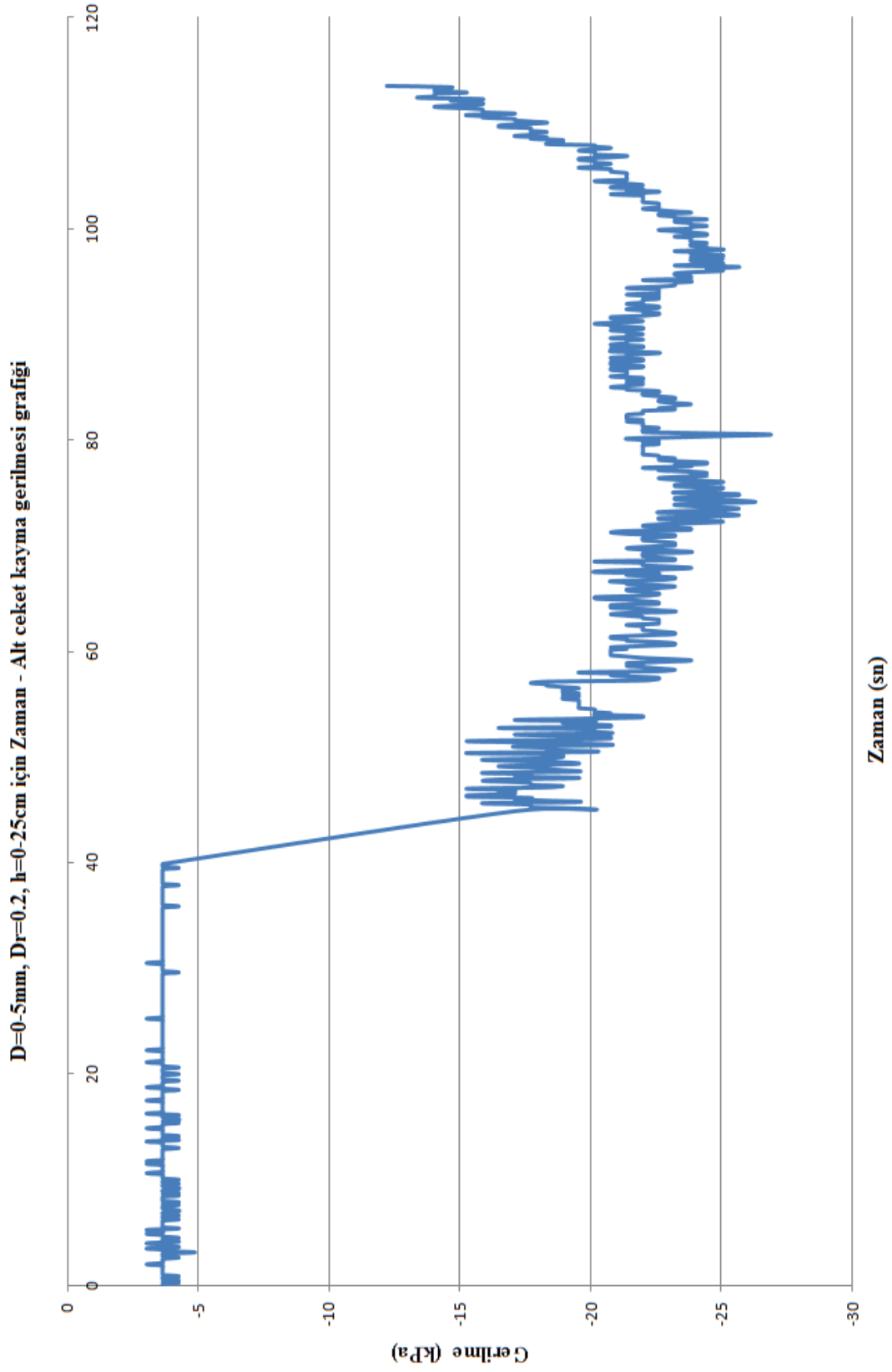
D=0.5mm, Dr=0.2, h=0.25cm için Zaman - Uç direnci grafiği



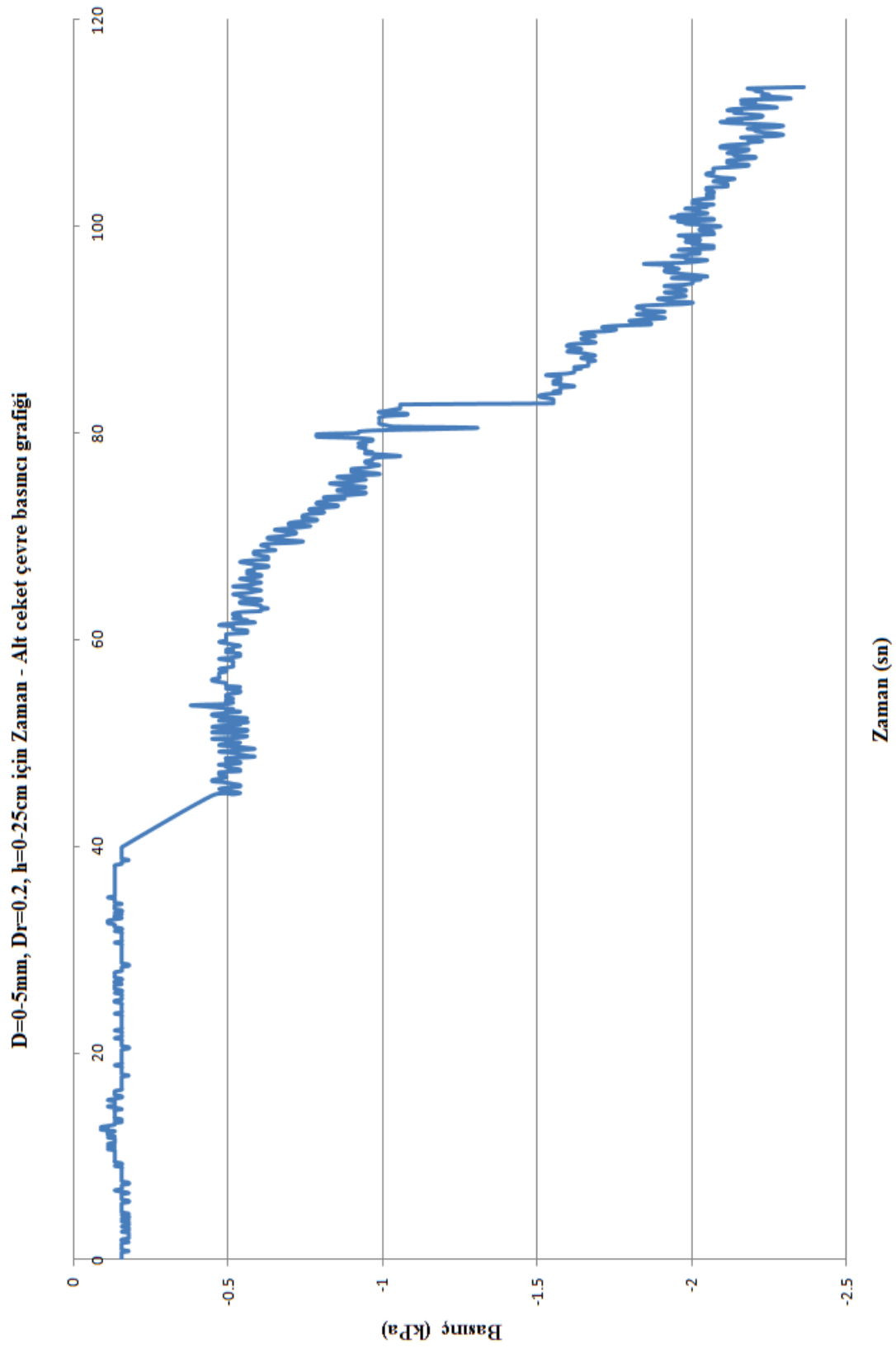
Ek B2

D=0.5mm, Dr=0.2, h=0.25cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği

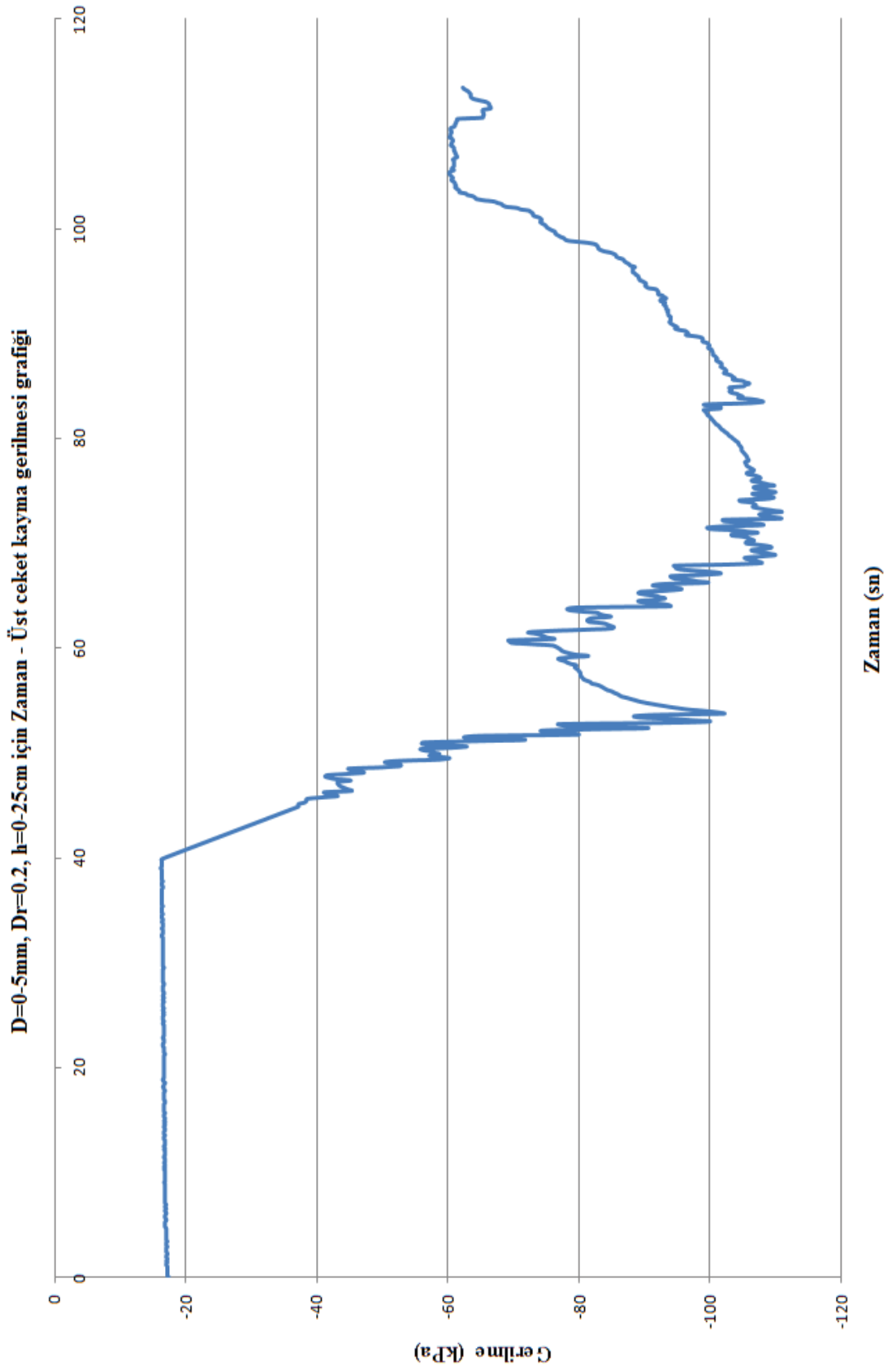
Ek B3



Ek B4

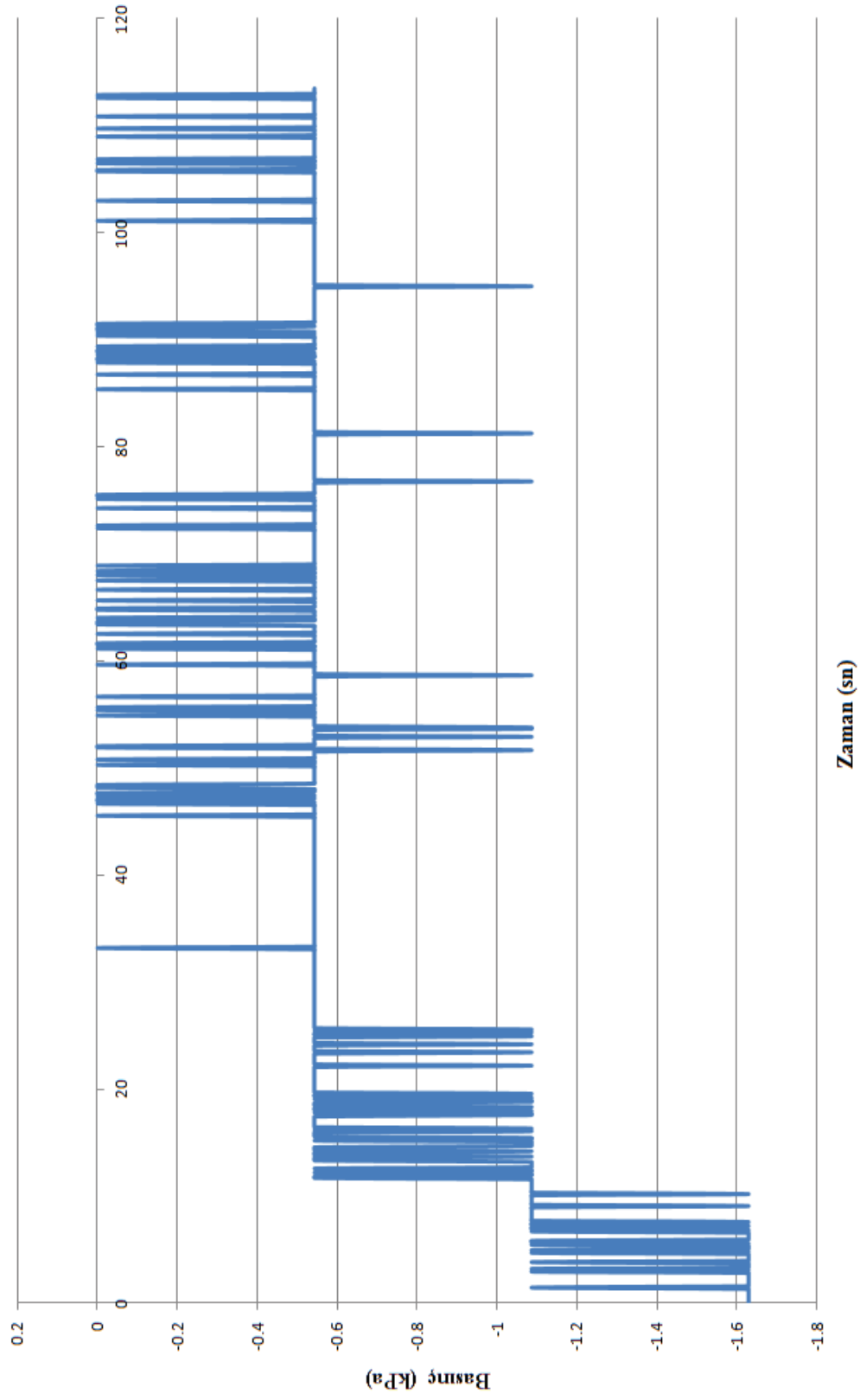


Ek B5



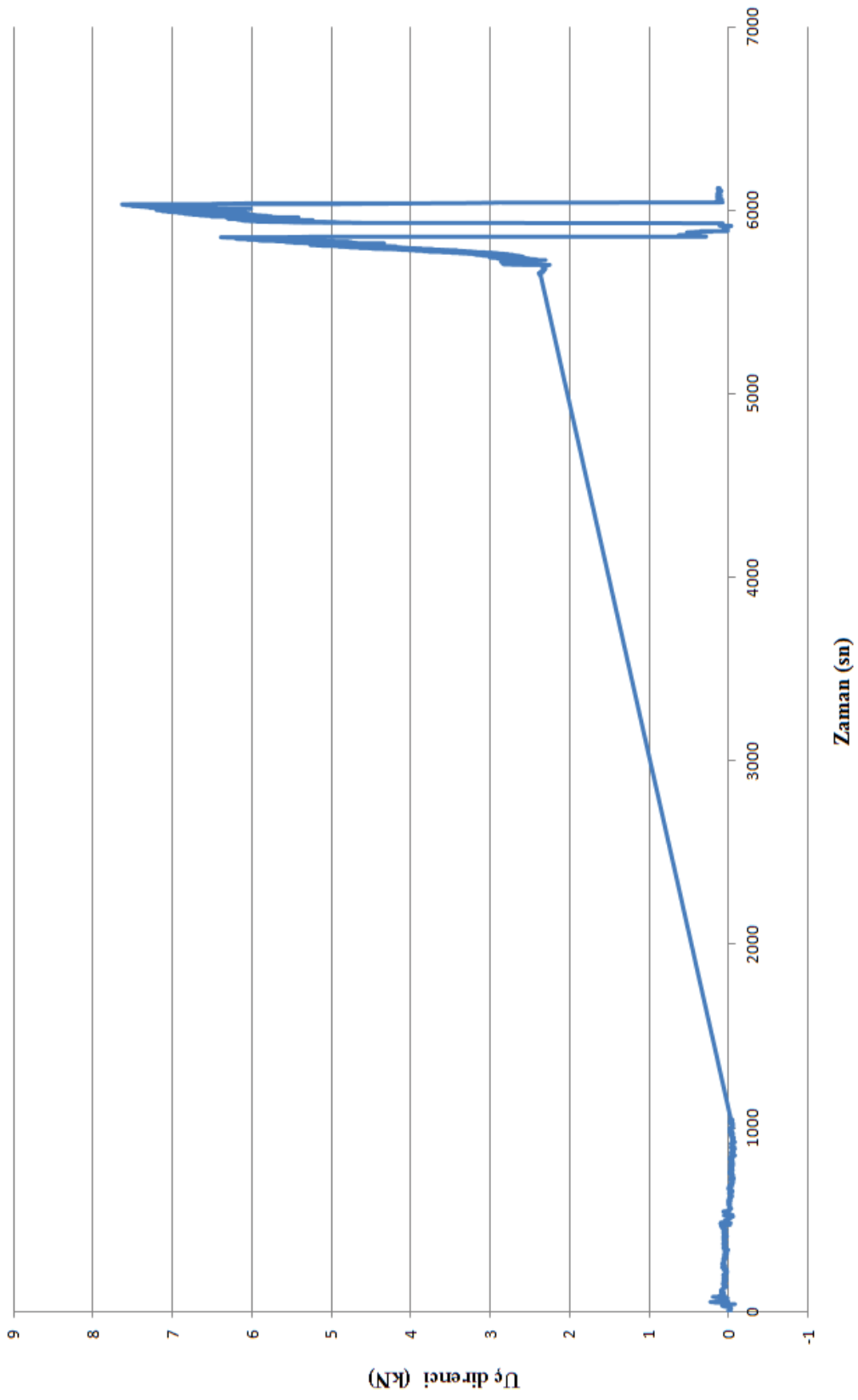
Ek B6

D=0.5mm, Dr=0.2, h=0.25cm için Zaman - Üst ceket çevre basıncı grafiği



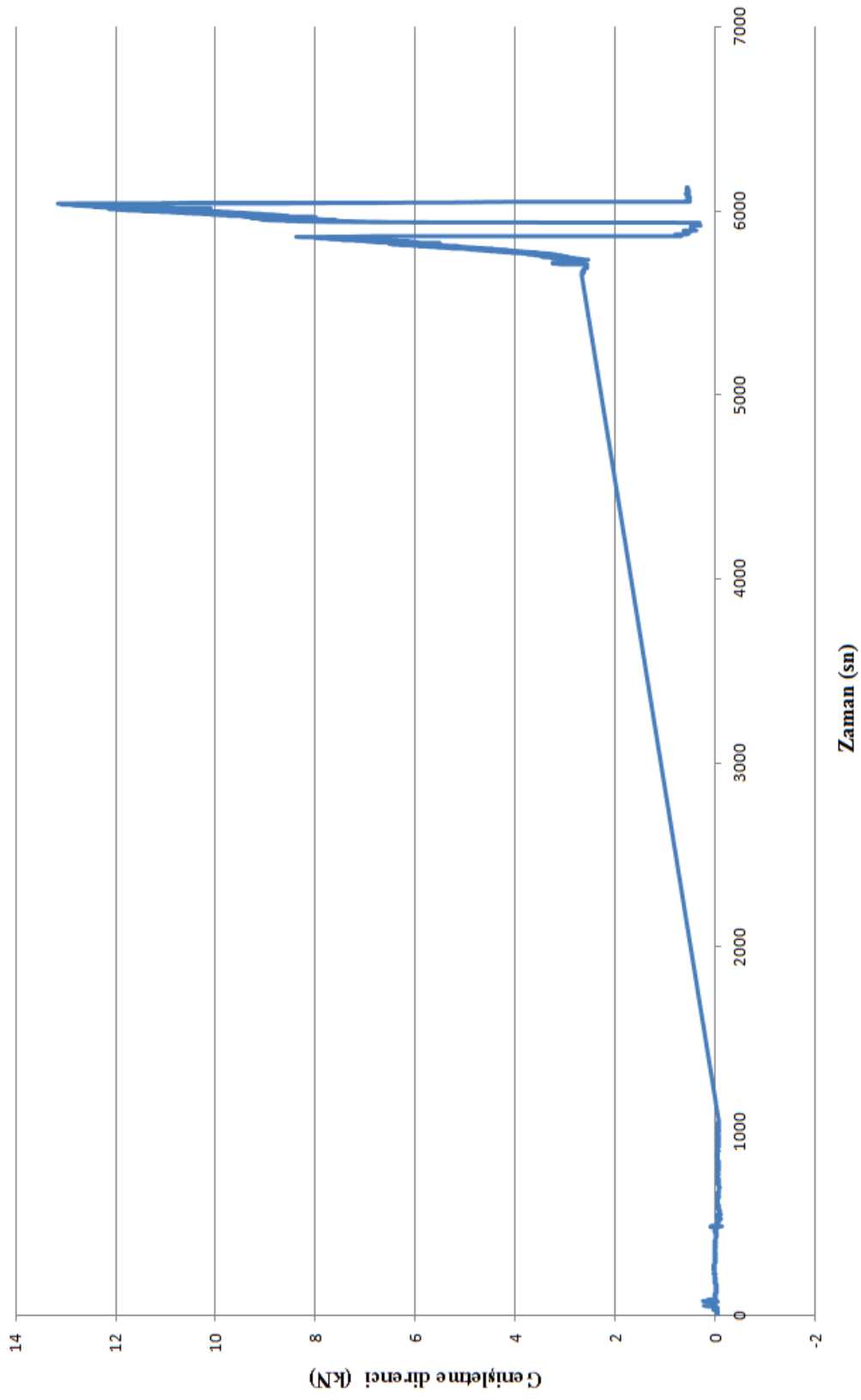
Ek B7

D=0.5mm, Dr=0.2, h=25-60cm için Zaman - Uç direnci grafiği



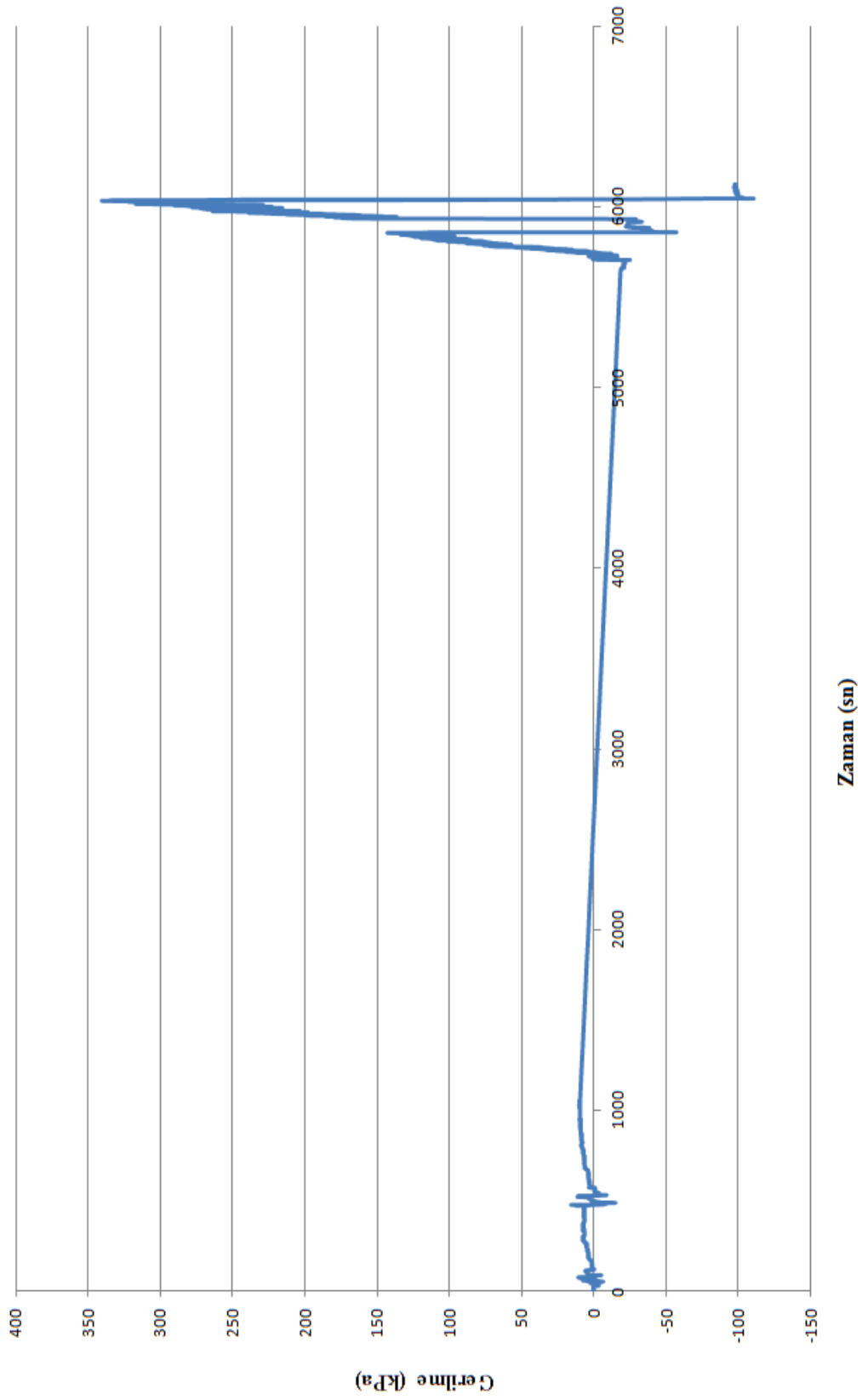
Ek B8

D=0.5mm, Dr=0.2, h=25-60cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği



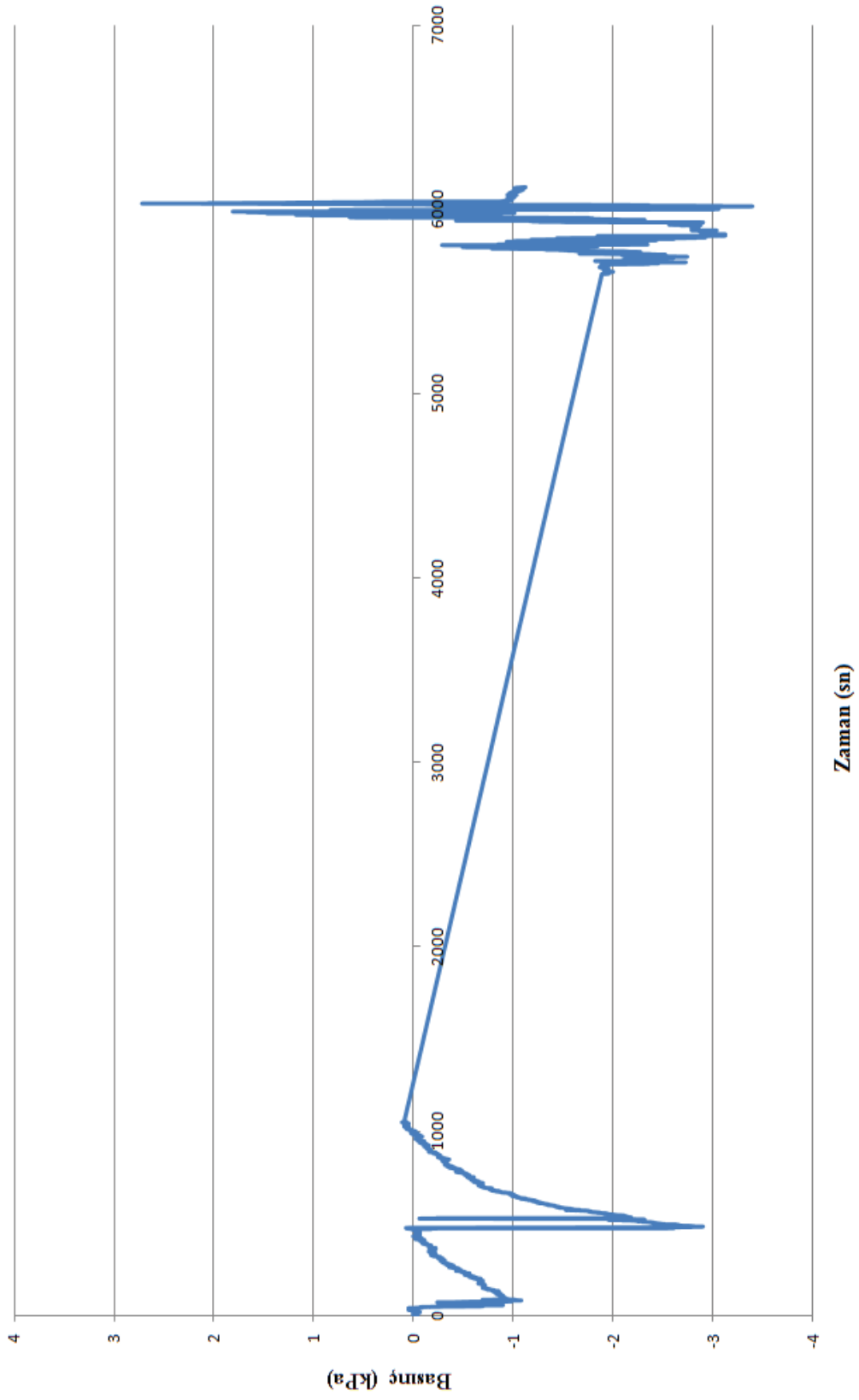
Ek B9

D=0-5mm, Dr=0.2, h=25-60cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

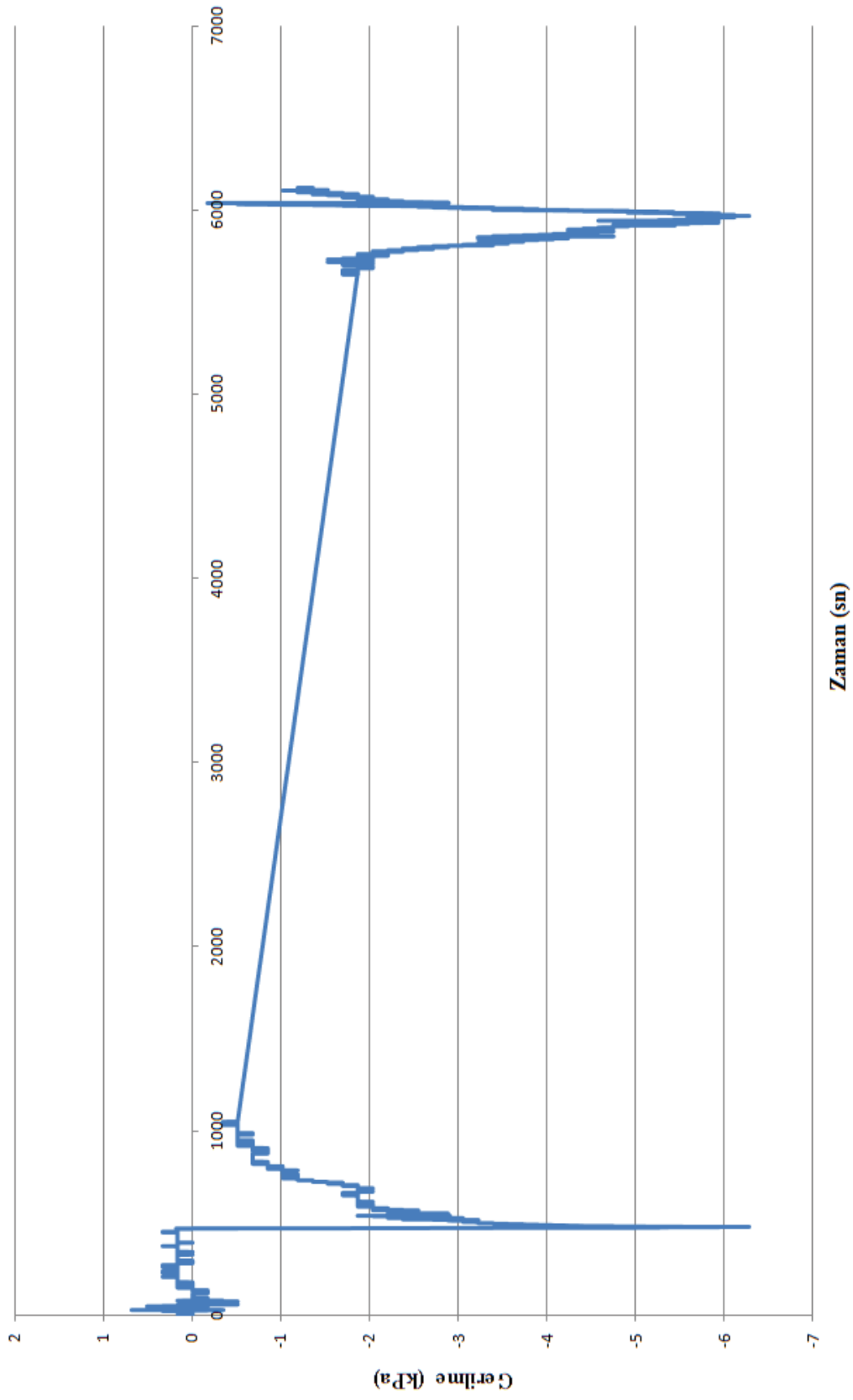


Ek B10

D=0.5mm, Dr=0.2, h=25-60cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

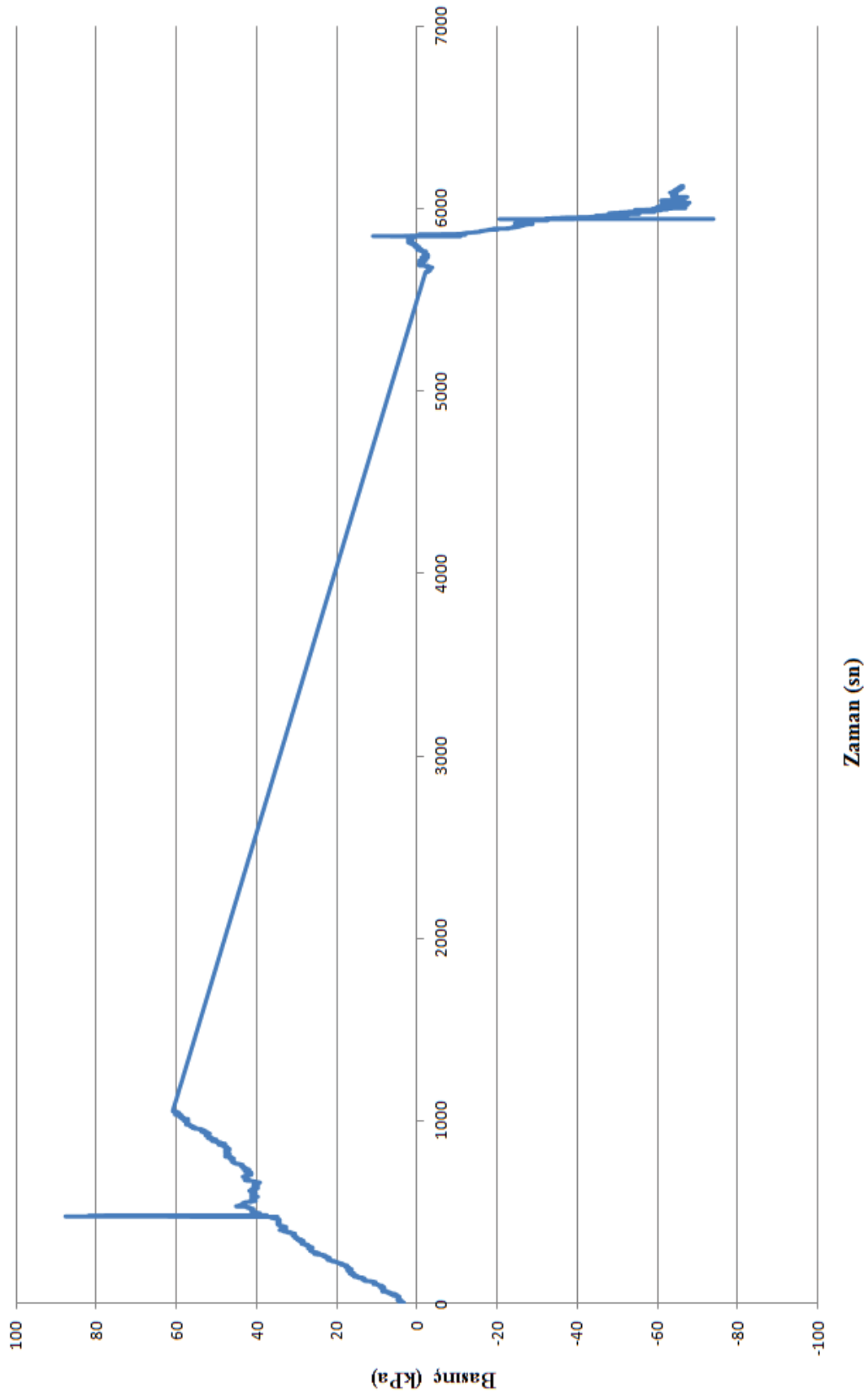


Ek B11

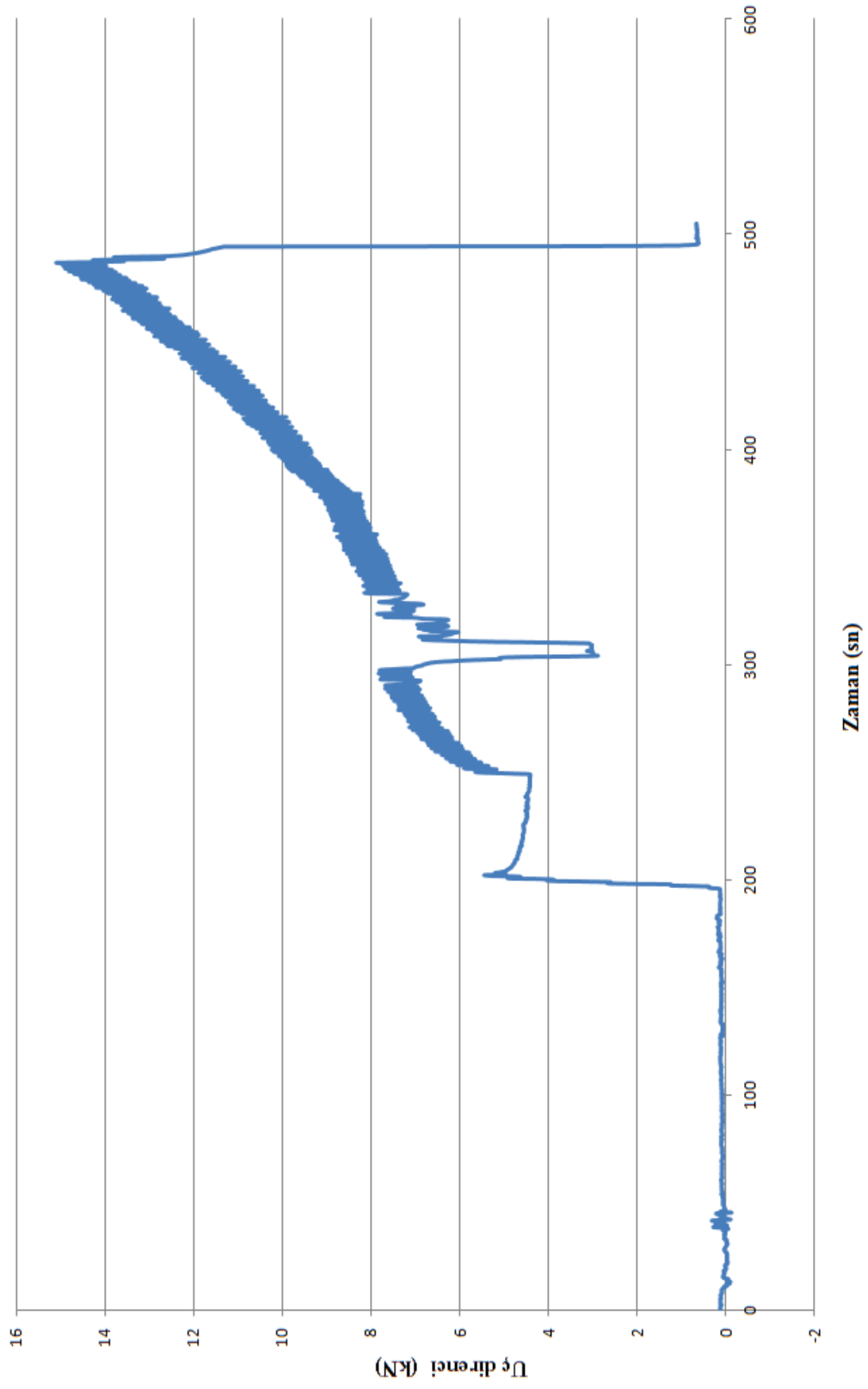
D=0-5mm, $D_r=0.2$, $h=25-60$ cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği

Ek B12

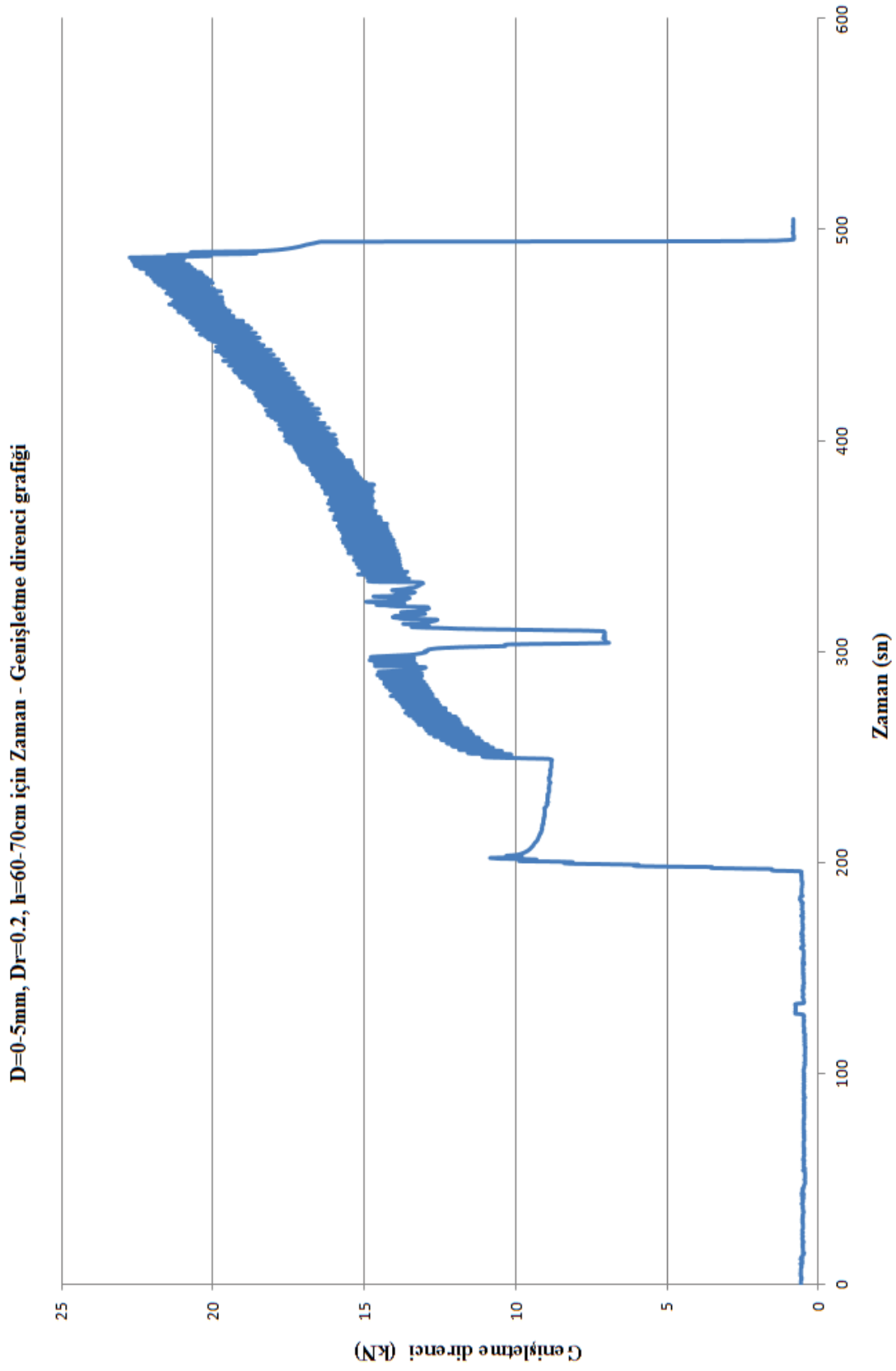
D=0-5mm, $D_r=0.2$, $h=25-60$ cm için Zaman - Üst çeket çevre basıncı grafiği



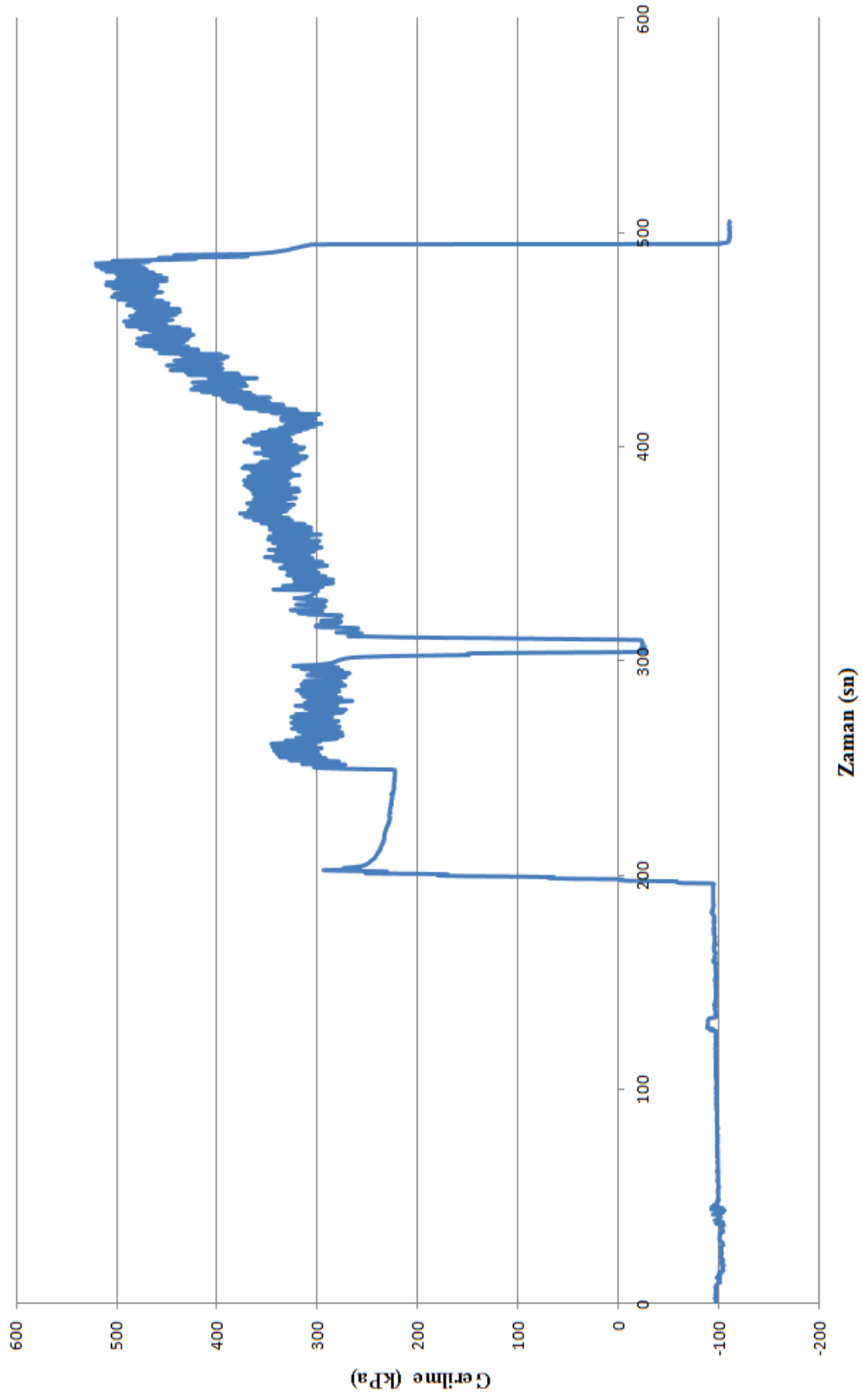
Ek B13

D=0-5mm, $D_f=0.2$, $h=60-70$ cm için Zaman - Uç direnci grafiği

Ek B14

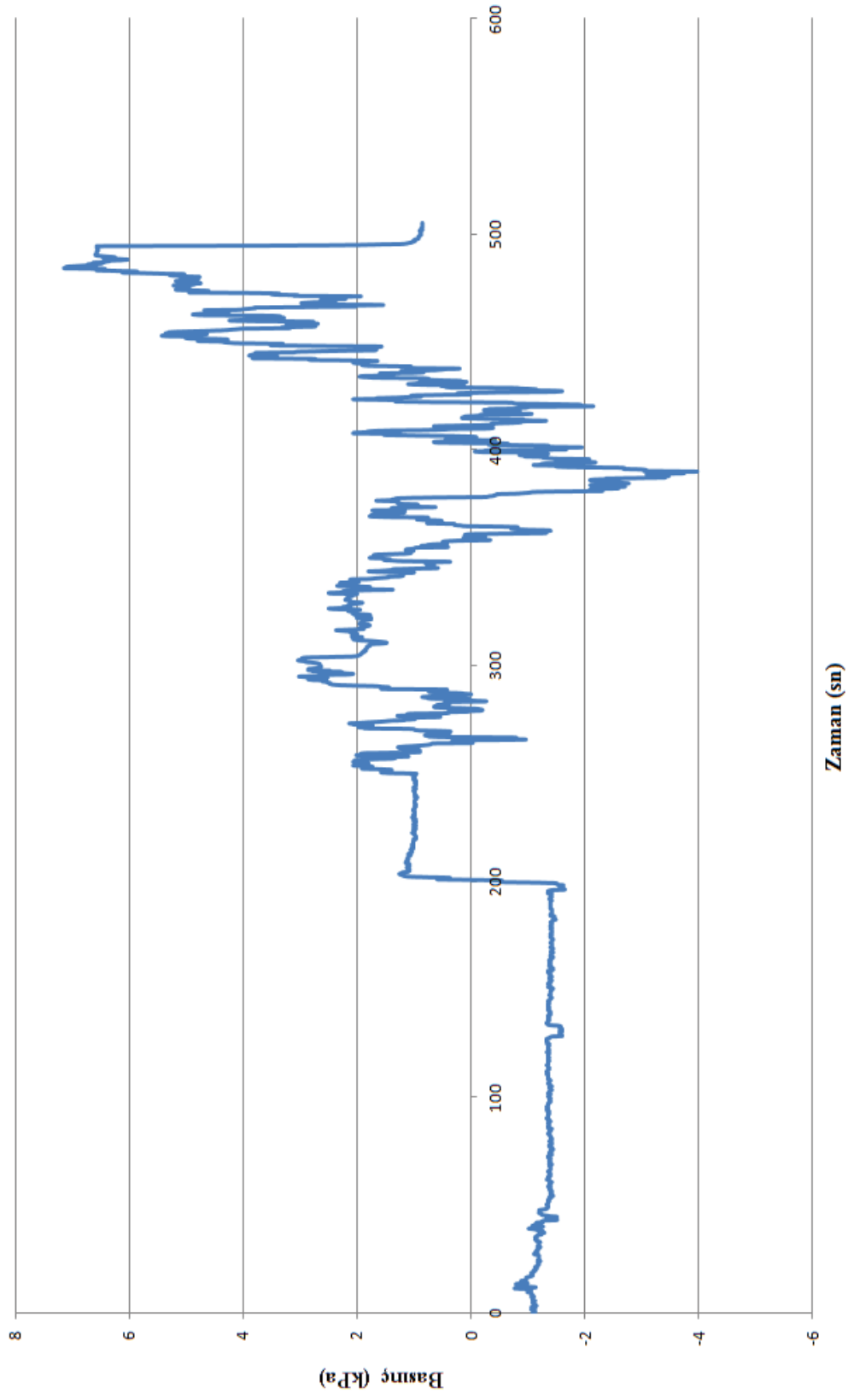


Ek B15

D=0.5mm, $D_r=0.2$, h=60-70cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

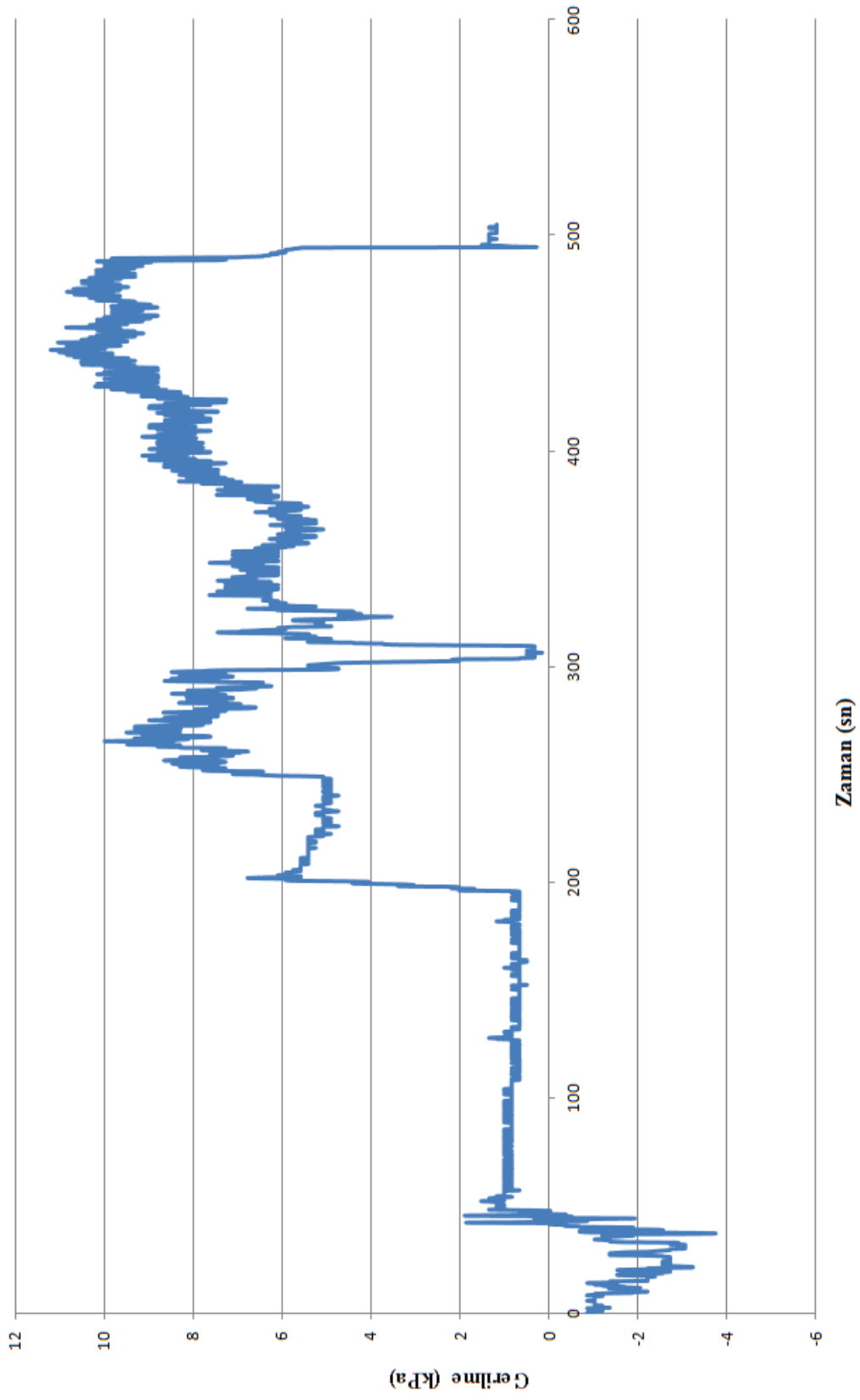
Ek B16

D=0-5mm, Dr=0.2, h=60-70cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

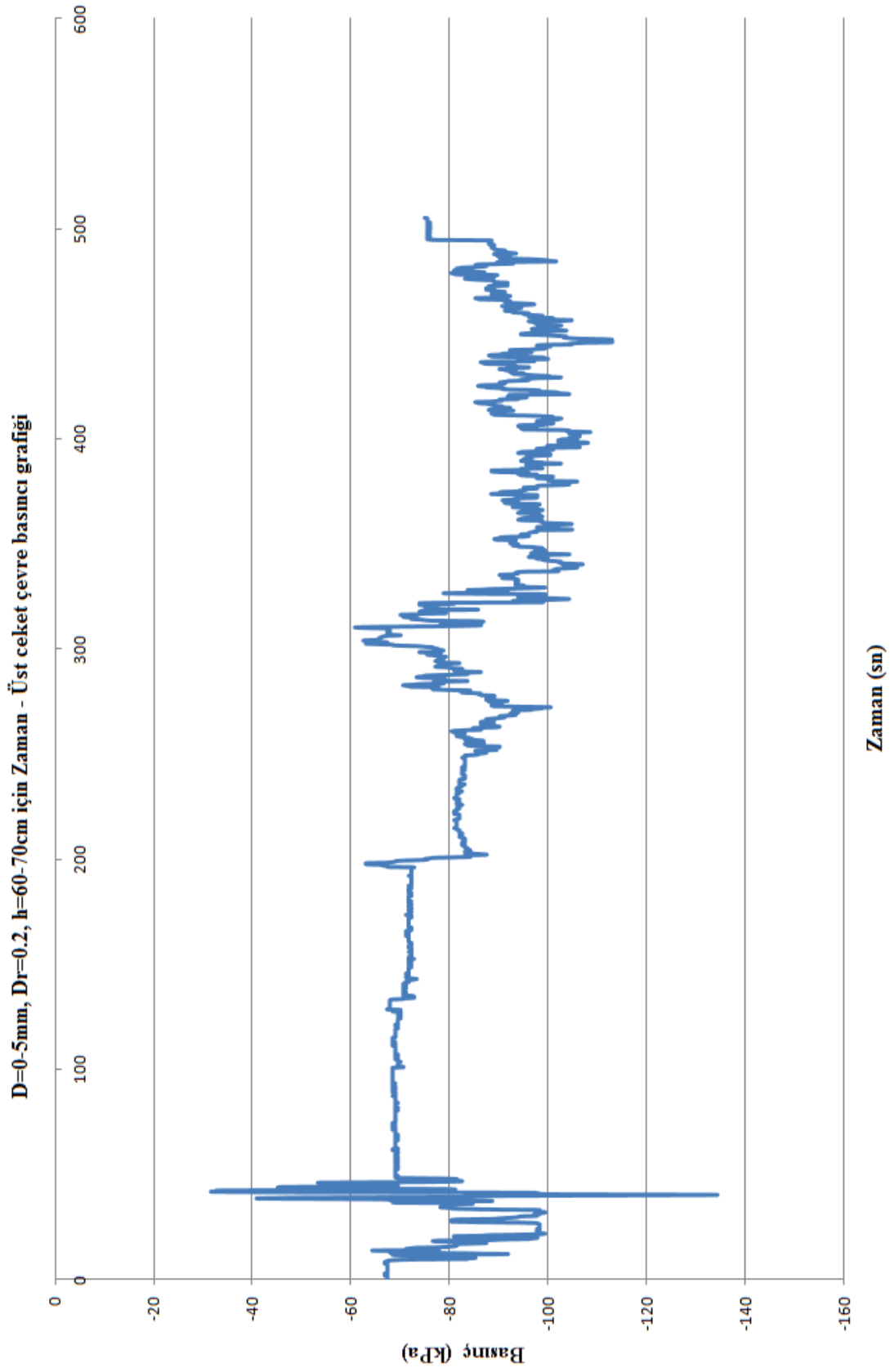


Ek B17

D=0.5mm, Dr=0.2, h=60-70cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği

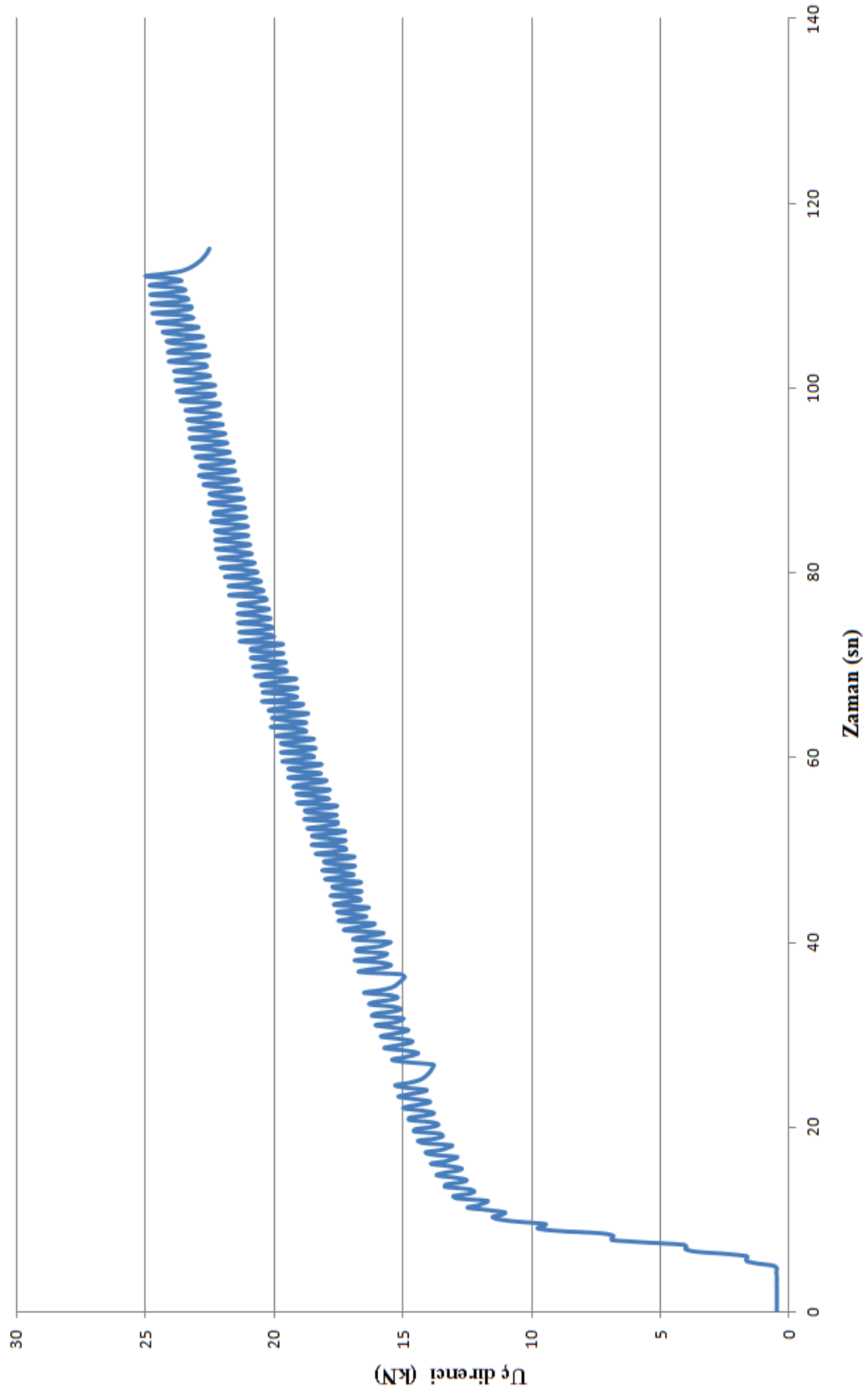


Ek B18



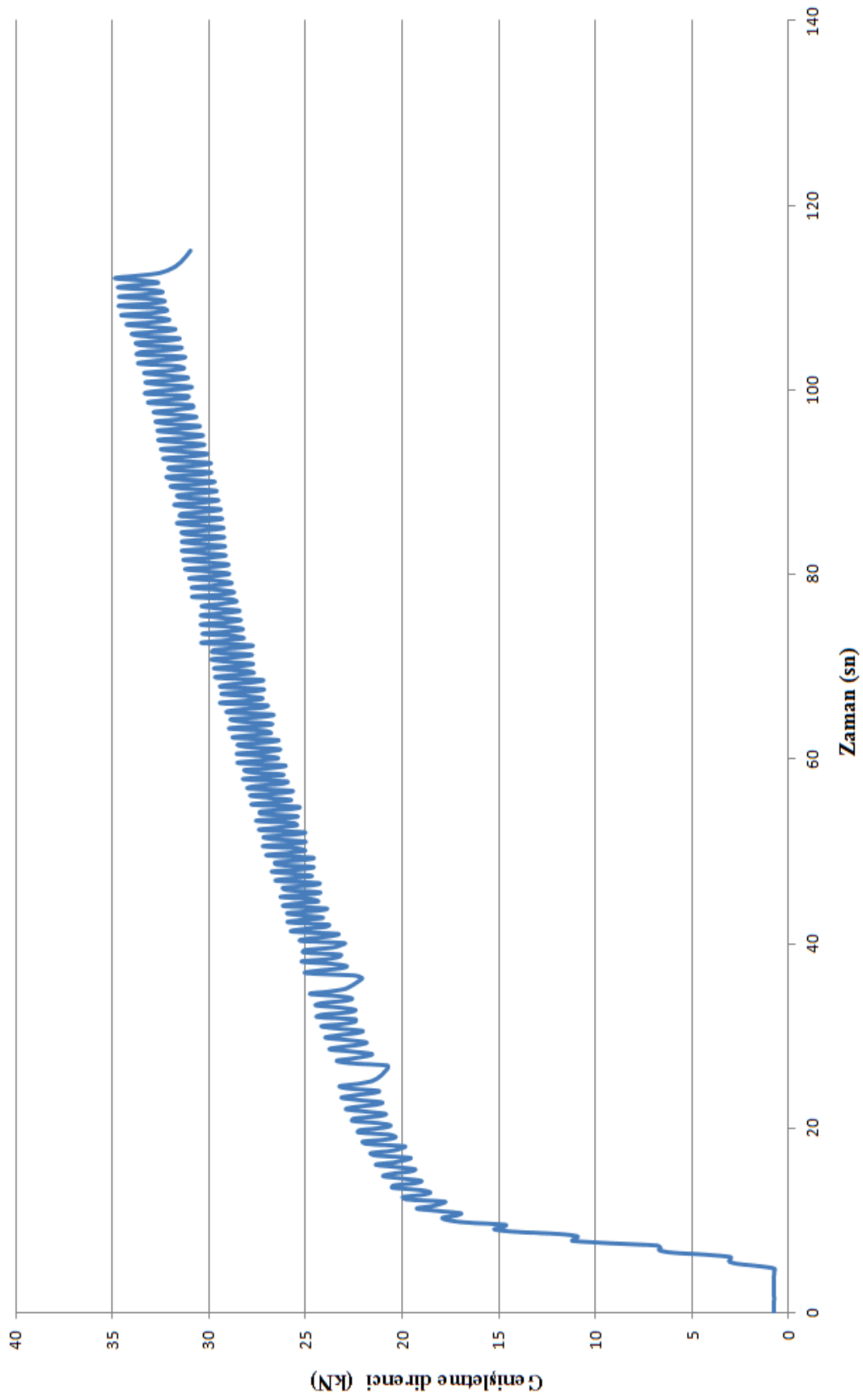
Ek B19

D=0.5mm, Dr=0.2, h=70-80cm için Zaman - Uç direnci grafiği



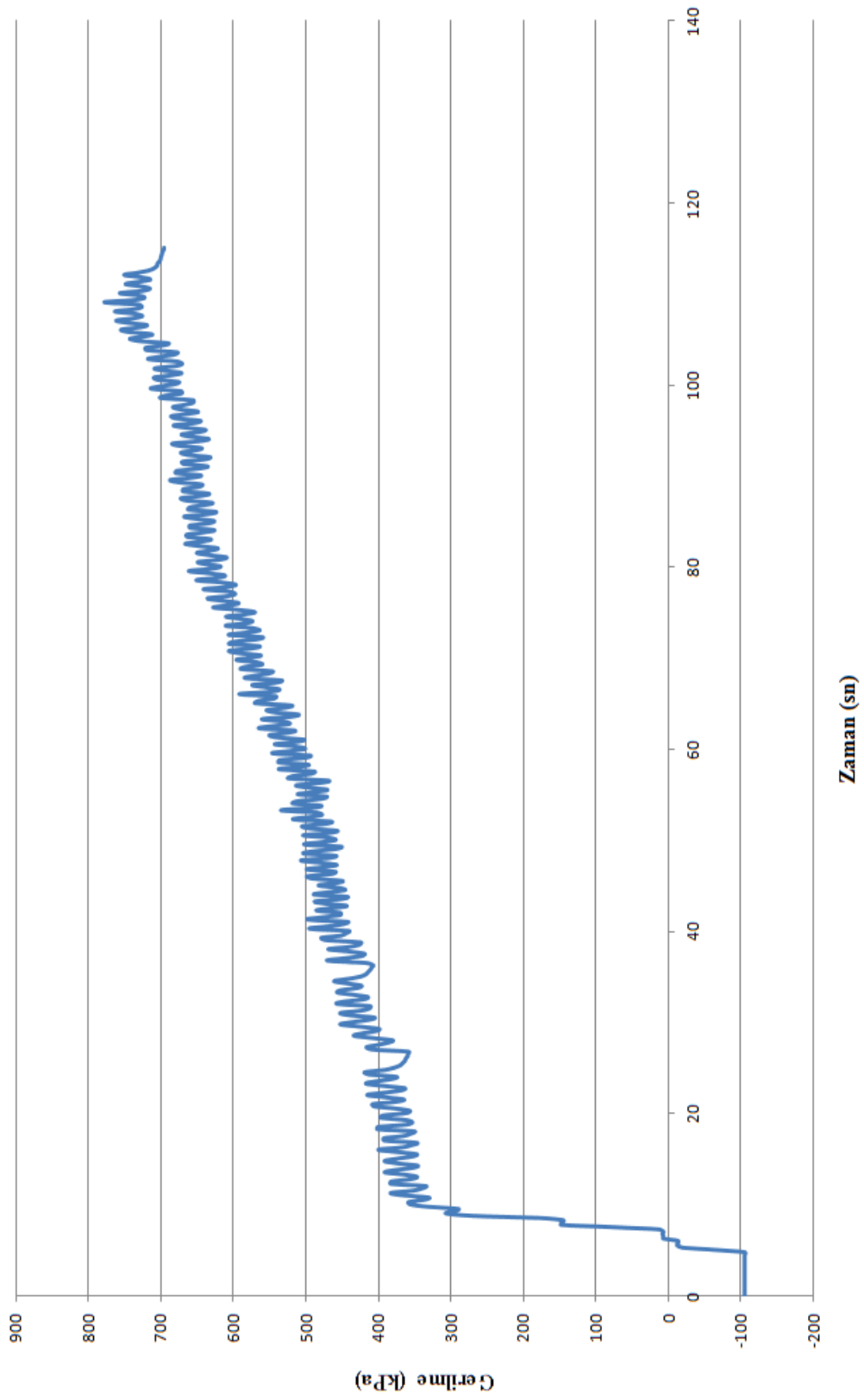
Ek B20

D=0.5mm, Dr=0.2, h=70-80cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği



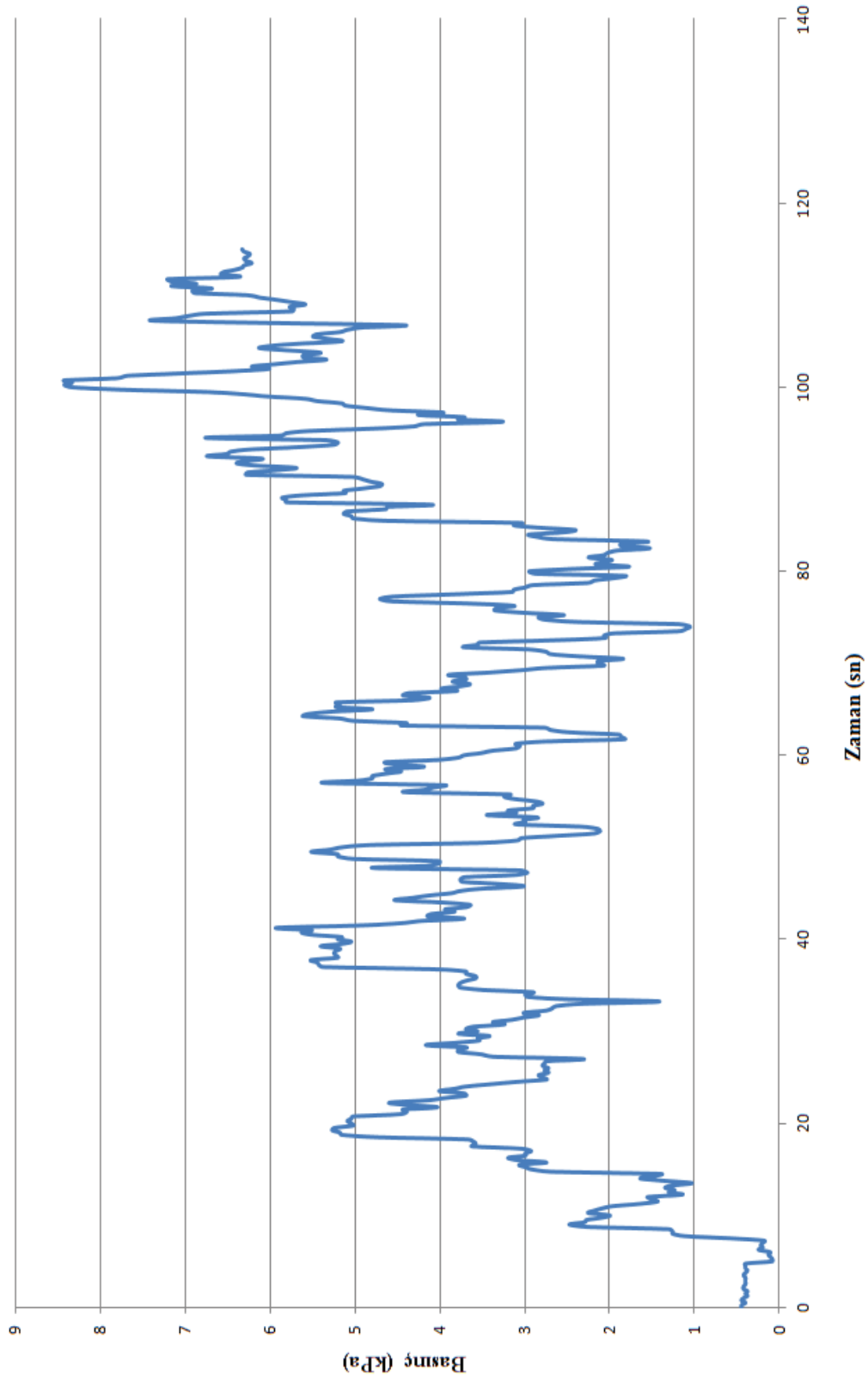
Ek B21

D=0-5mm, $D_r=0.2$, $h=70-80$ cm için Zaman - Alt çeket kayma gerilmesi grafiği

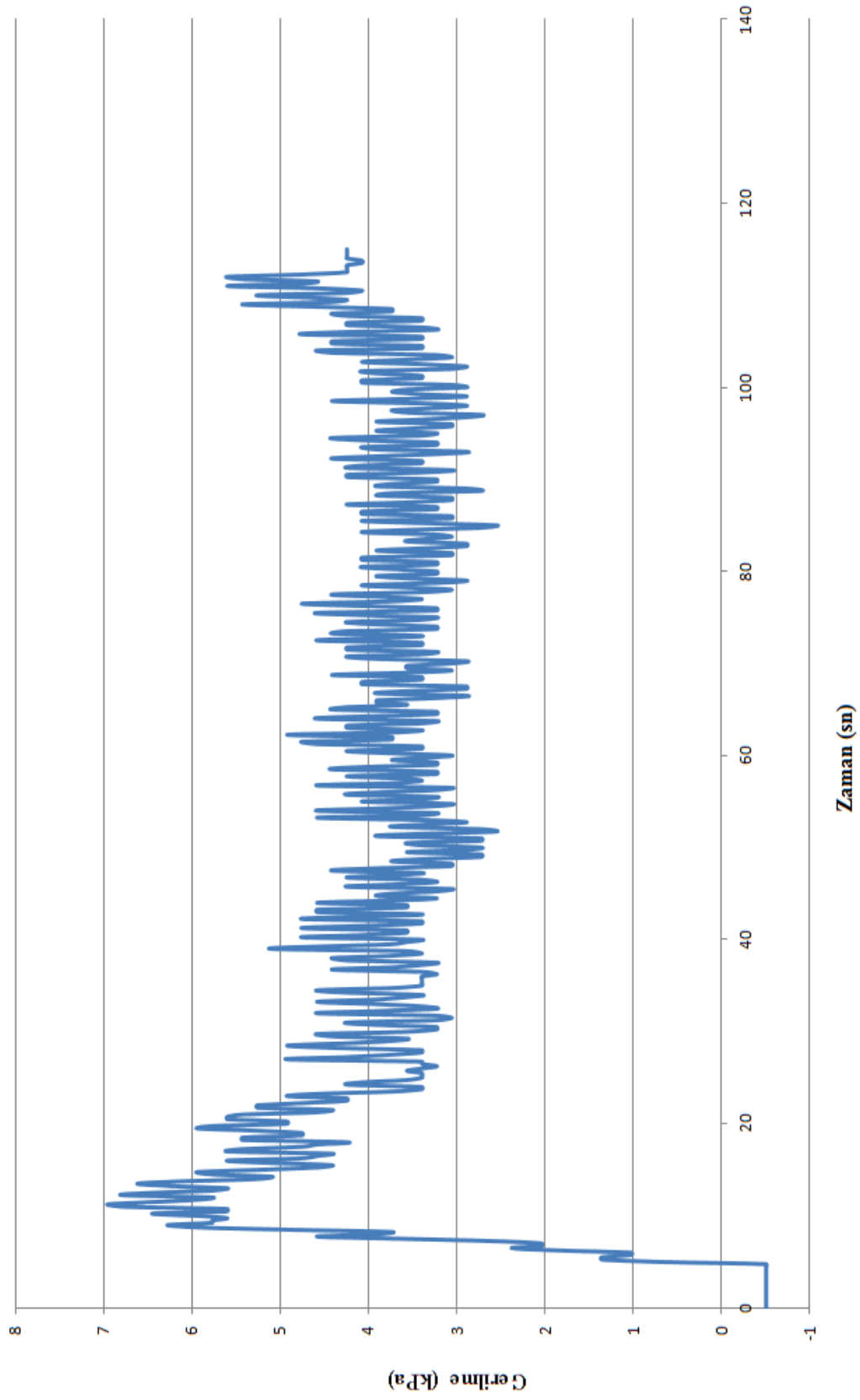


Ek B22

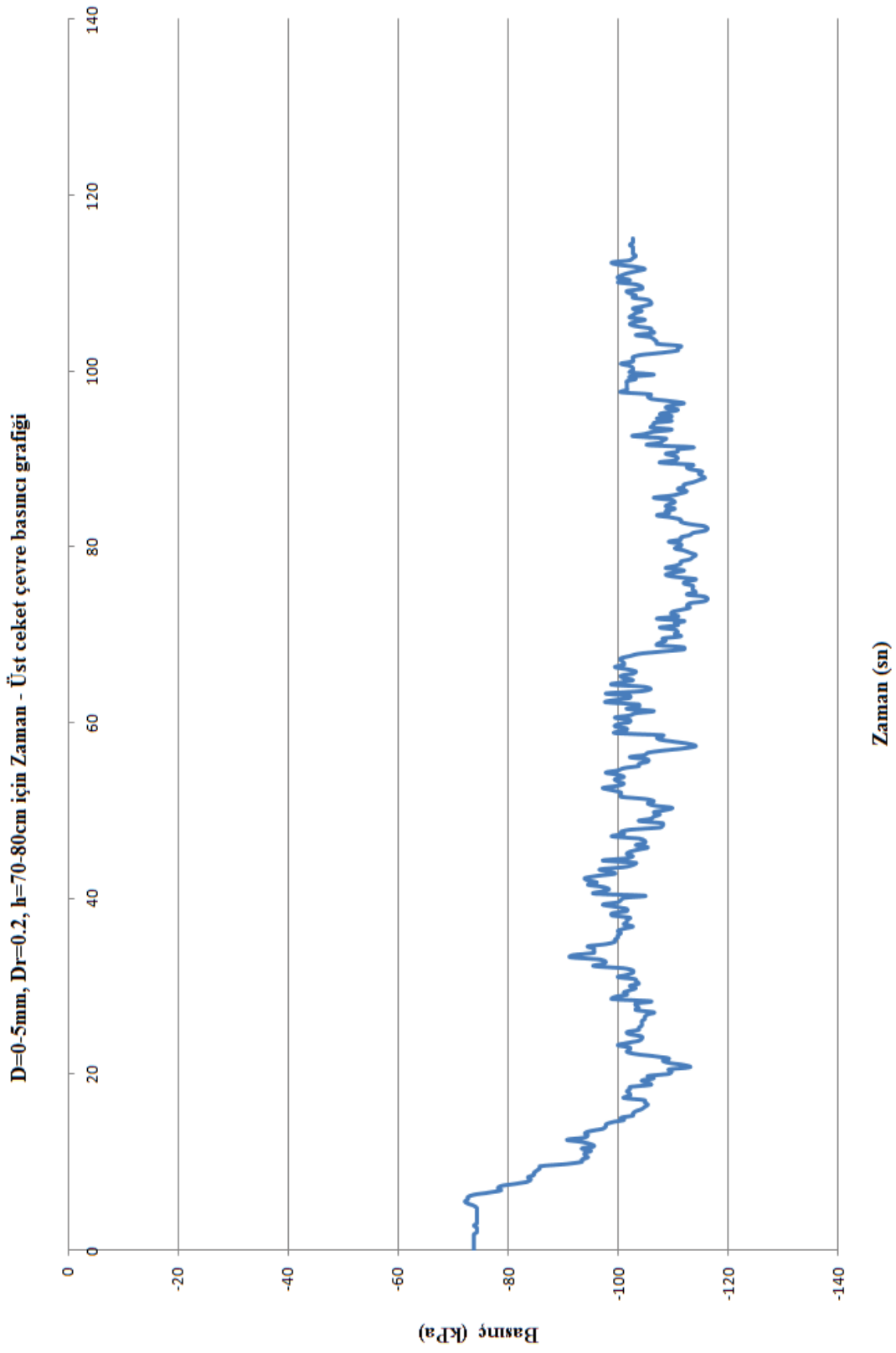
D=0-5mm, Dr=0.2, h=70-80cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği



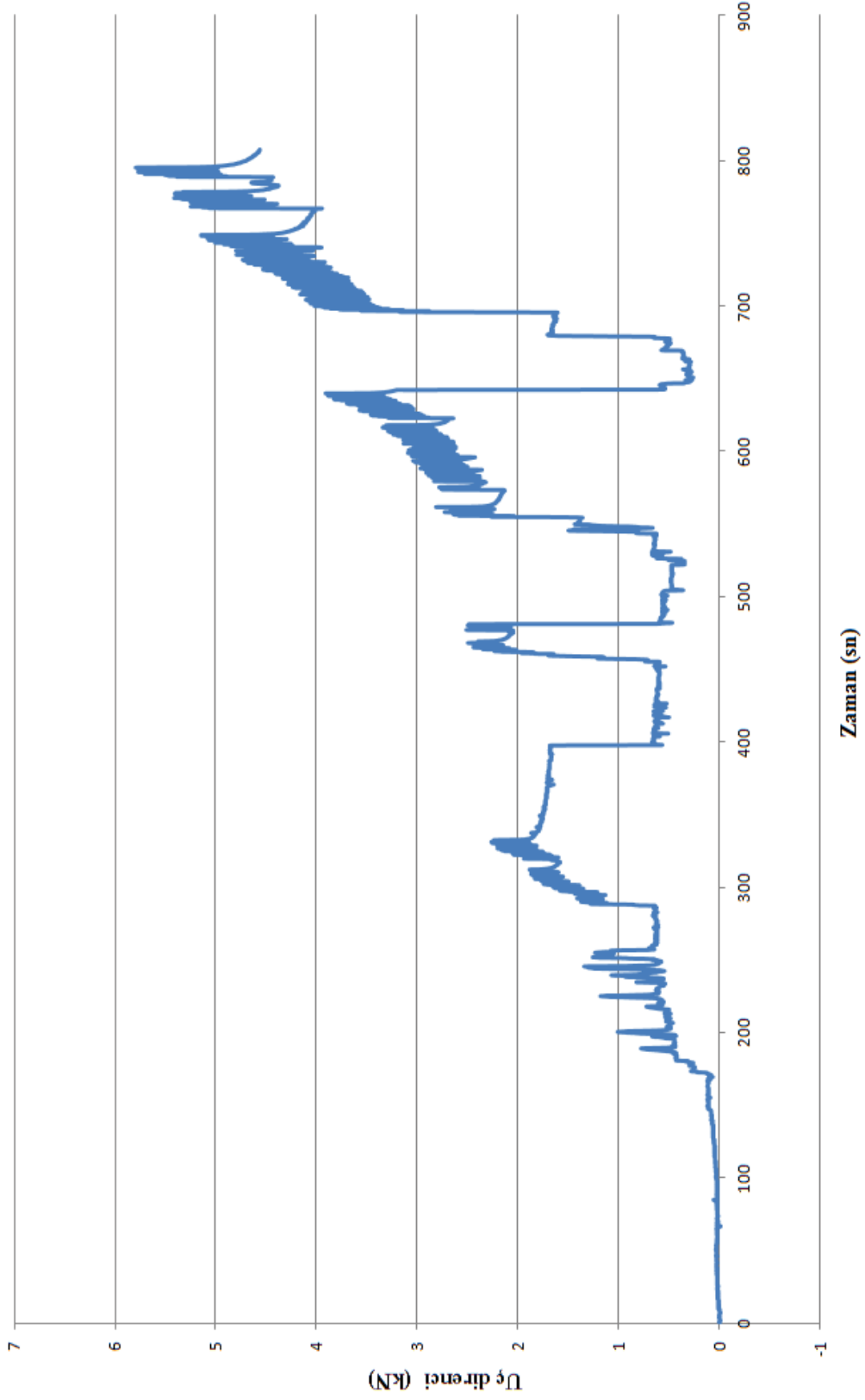
Ek B23

D=0-5mm, $D_r=0.2$, h=70-80cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği

Ek B24

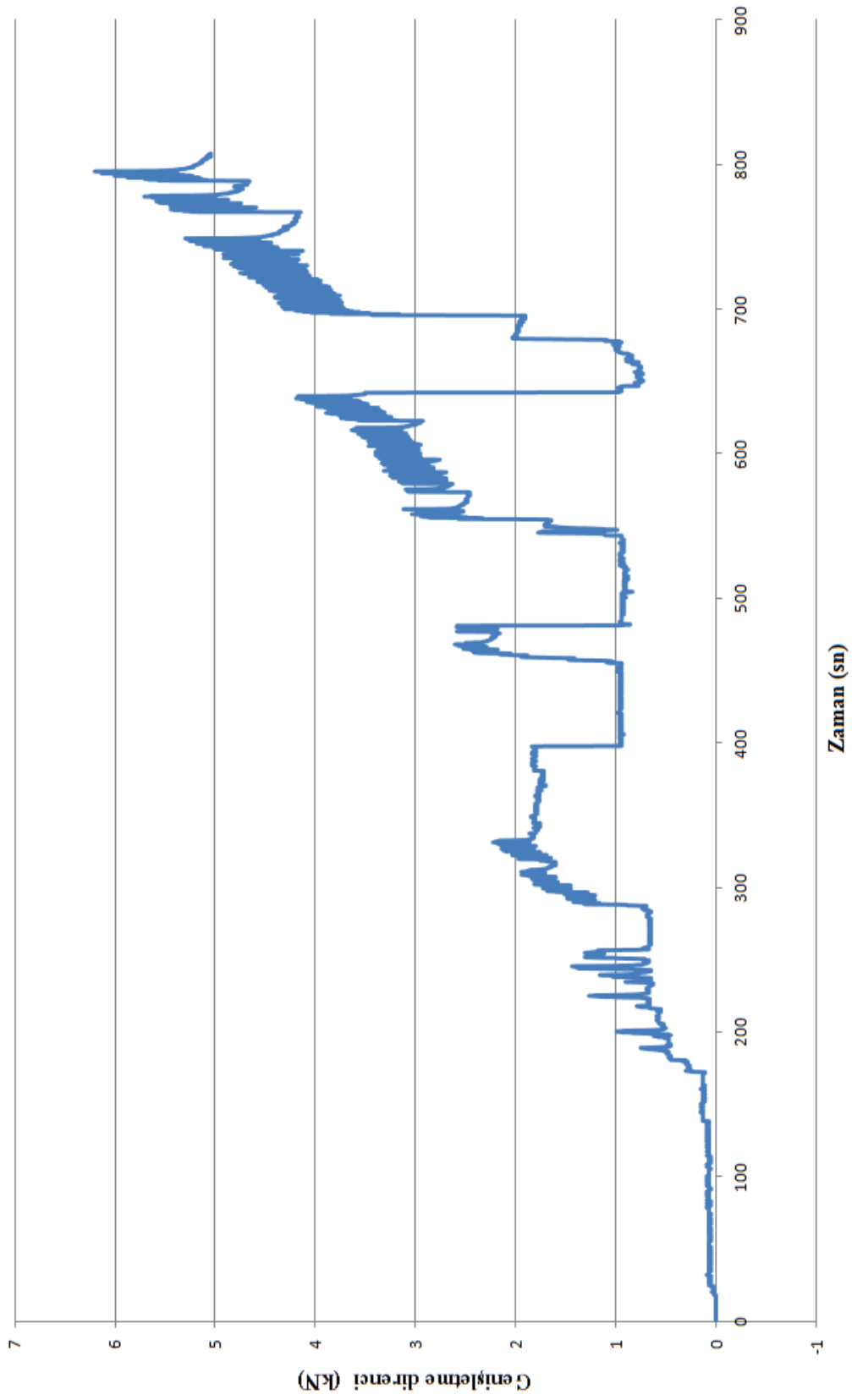


D=0.5mm, Dr=0.4, h=0.25cm için Zaman - Uç direnci grafiği



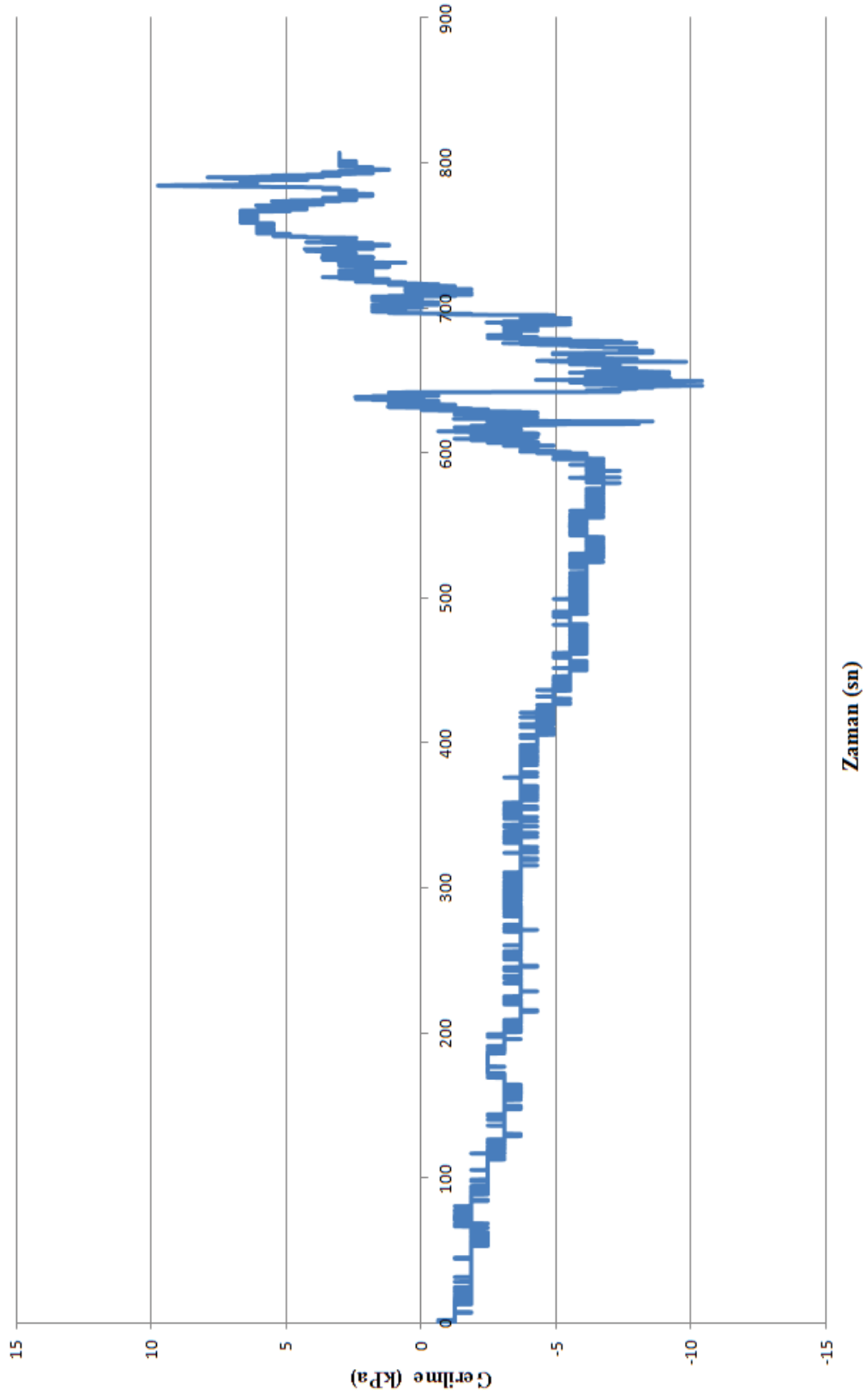
Zaman (sn)

Ek B26

D=0.5mm, $D_r=0.4$, $h=0.25$ cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği

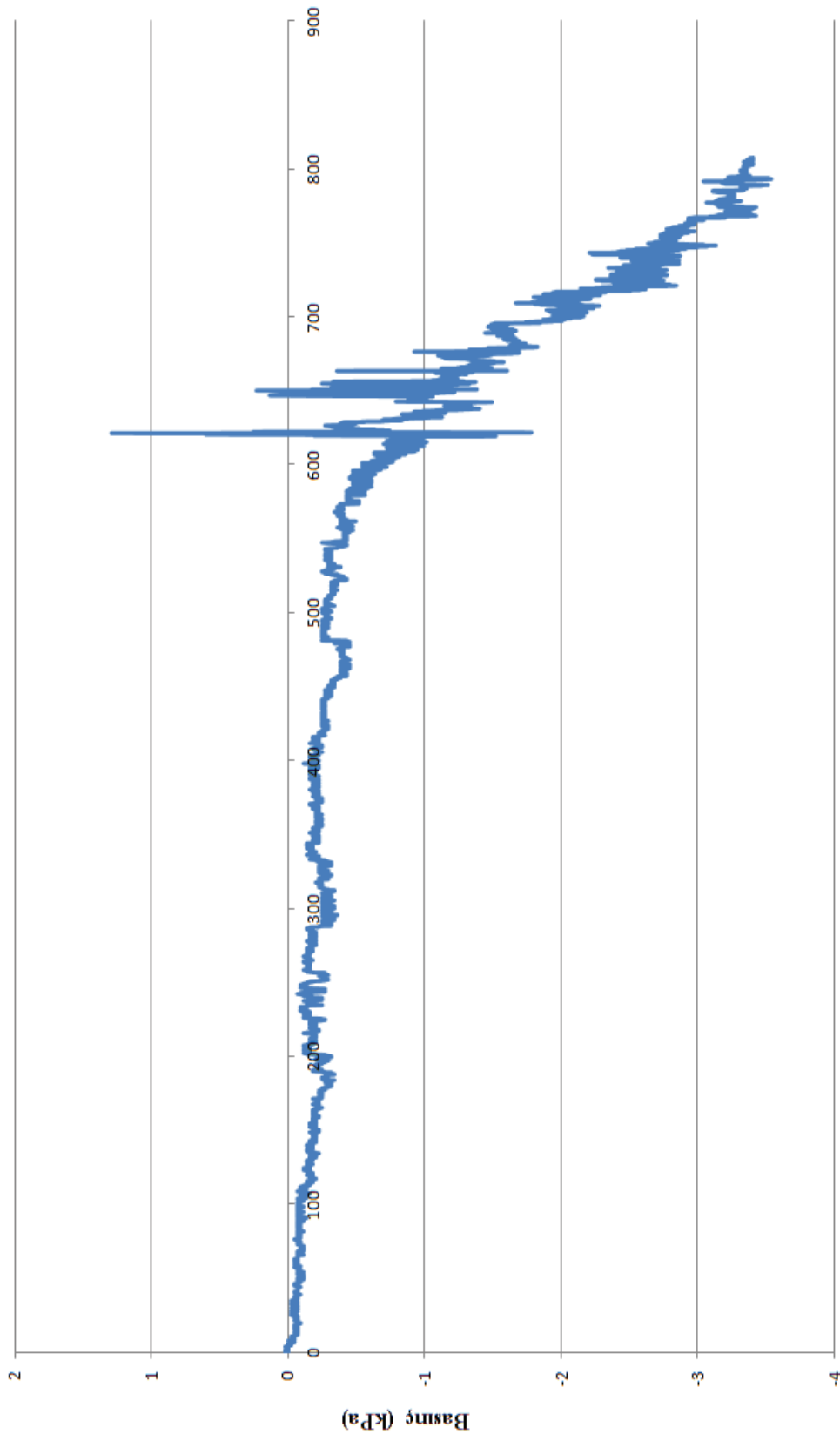
Ek B27

D=0-5mm, Dr=0.4, h=0-25cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği



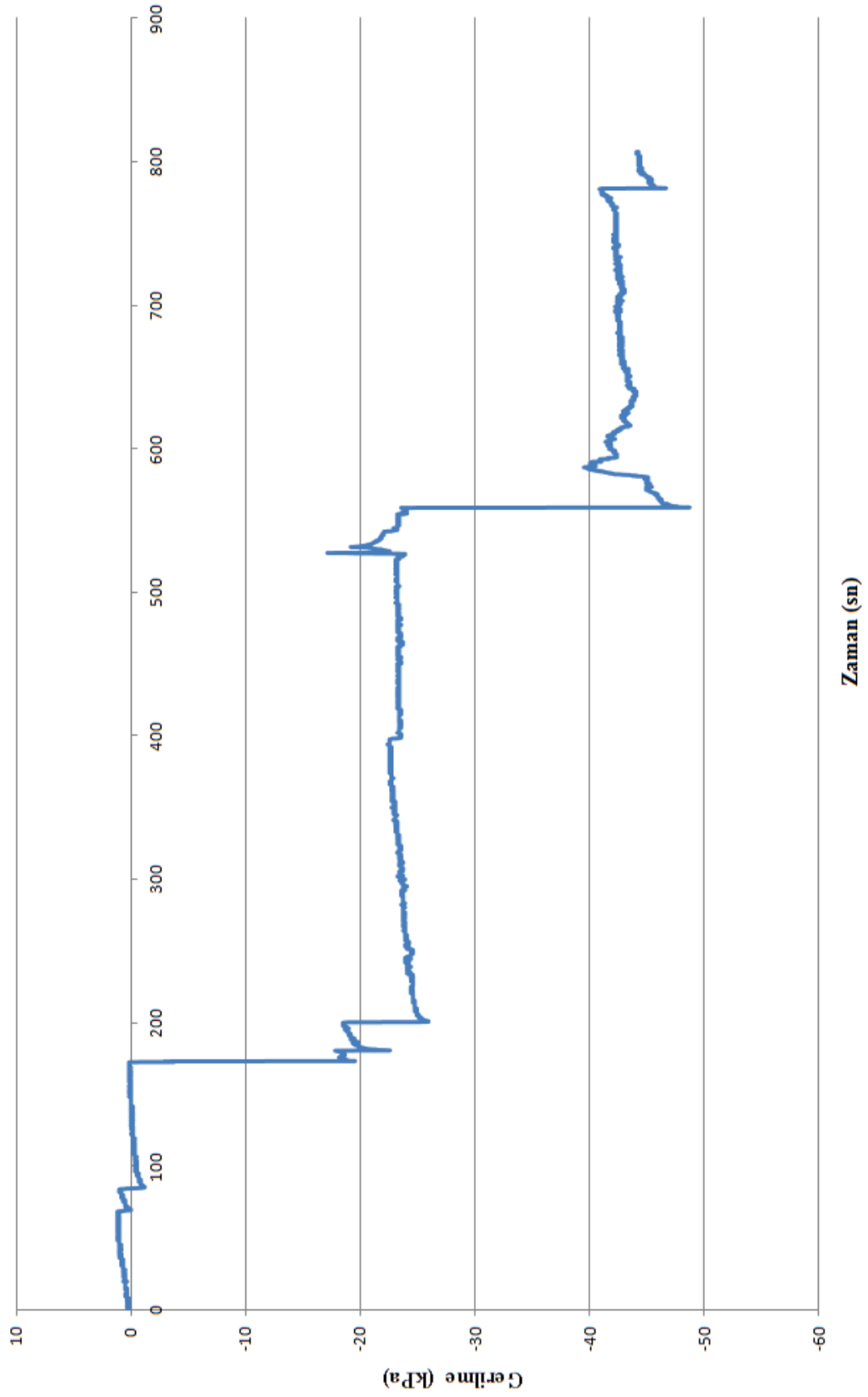
Ek B28

D=0-5mm, Dr=0.4, h=0-25cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği



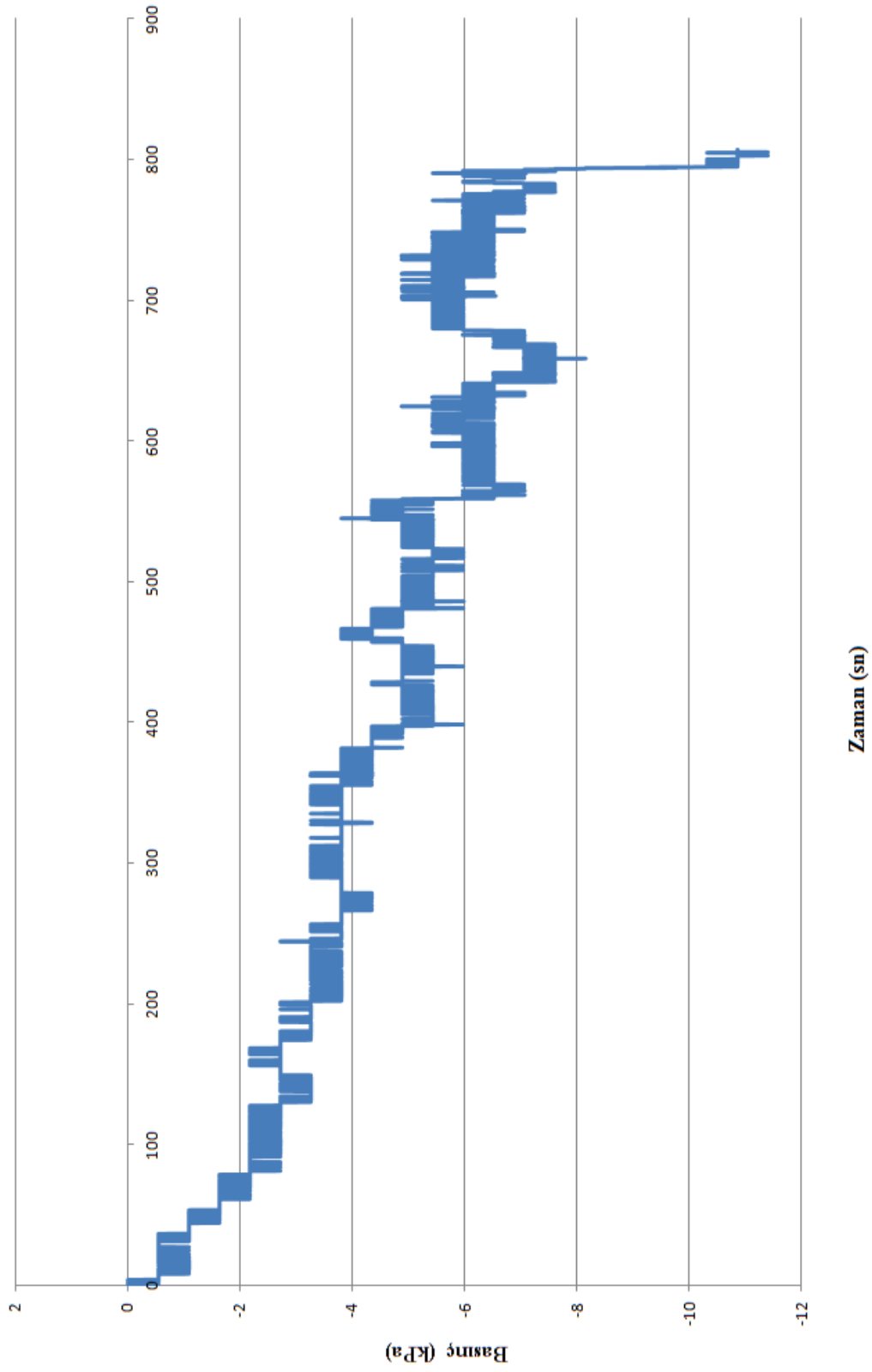
Zaman (sn)

Ek B29

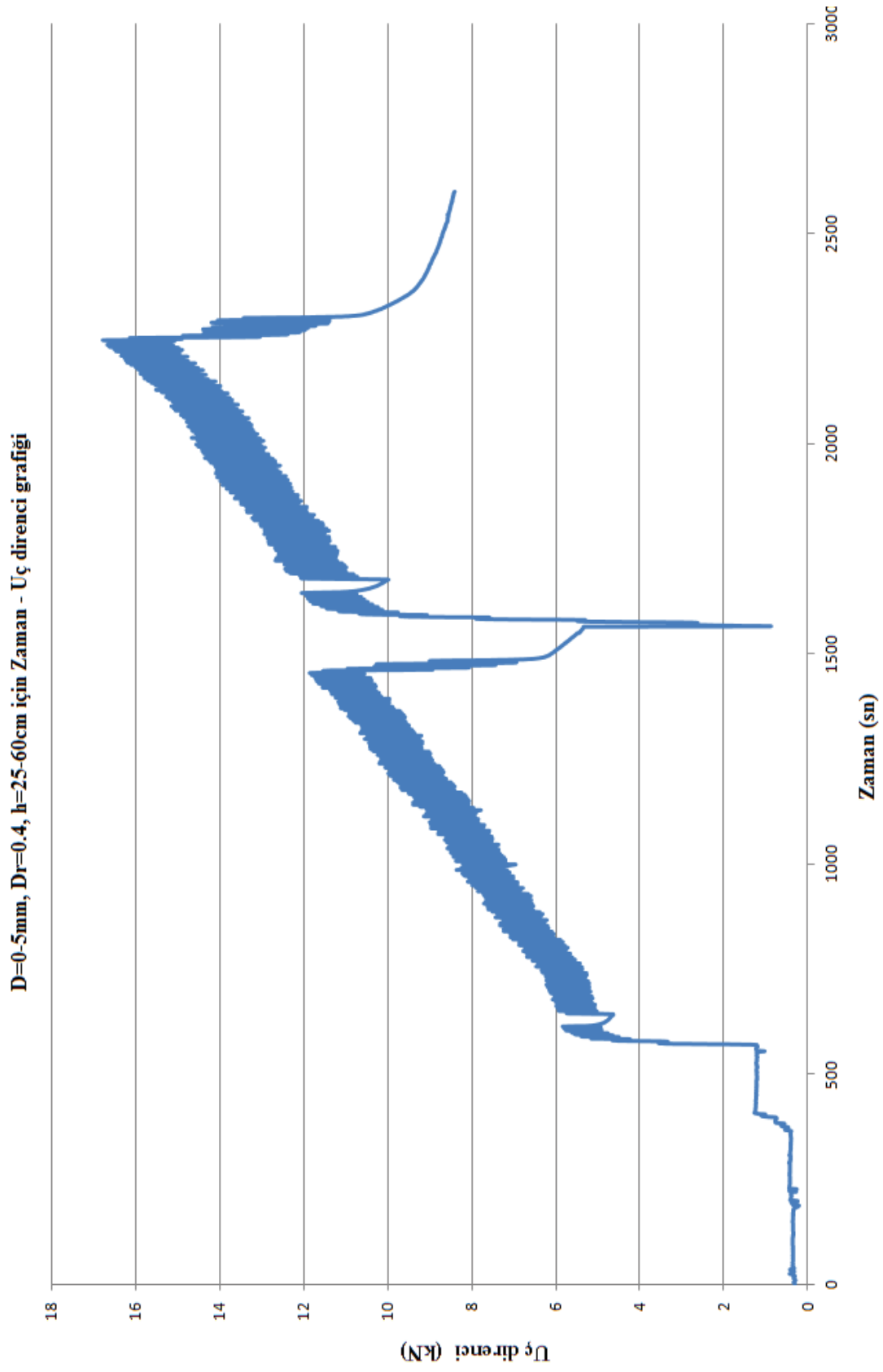
D=0-5mm, $D_r=0.4$, $h=0-25$ cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği

Ek B30

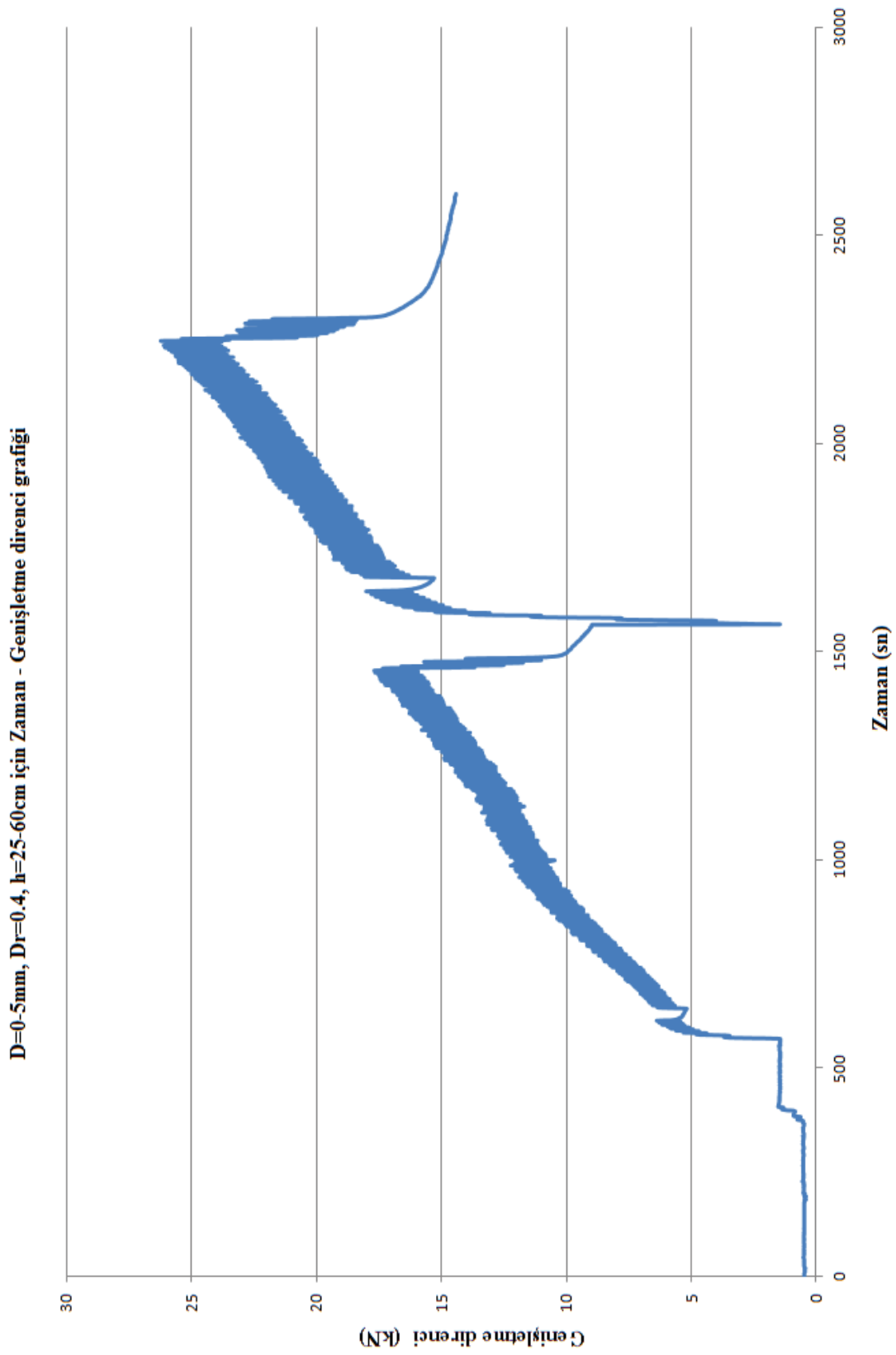
D=0.5mm, Dr=0.4, h=0-25cm için Zaman - Üst ceket çevre basıncı grafiği



Ek B31

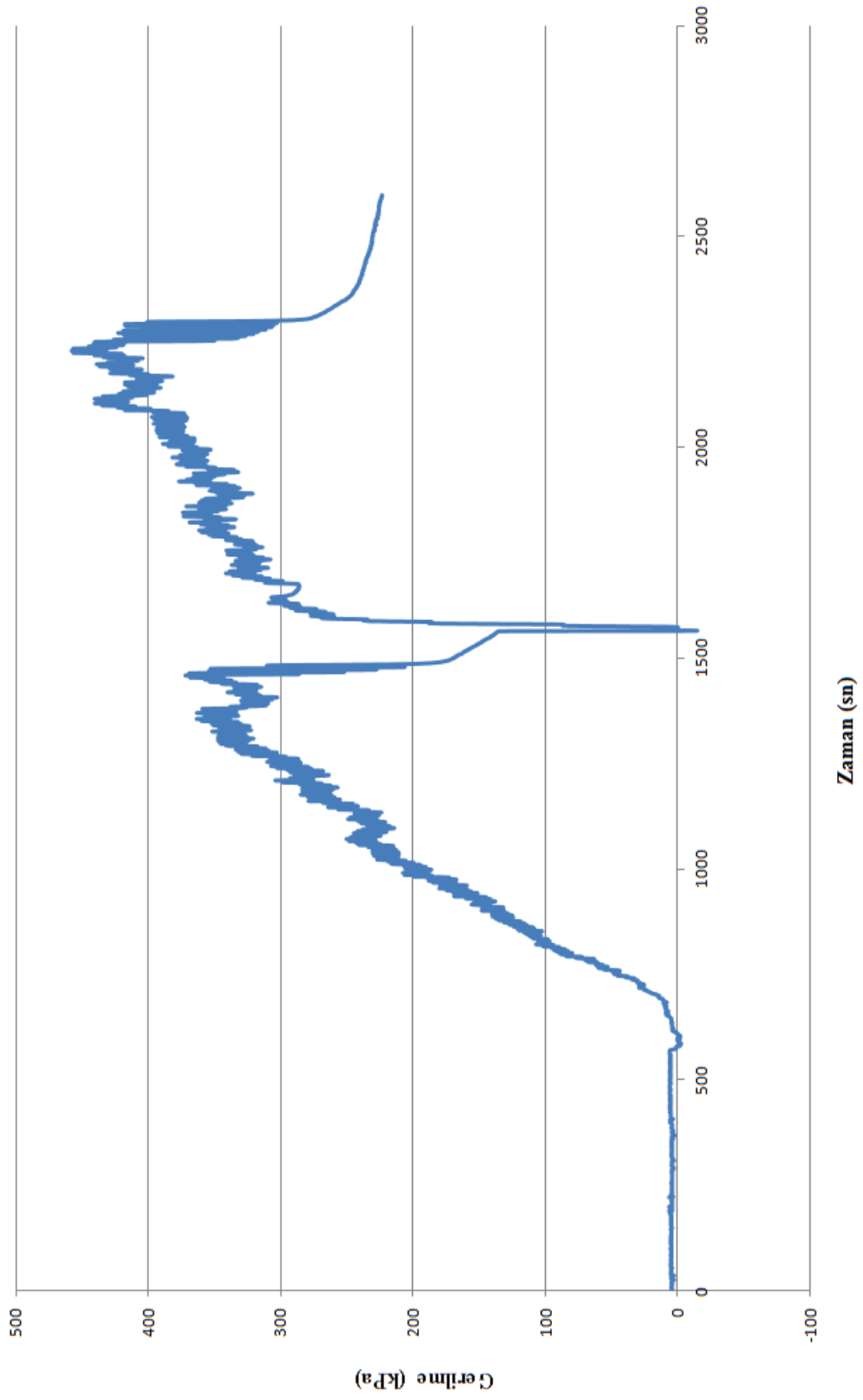


Ek B32



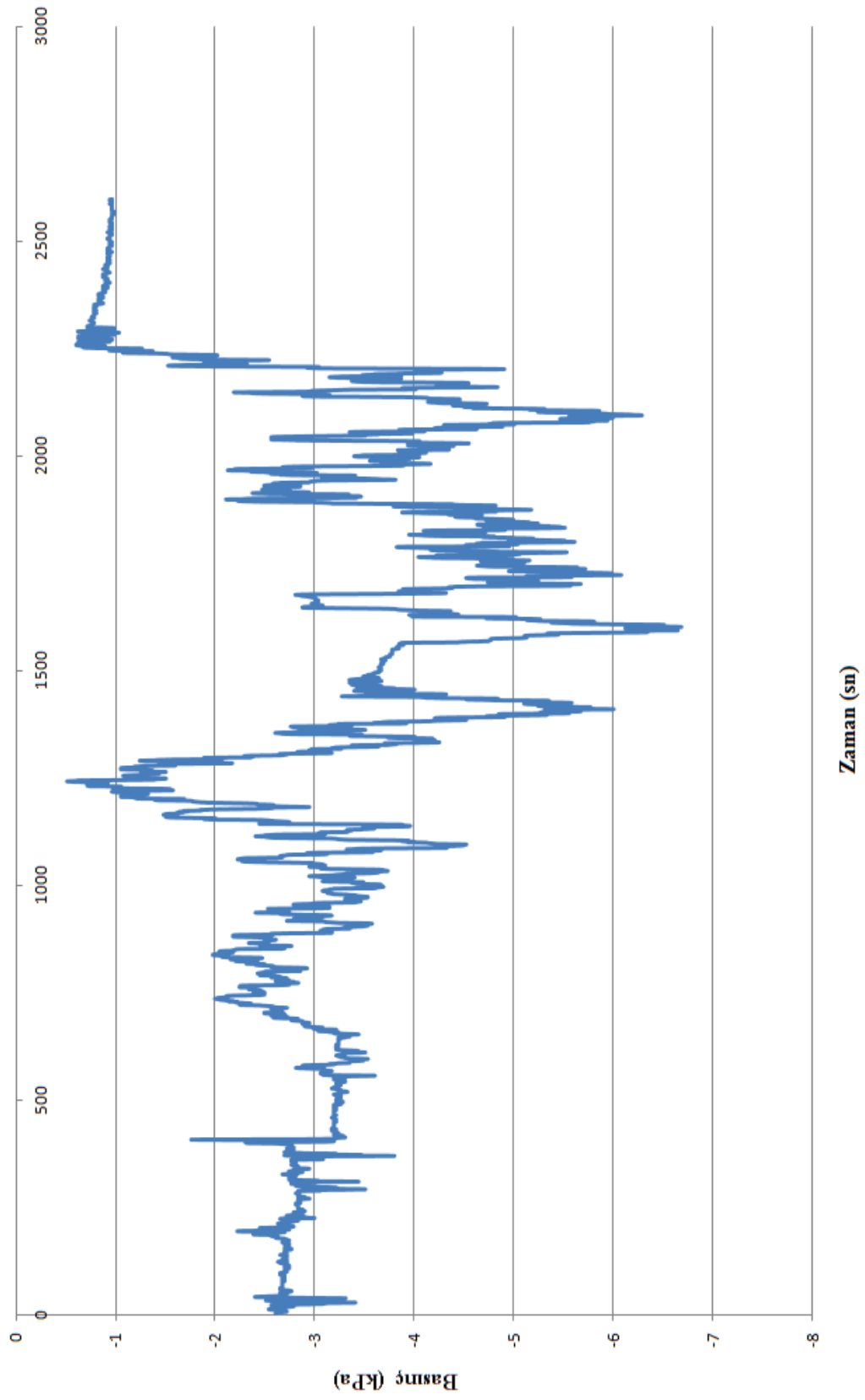
Ek B33

D=0.5mm, Dr=0.4, h=25-60cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

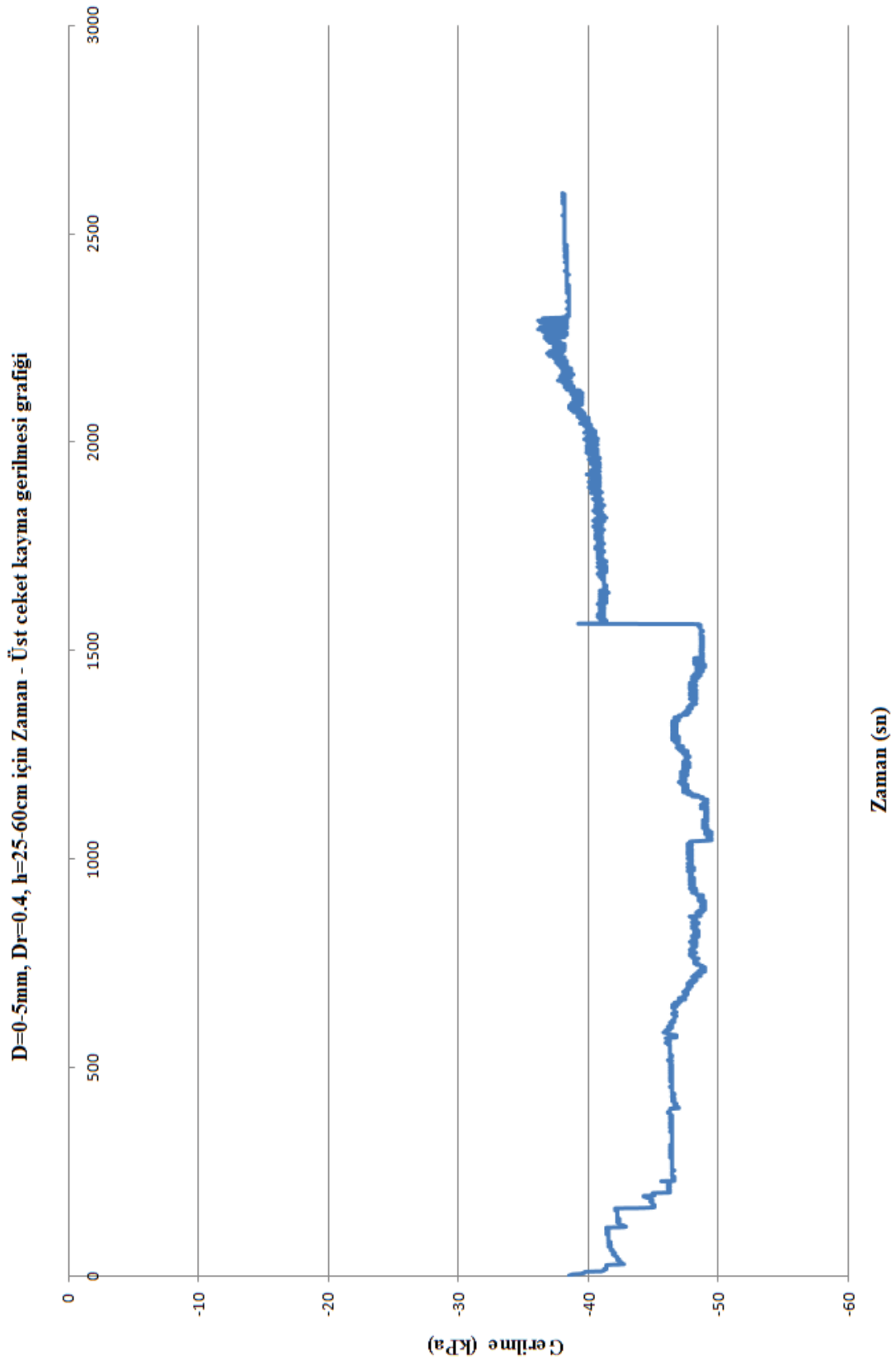


Ek B34

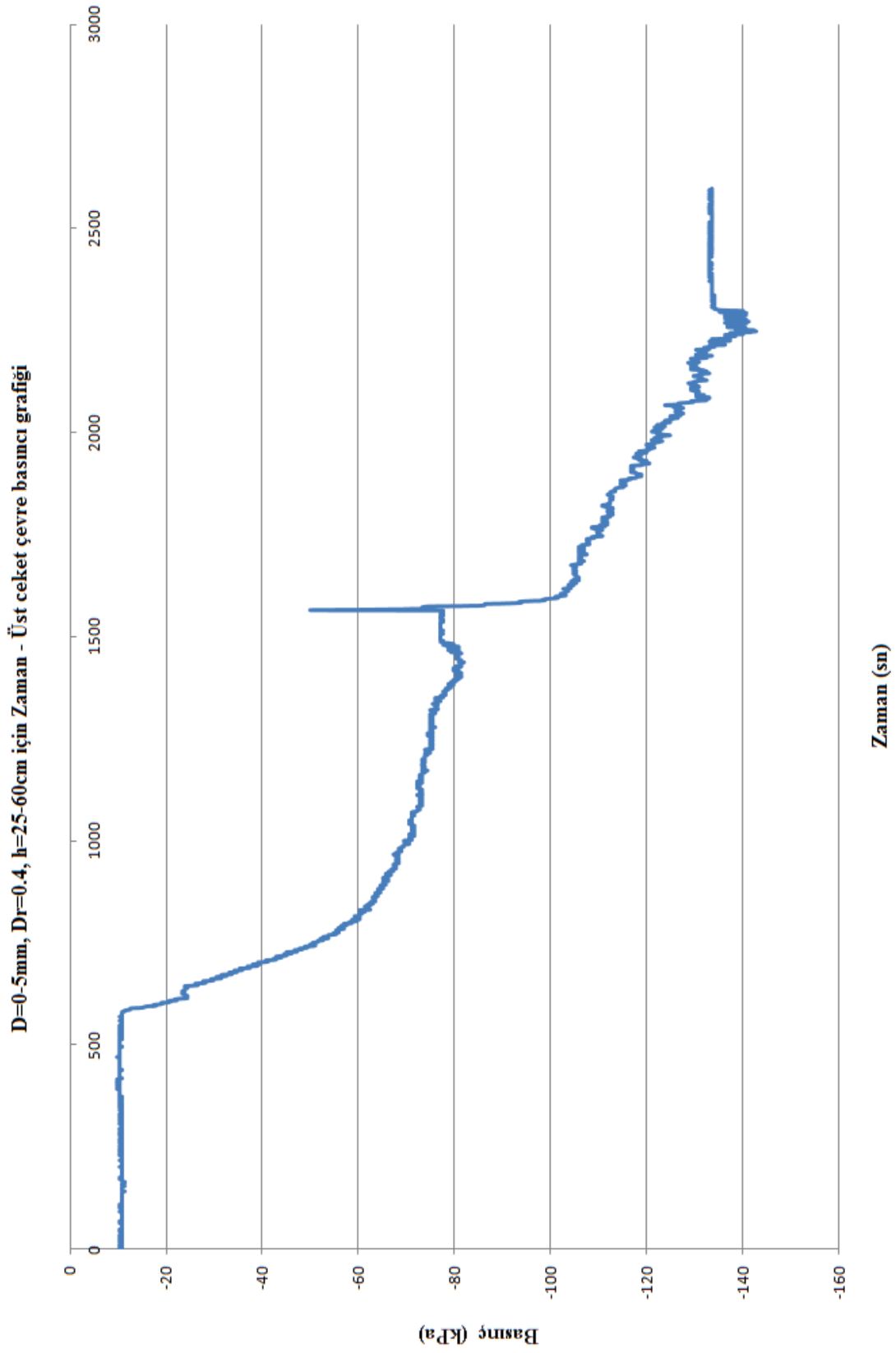
D=0-5mm, Dr=0.4, h=25-60cm için Zaman - Alt çeket çevre basıncı grafiği



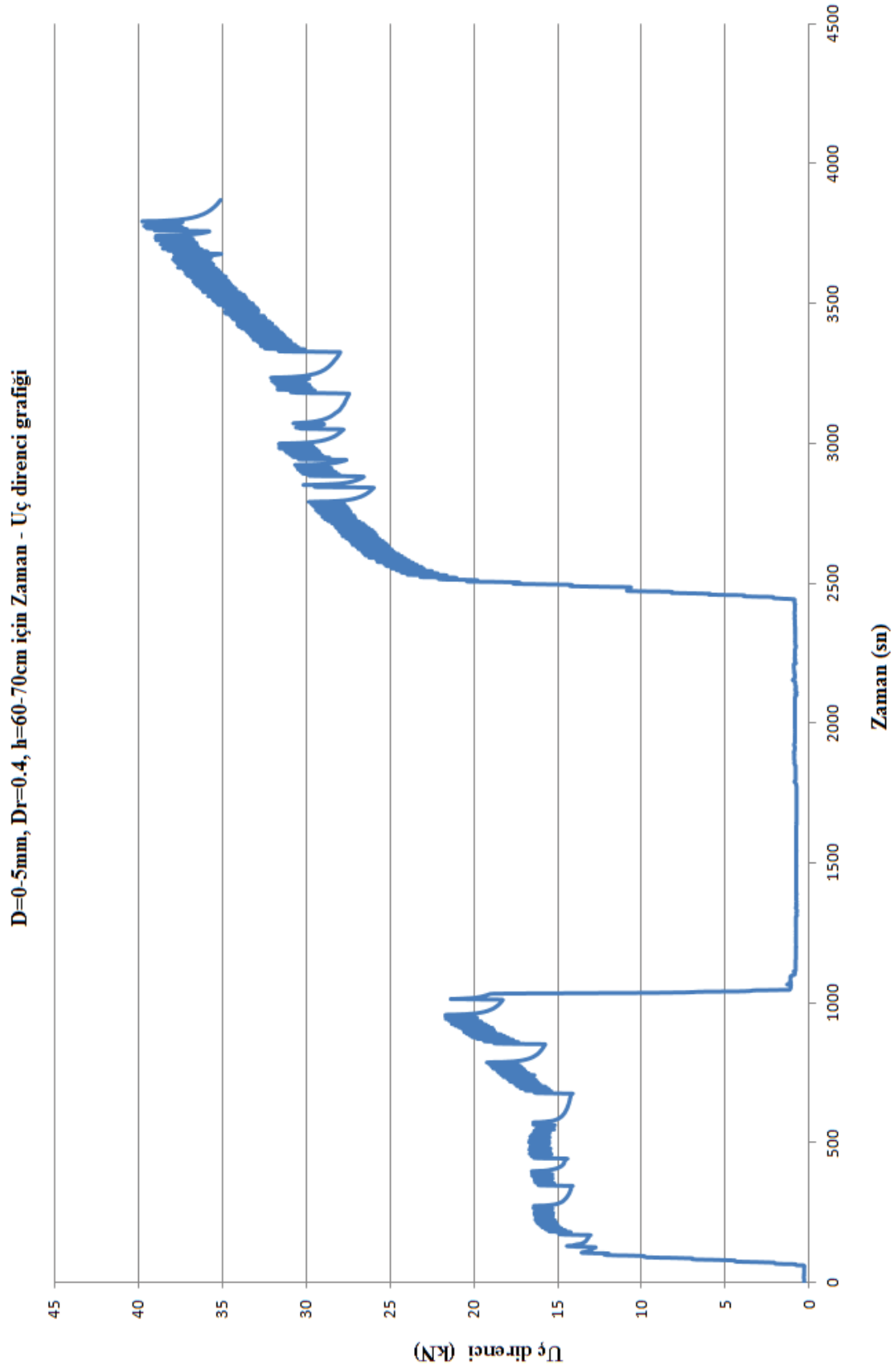
Ek B35



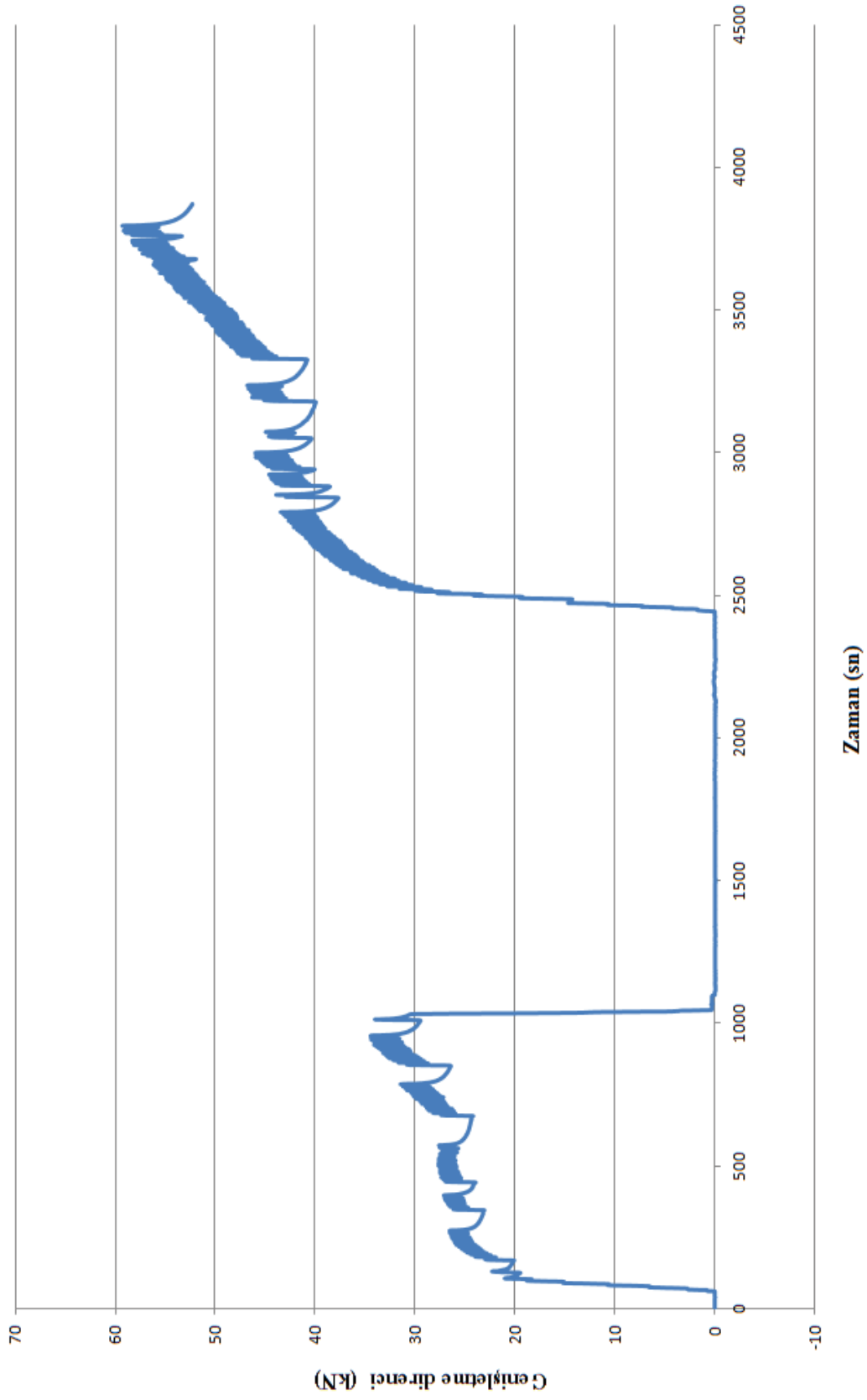
Ek B36



Ek B37

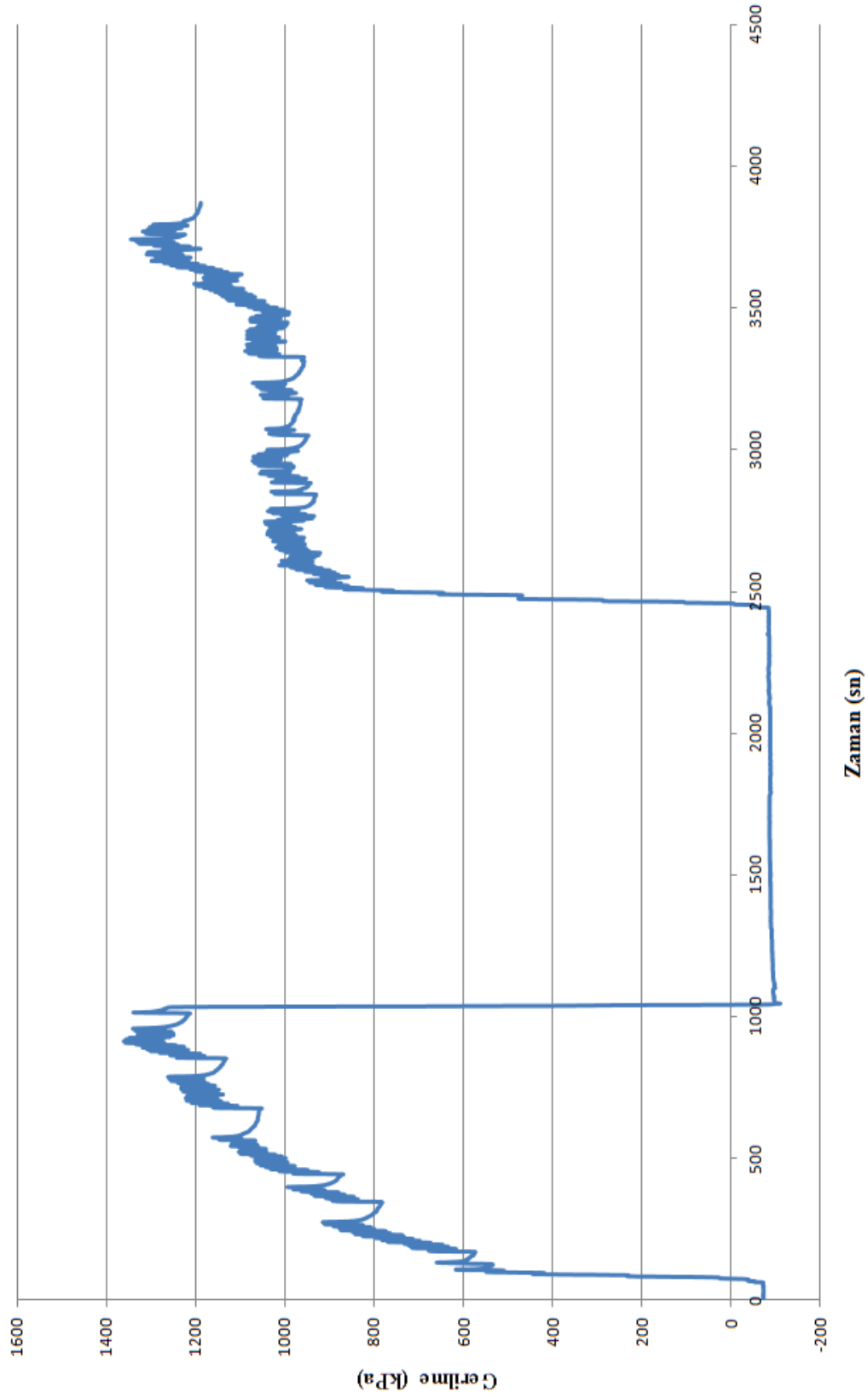


Ek B38

D=0-5mm, $D_r=0.4$, h=60-70cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği

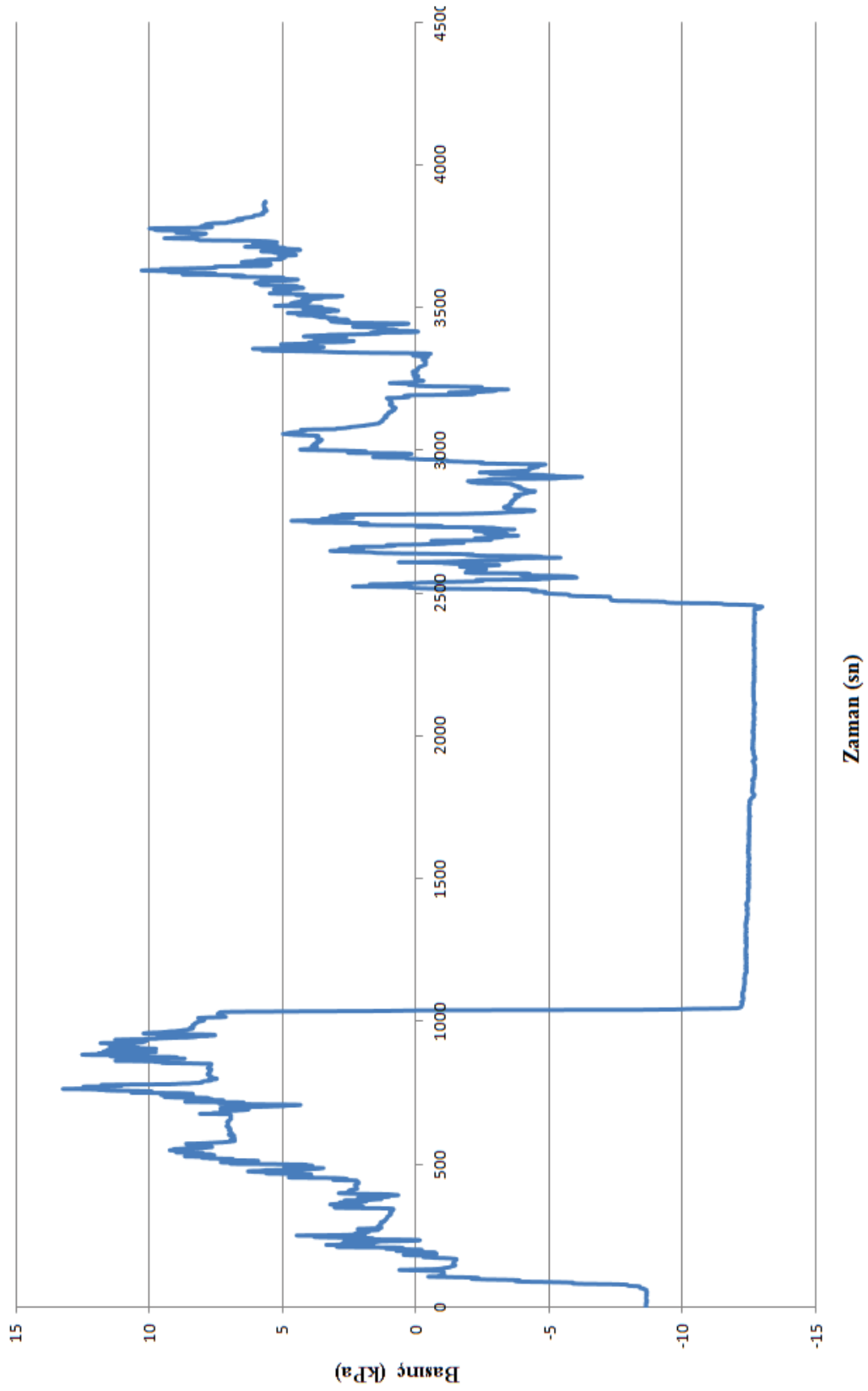
Ek B39

D=0-5mm, $D_r=0.4$, h=60-70cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği



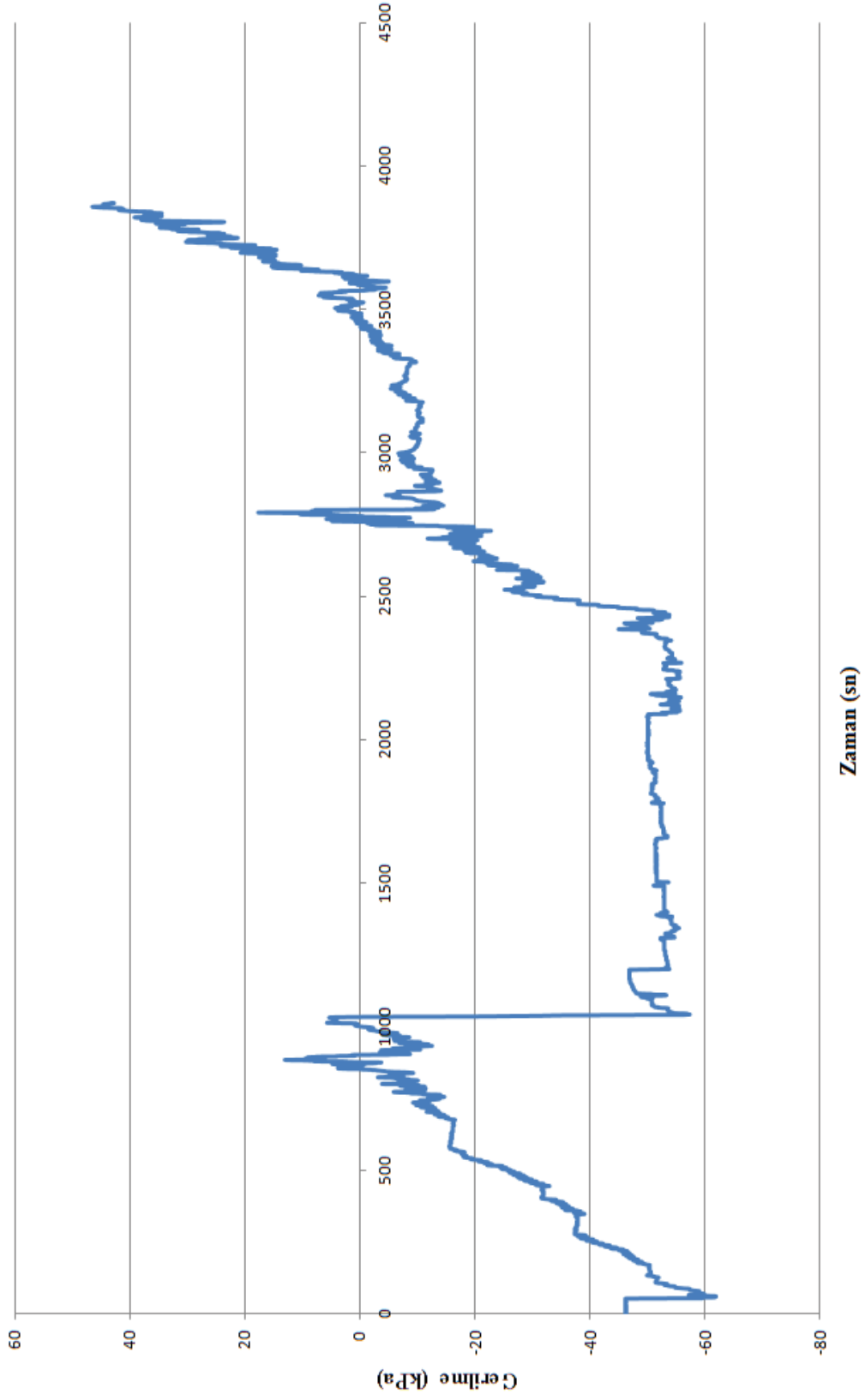
Ek B40

D=0.5mm, Dr=0.4, h=60-70cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

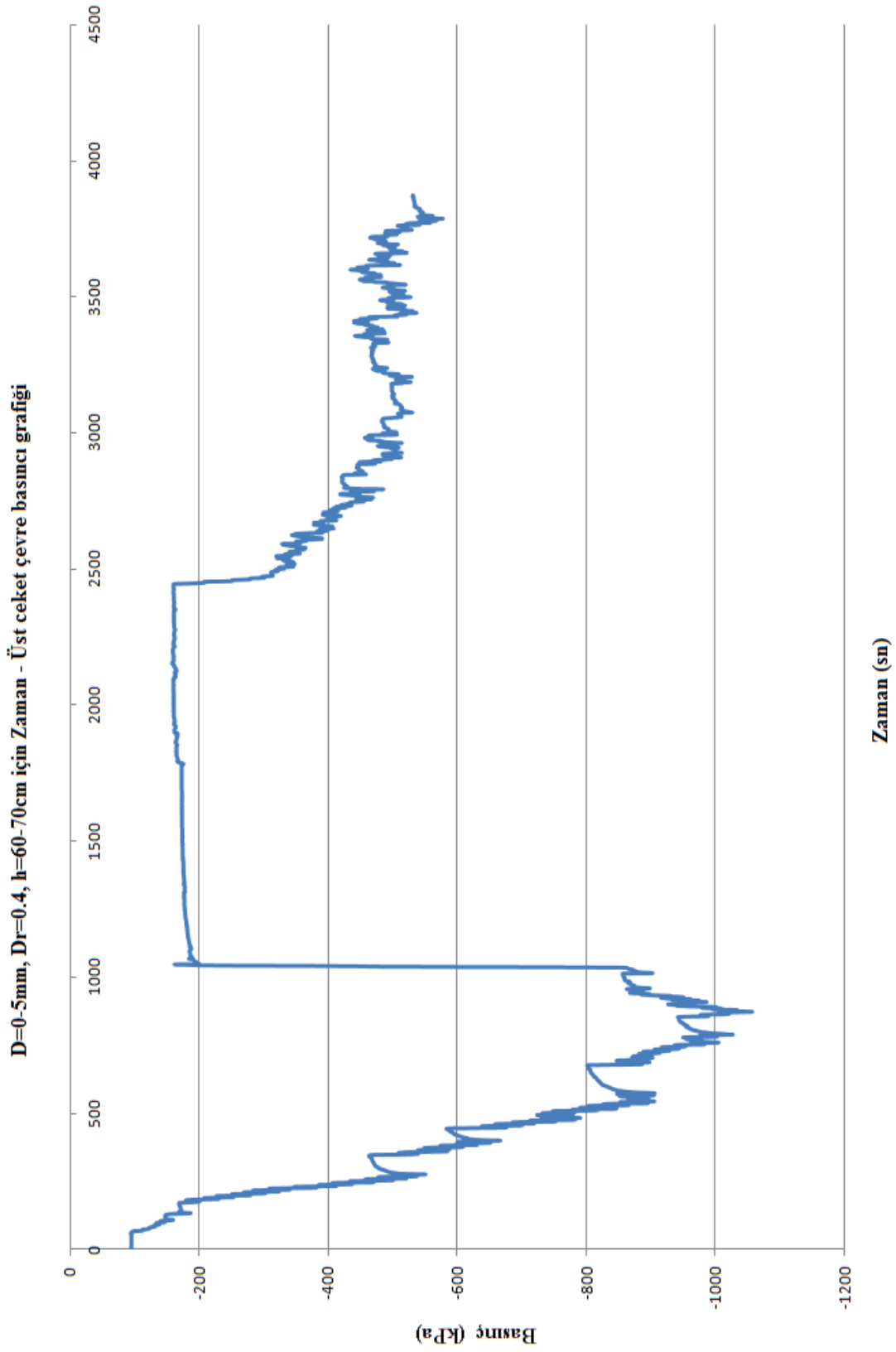


Ek B41

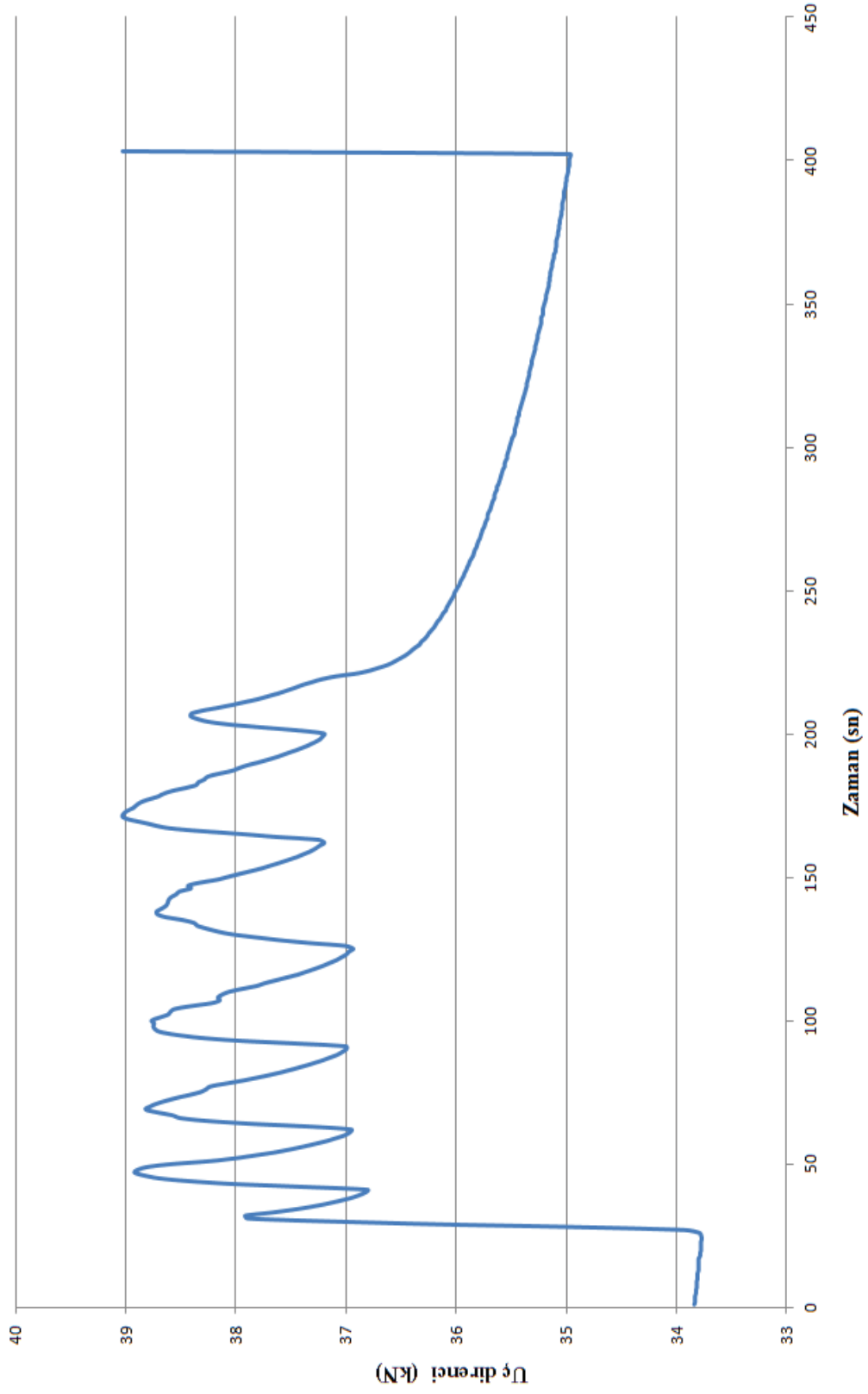
D=0.5mm, Dr=0.4, h=60-70cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği



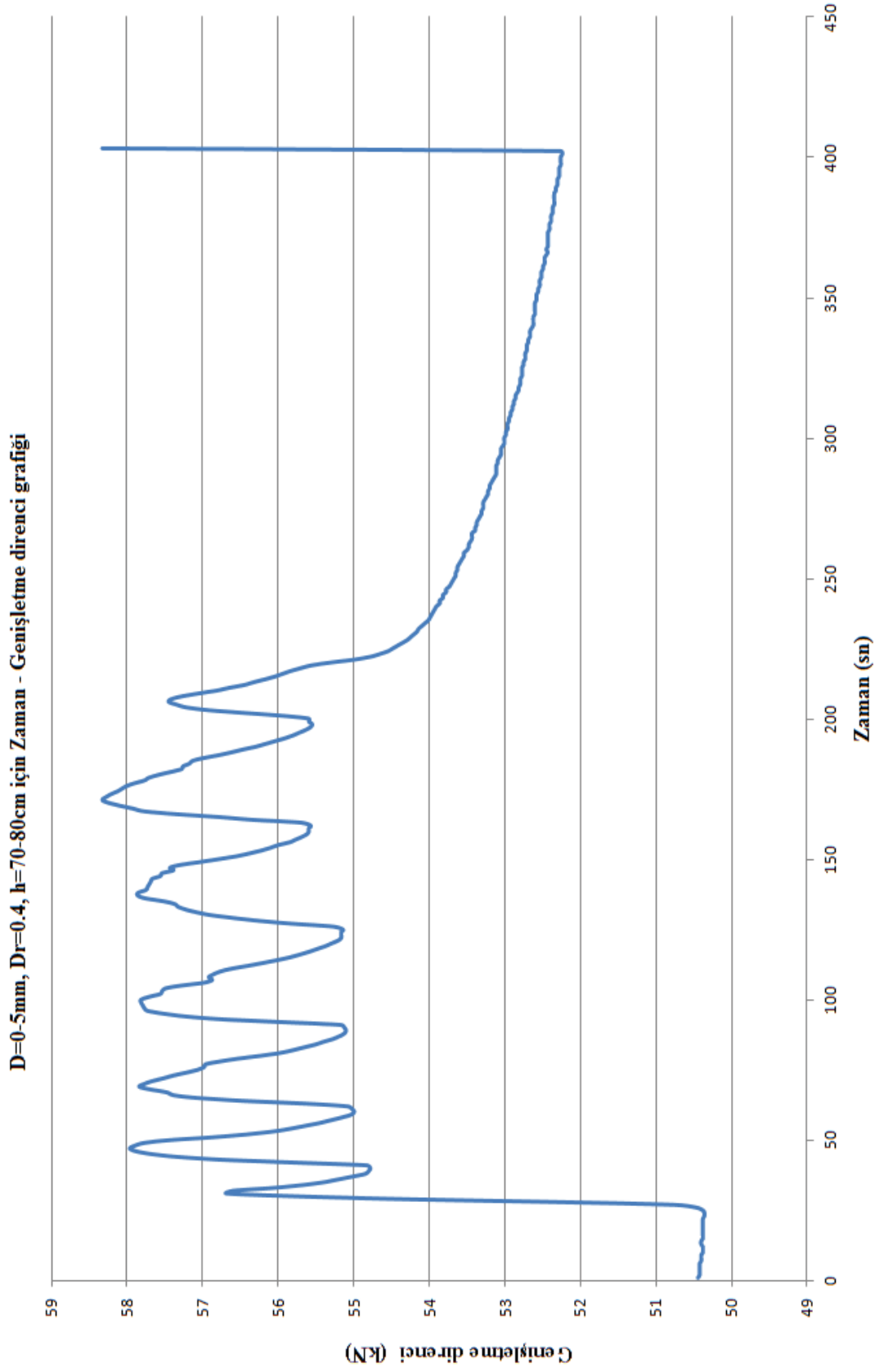
Ek B42



Ek B43

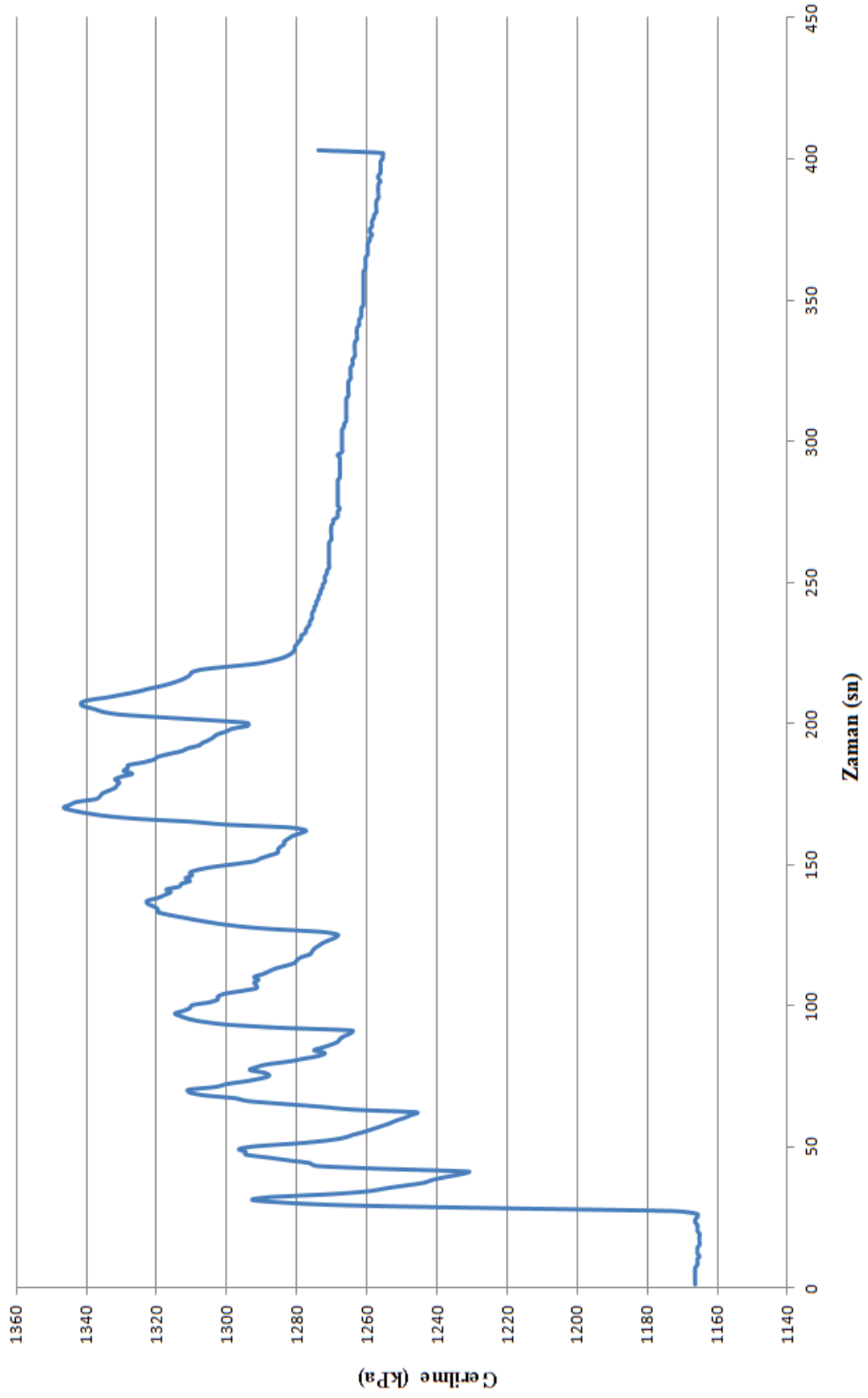
D=0.5mm, Dr=0.4, h=70-80cm için Zaman - Uç direnci grafiği

Ek B44



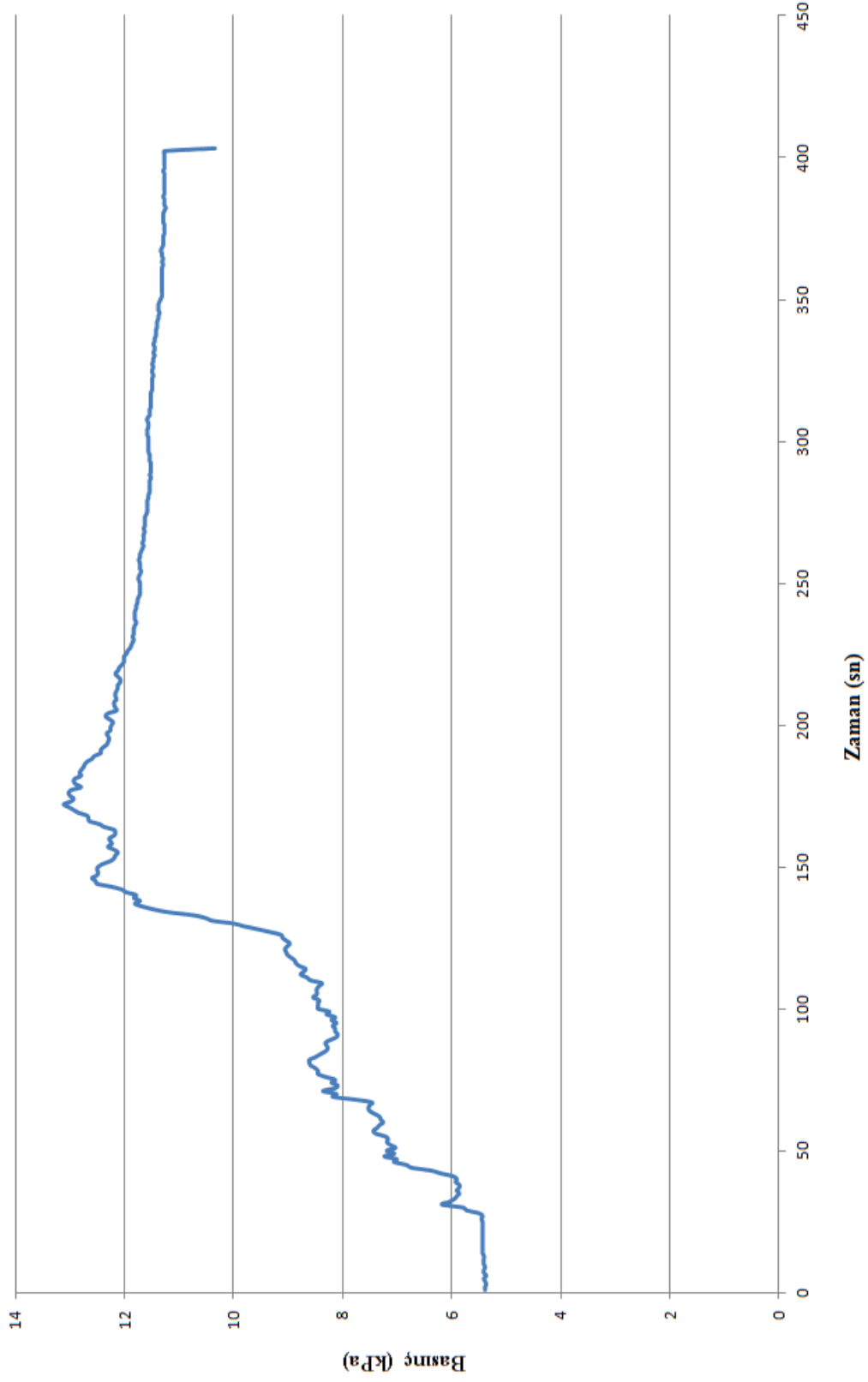
Ek B45

D=0.5mm, Dr=0.4, h=70-80cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği



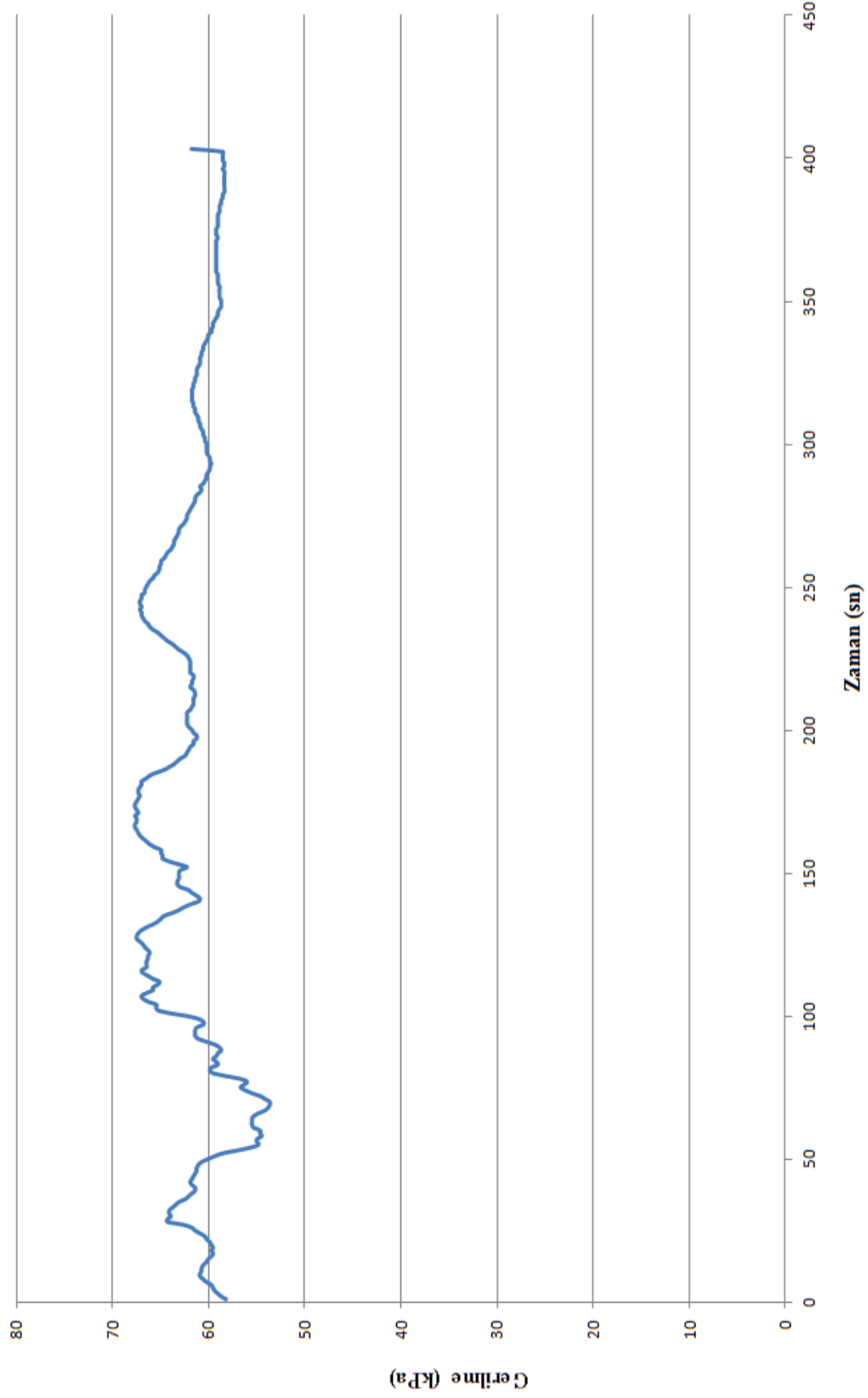
Ek B46

D=0.5mm, Dr=0.4, h=70-80cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği



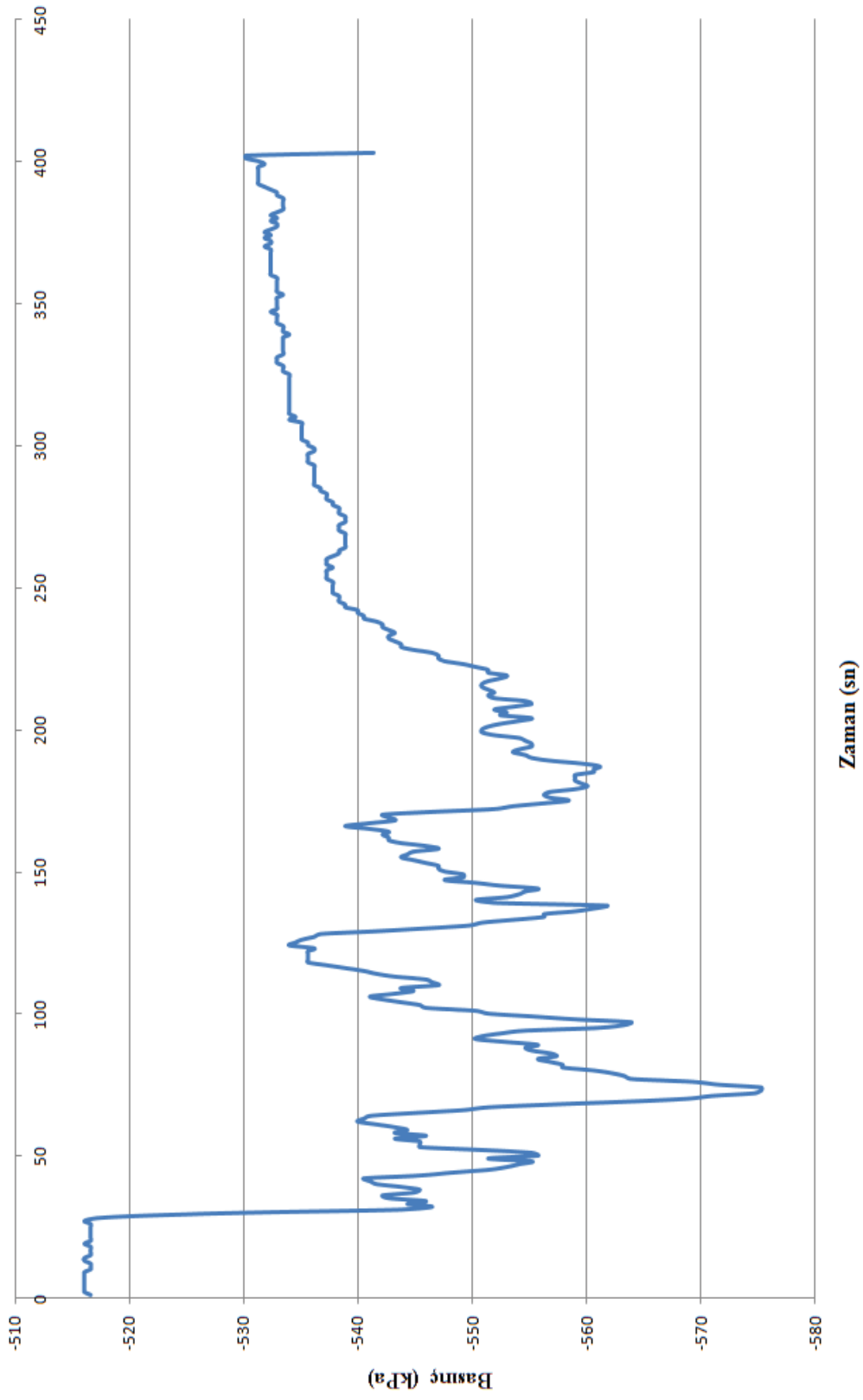
Ek B47

D=0.5mm, Dr=0.4, h=70-80cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği

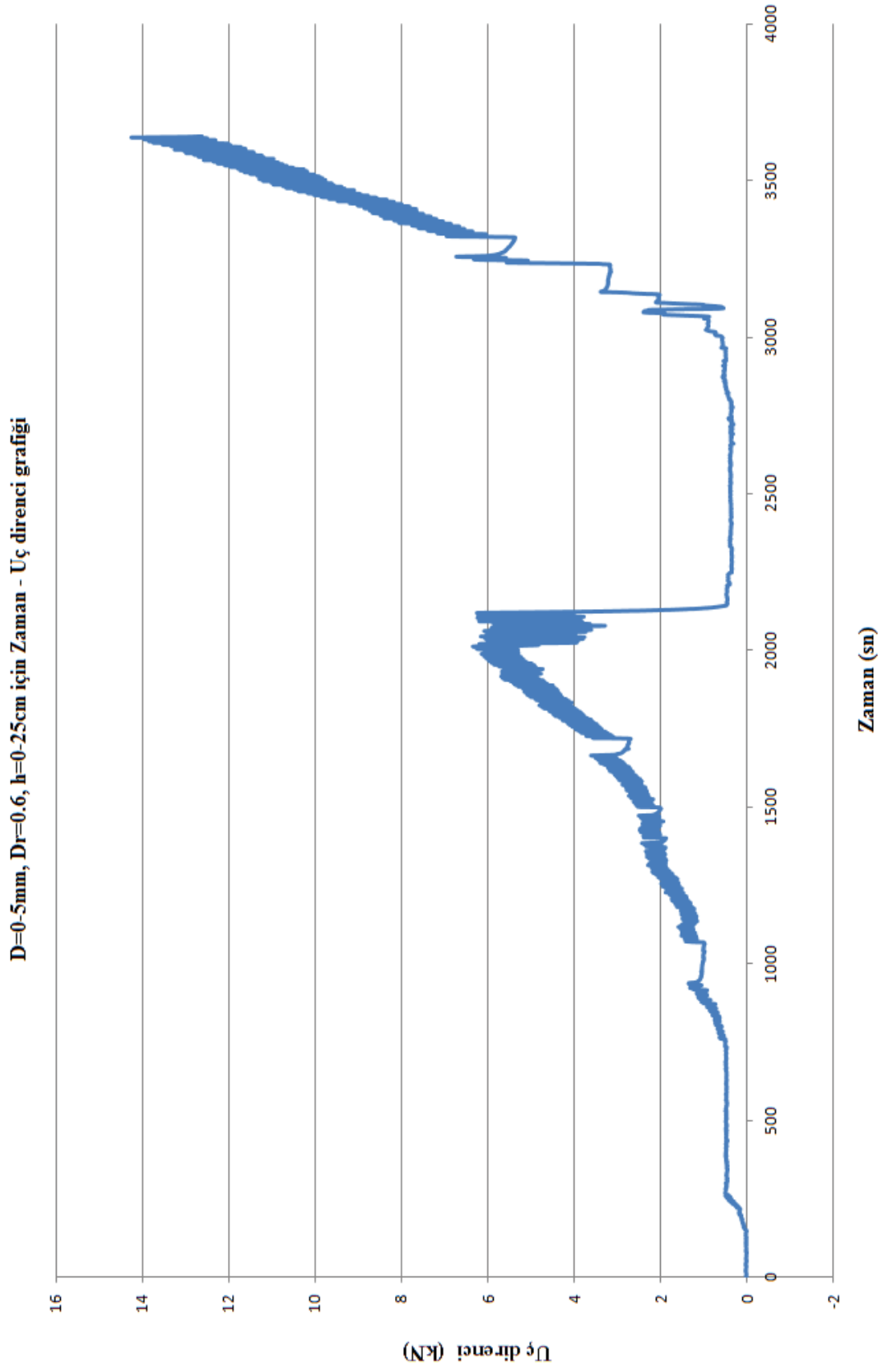


Ek B48

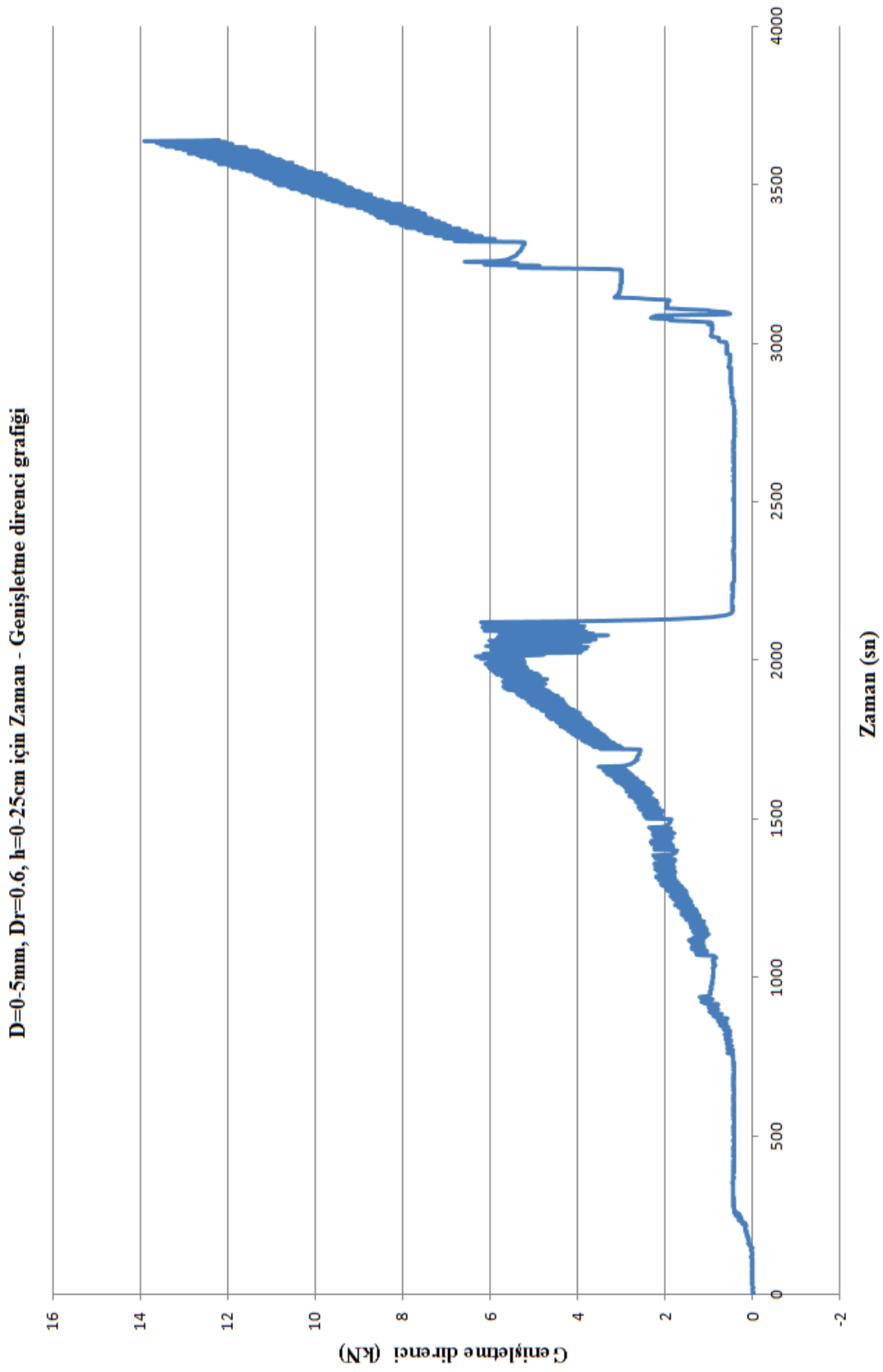
D=0.5mm, Dr=0.4, h=70-80cm için Zaman - Üst çeket çevre basıncı grafiği



Ek B49

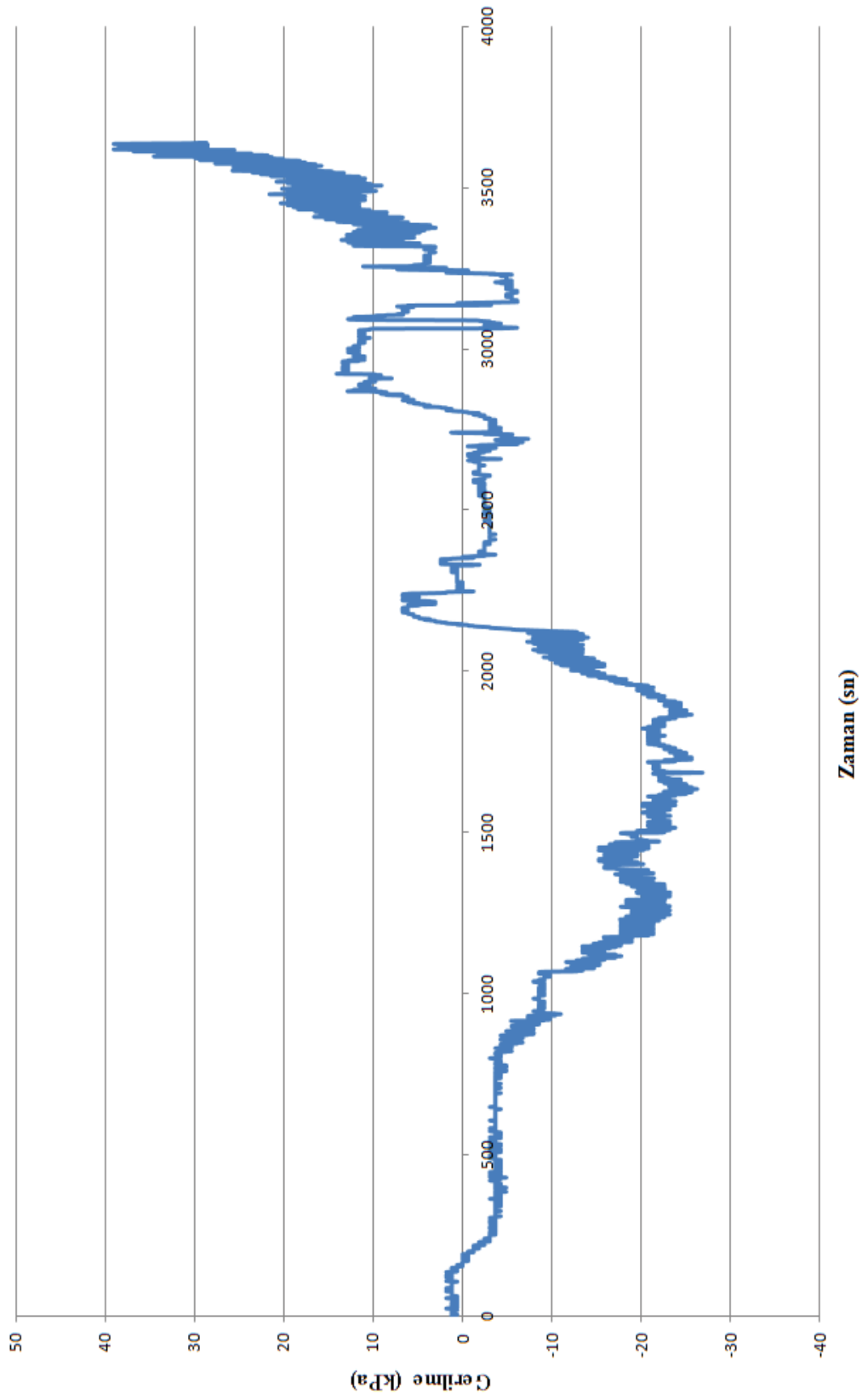


Ek B50

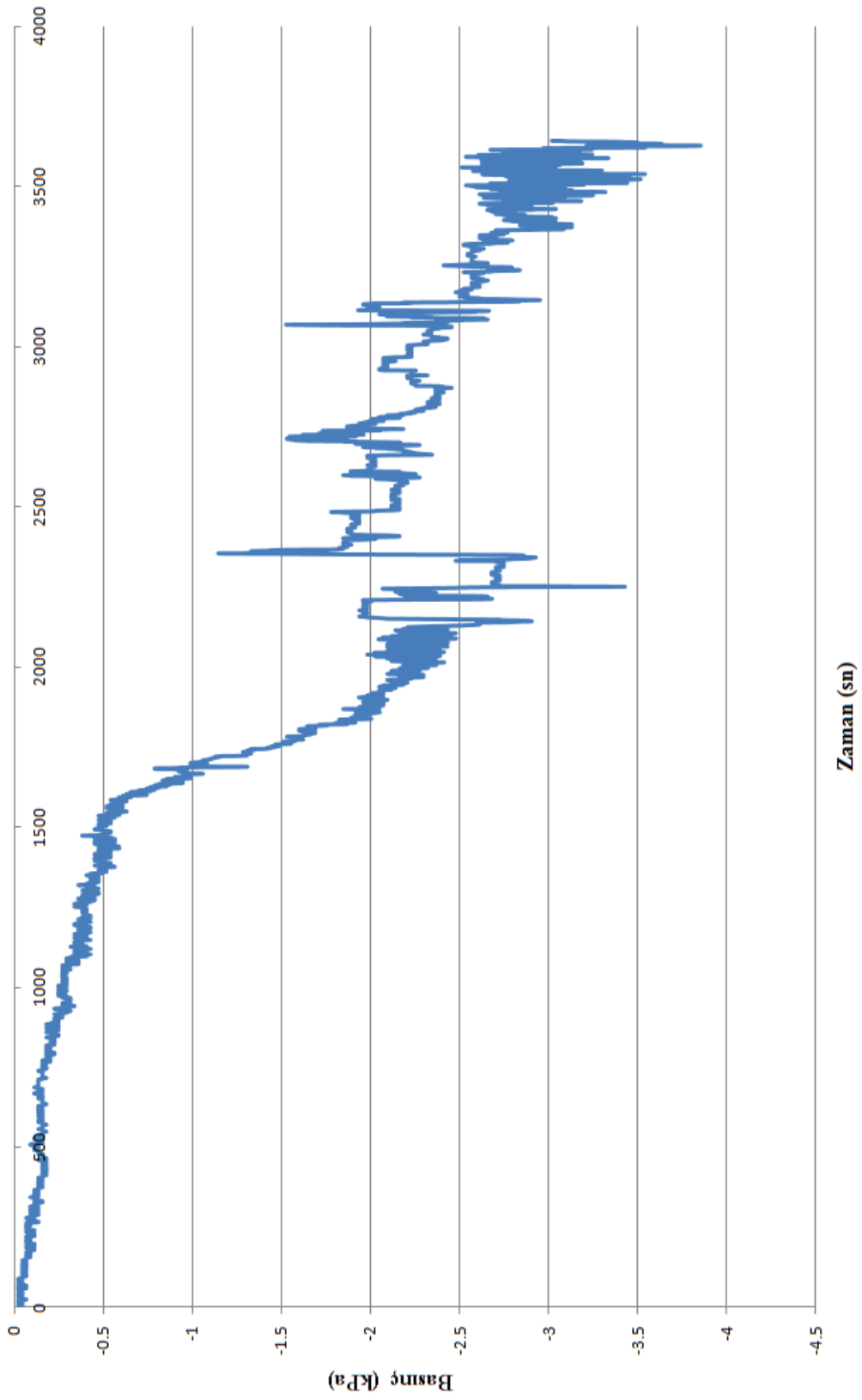


Ek B51

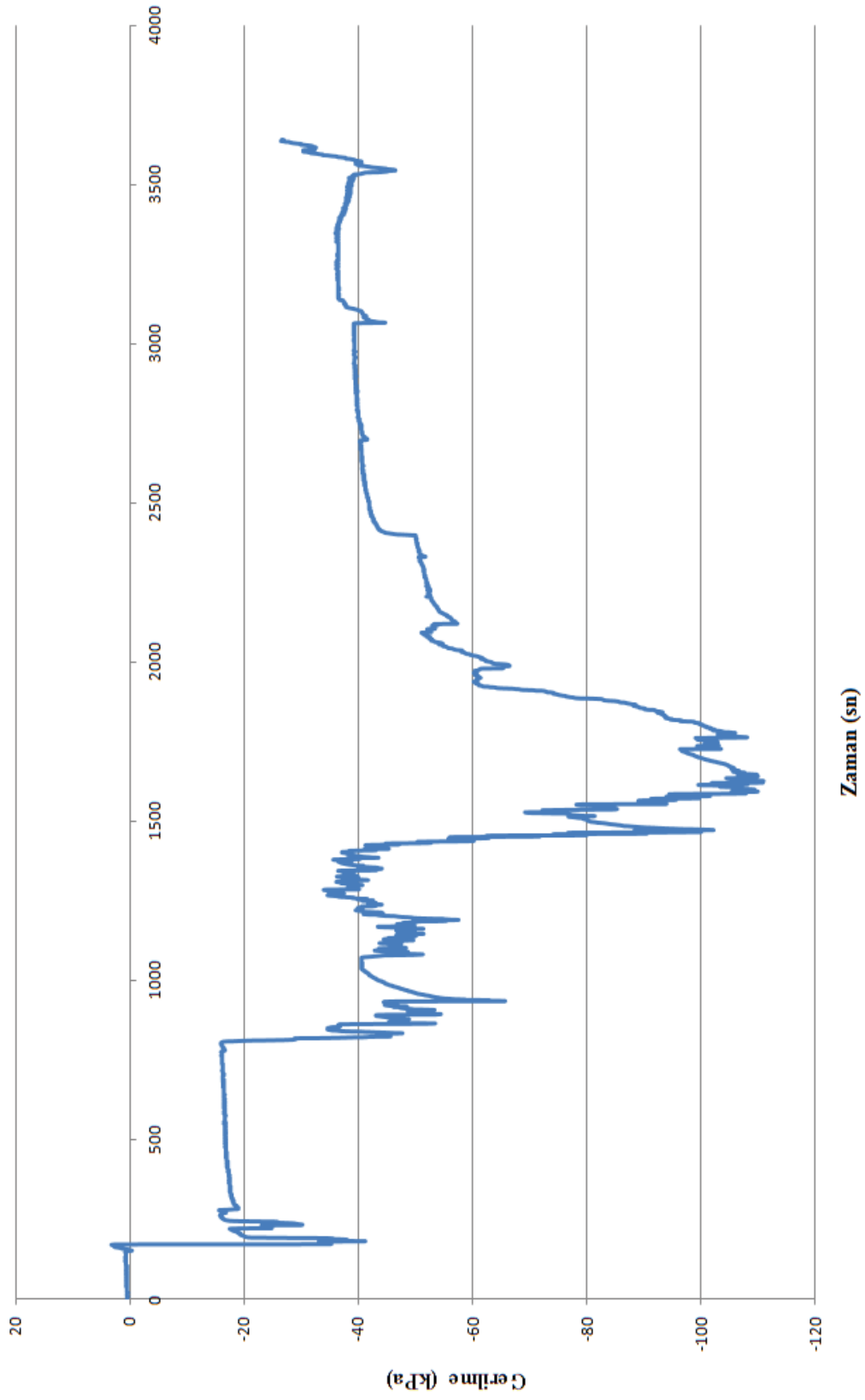
D=0.5mm, Dr=0.6, h=0.25cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği



Ek B52

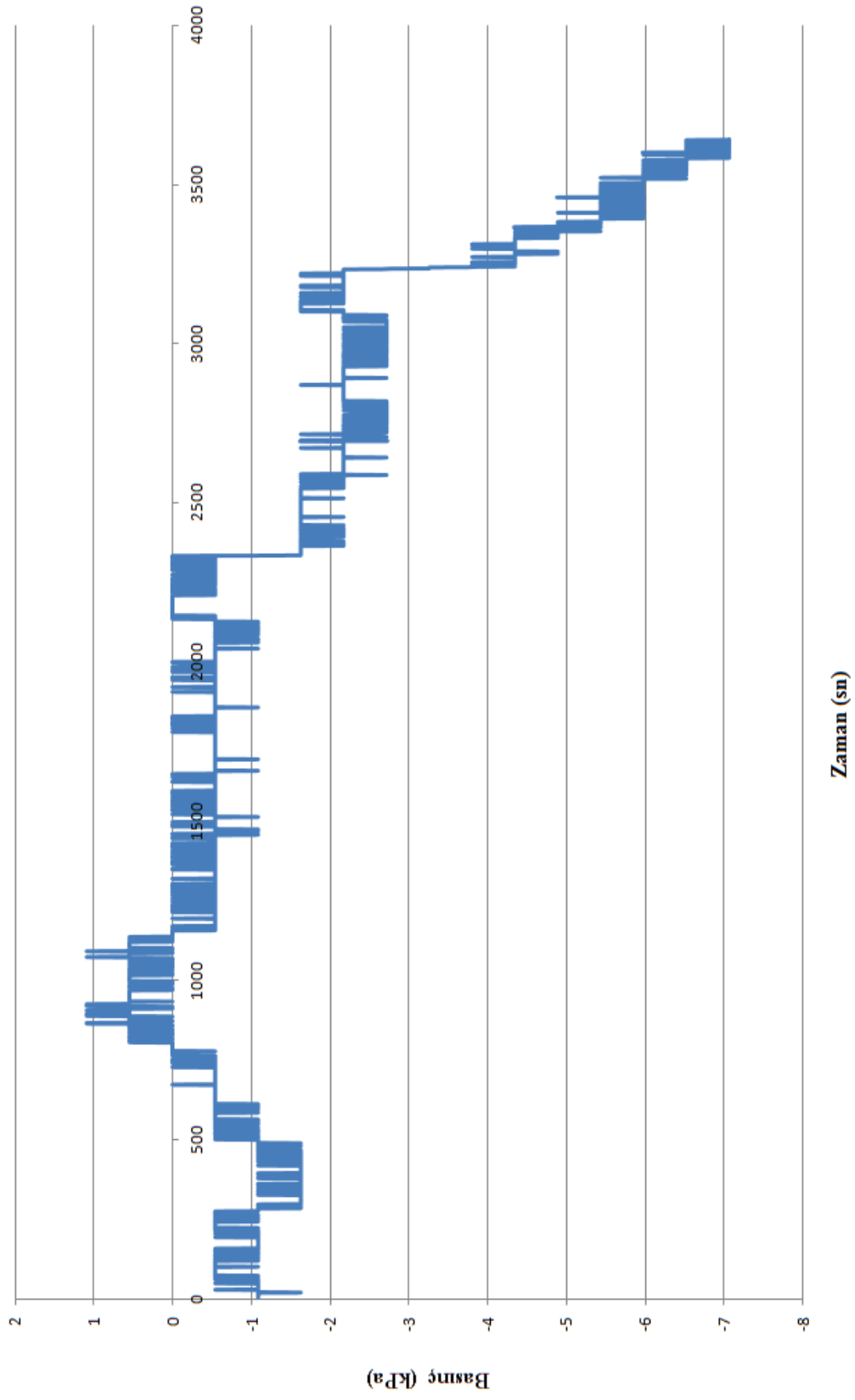
D=0-5mm, Dr=0.6, h=0-25cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

Ek B53

D=0-5mm, $D_r=0.6$, h=0-25cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği

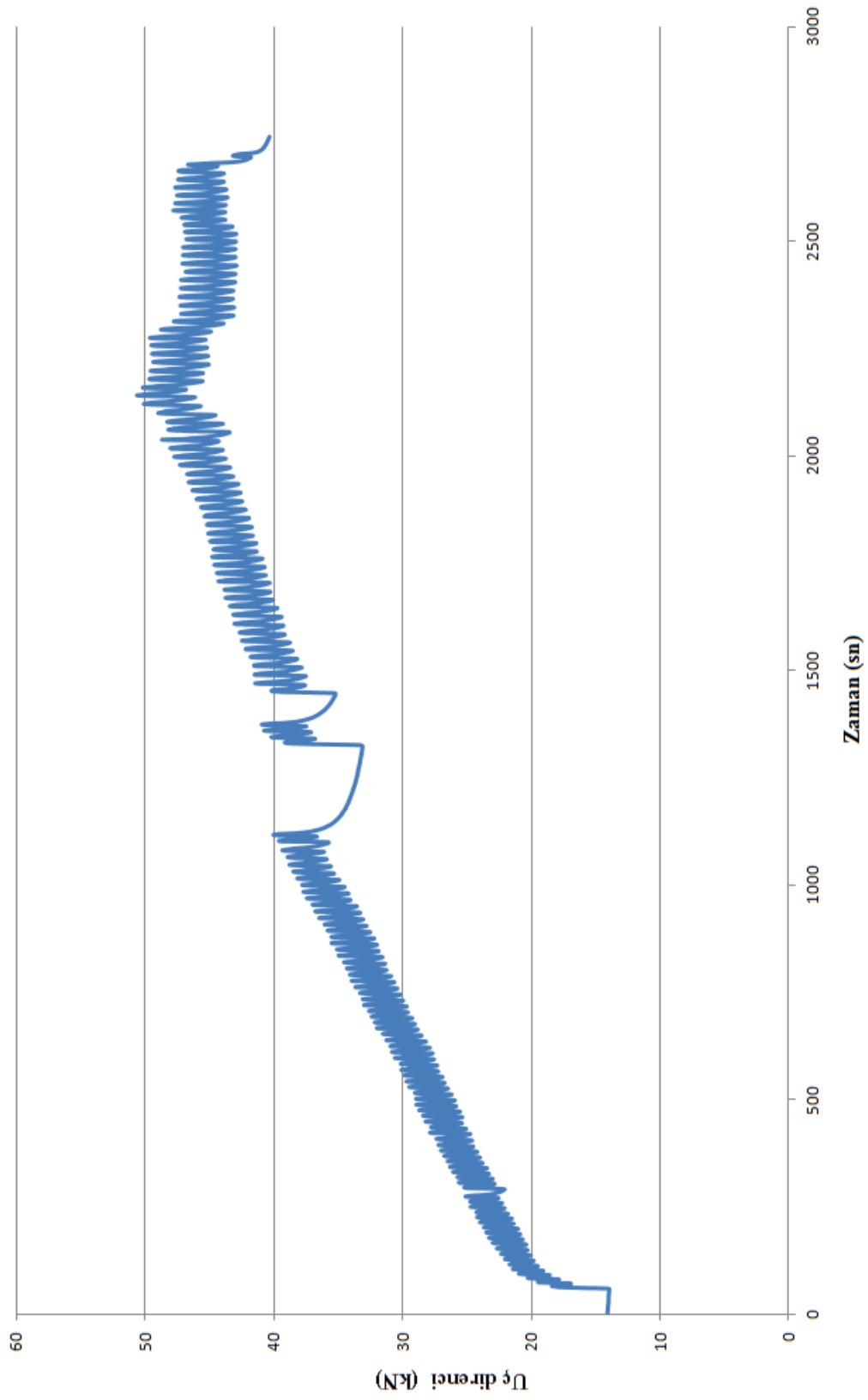
Ek B54

D=0-5mm, Dr=0.6, h=0-25cm için Zaman - Üst çeket çevre basıncı grafiği

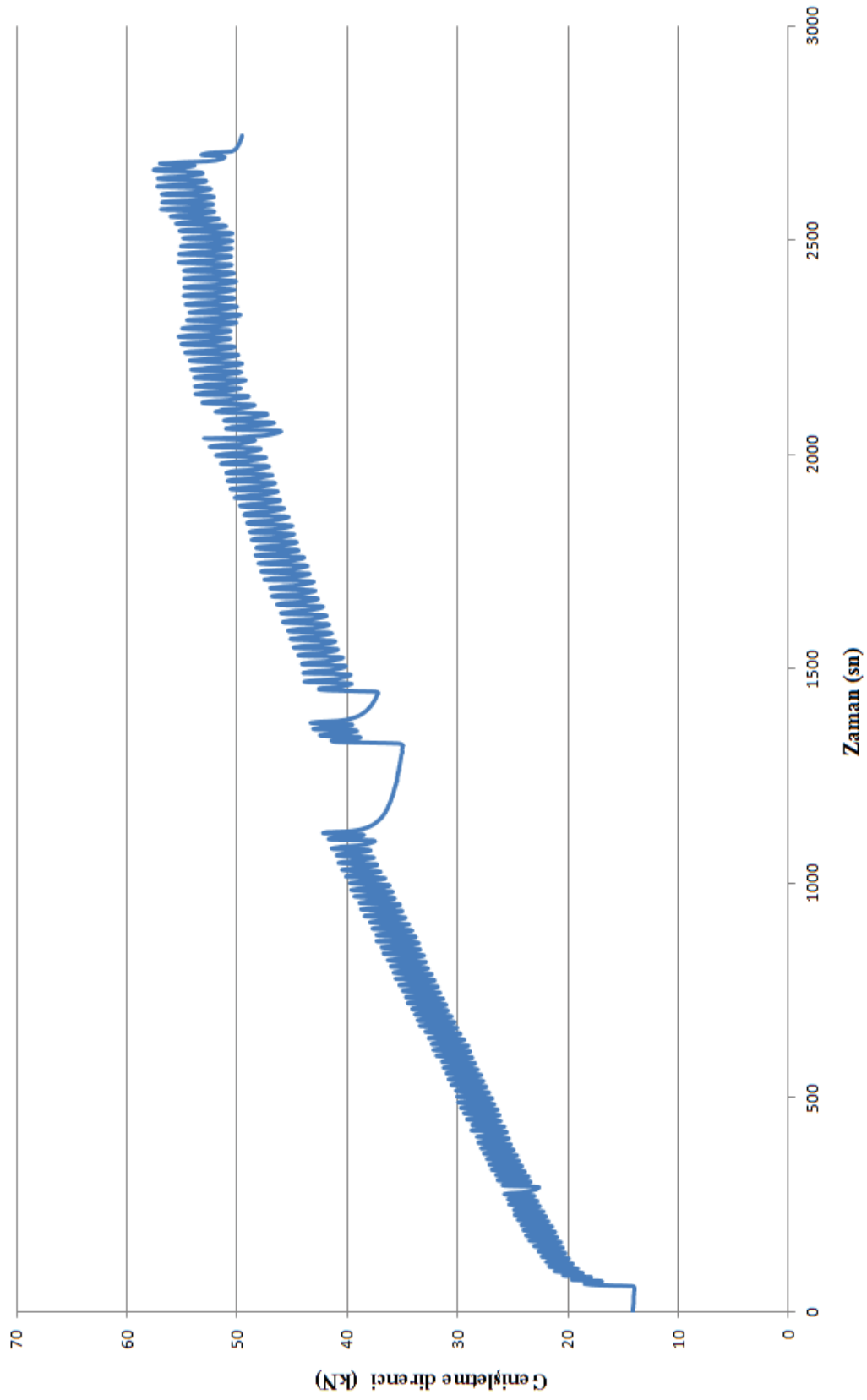


Ek B55

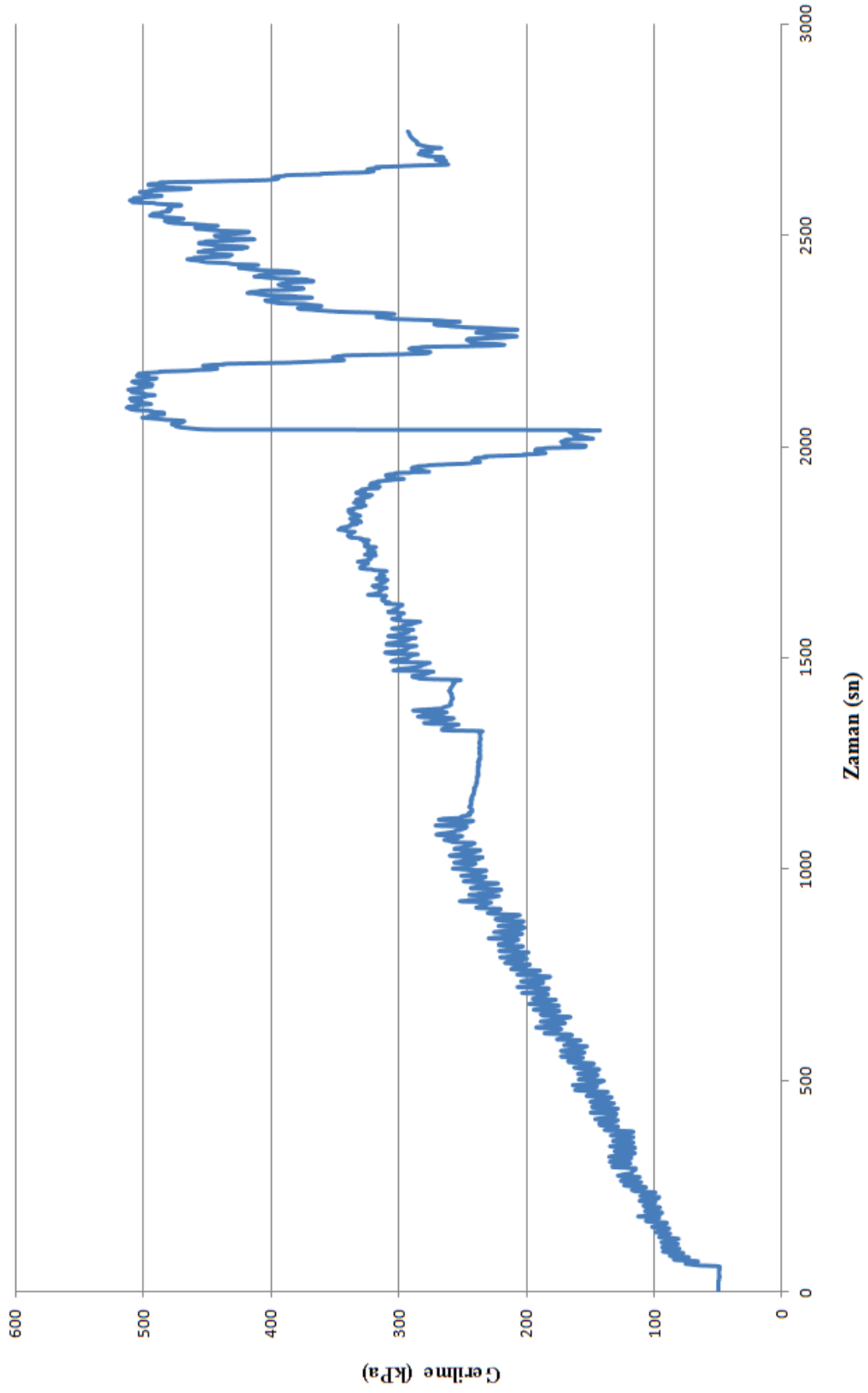
D=0.5mm, Dr=0.6, h=25-60cm için Zaman - Uç direnci grafiği



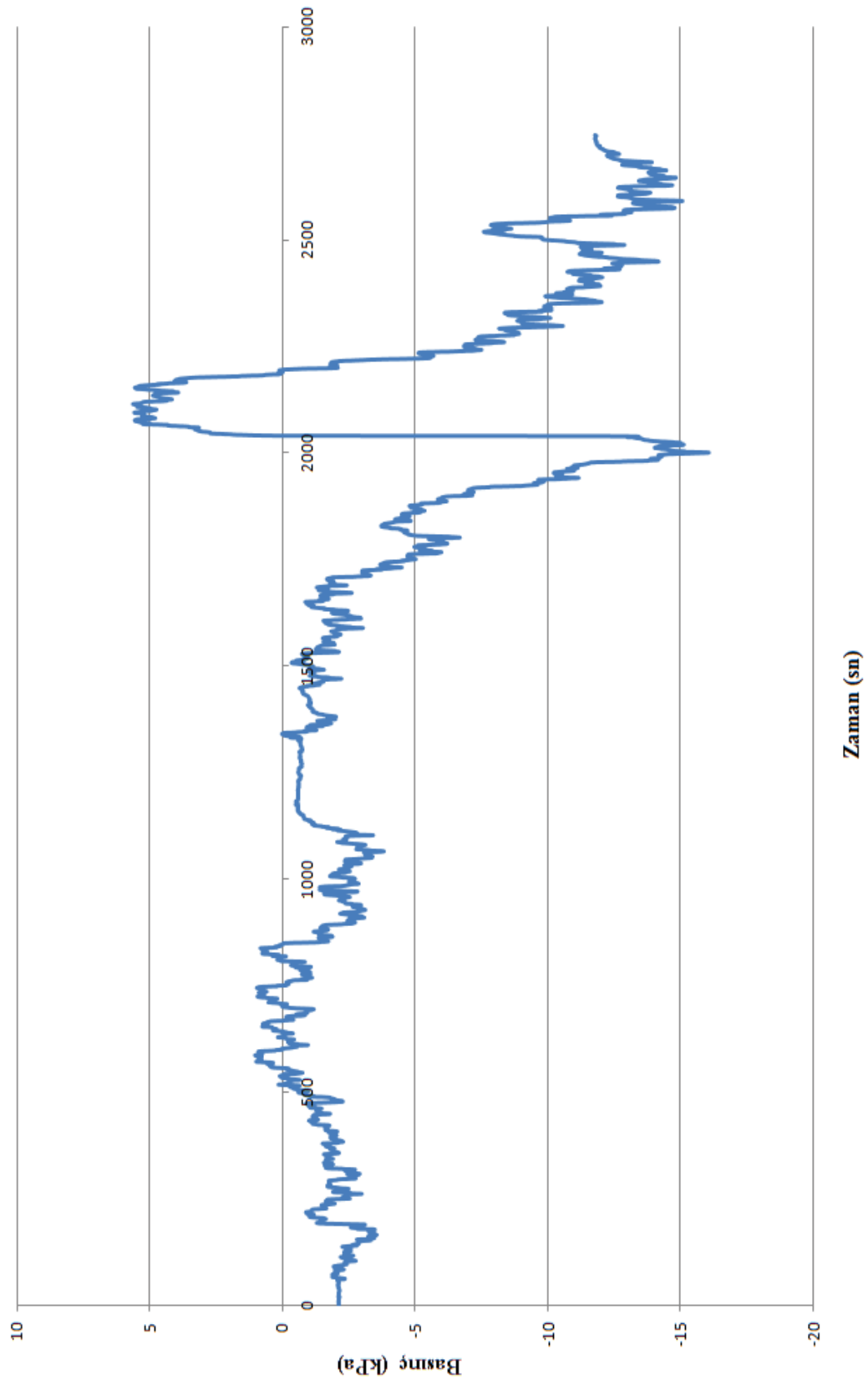
Ek B56

D=0-5mm, $D_r=0.6$, h=25-60cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği

Ek B57

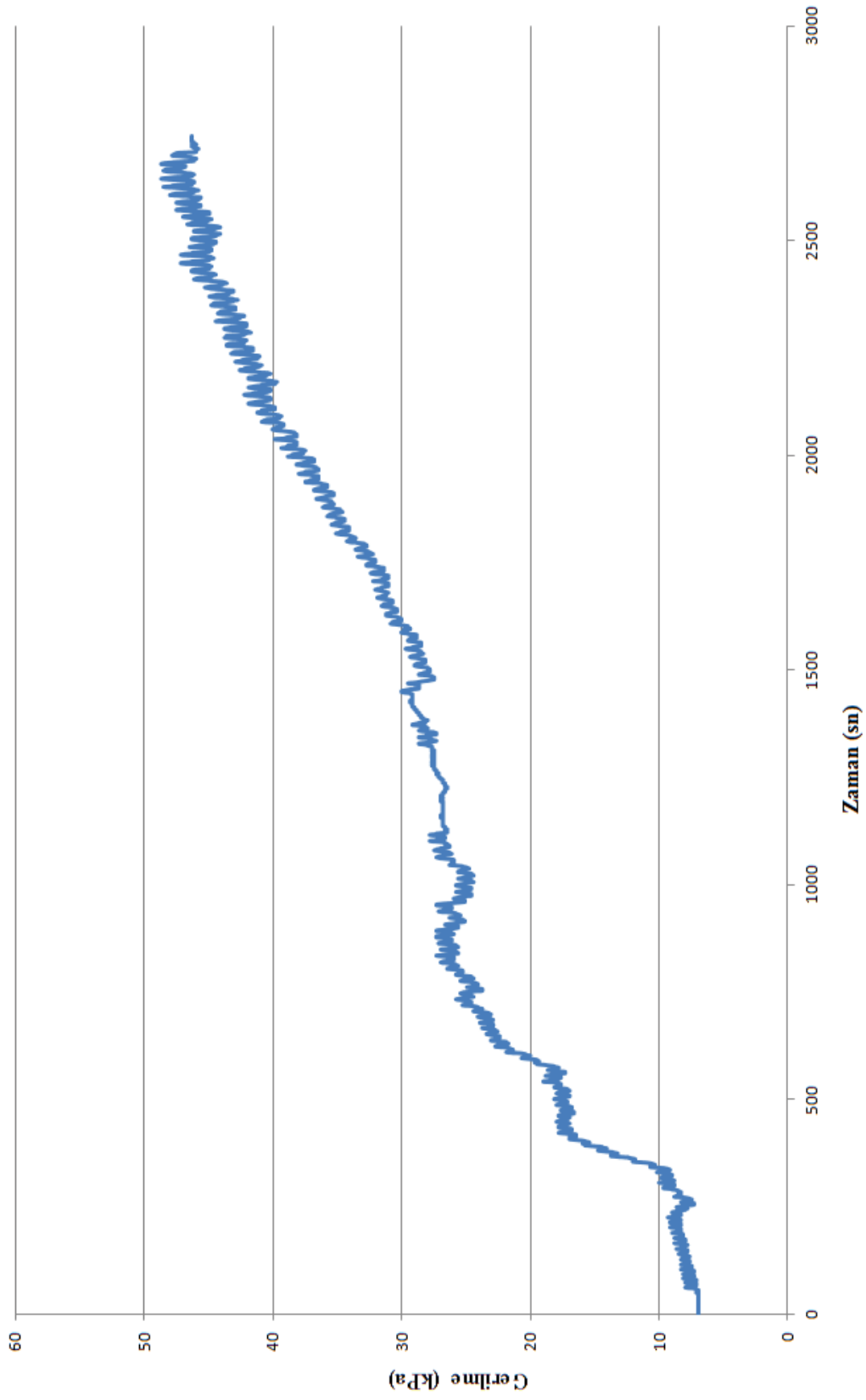
D=0.5mm, Dr=0.6, h=25-60cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

Ek B58

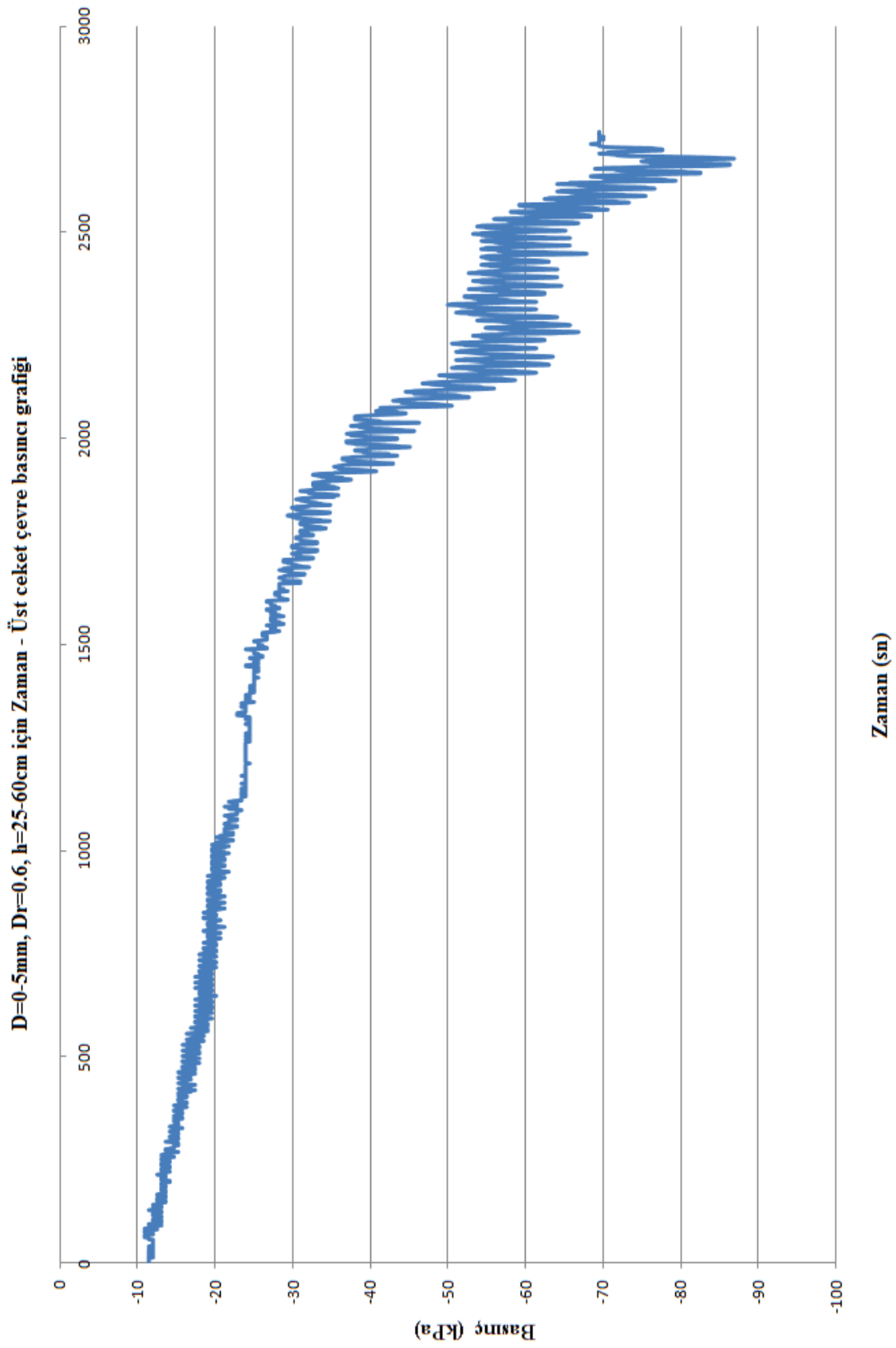
D=0-5mm, $D_r=0.6$, h=25-60cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

Ek B59

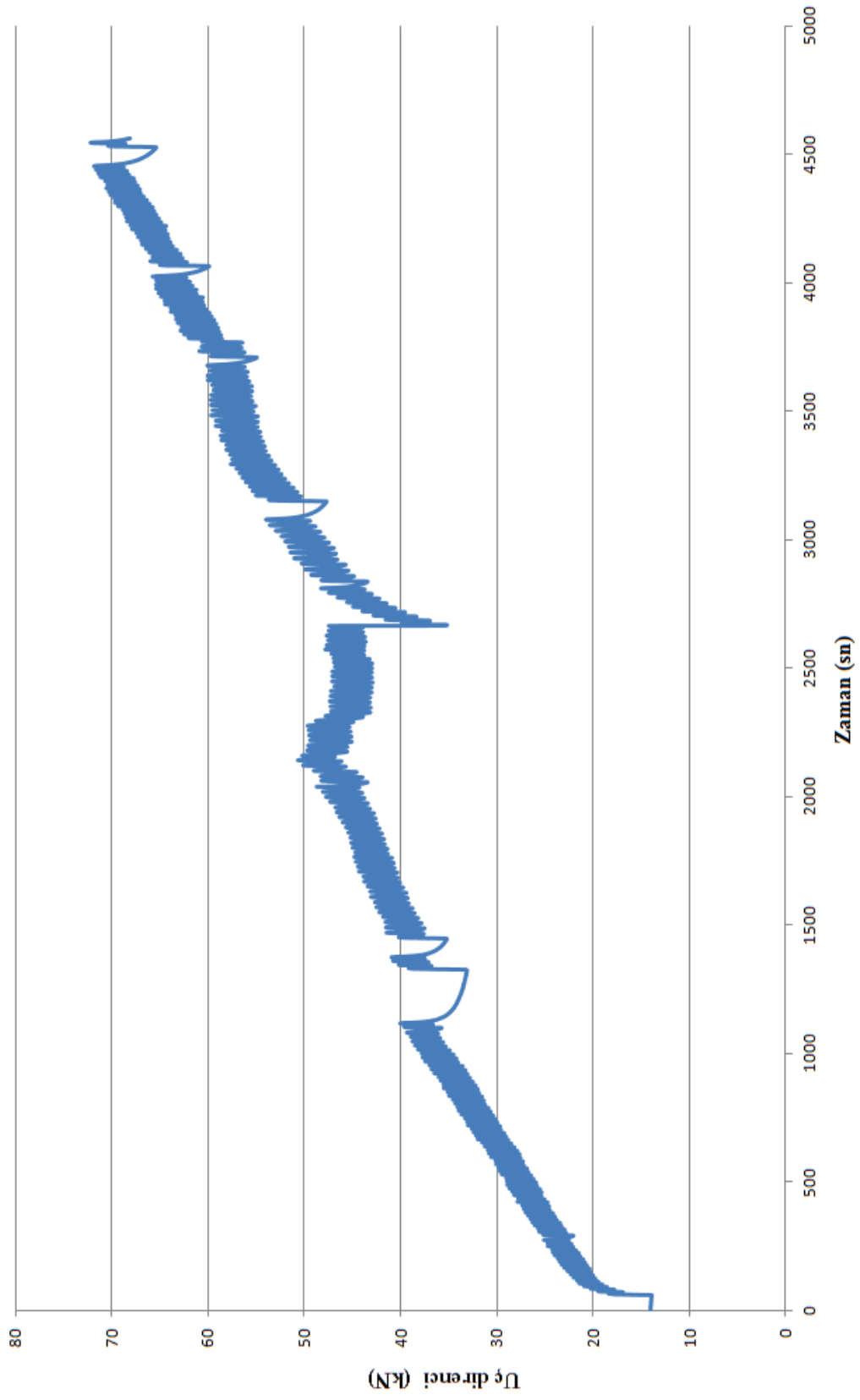
D=0-5mm, Dr=0.6, h=25-60cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği



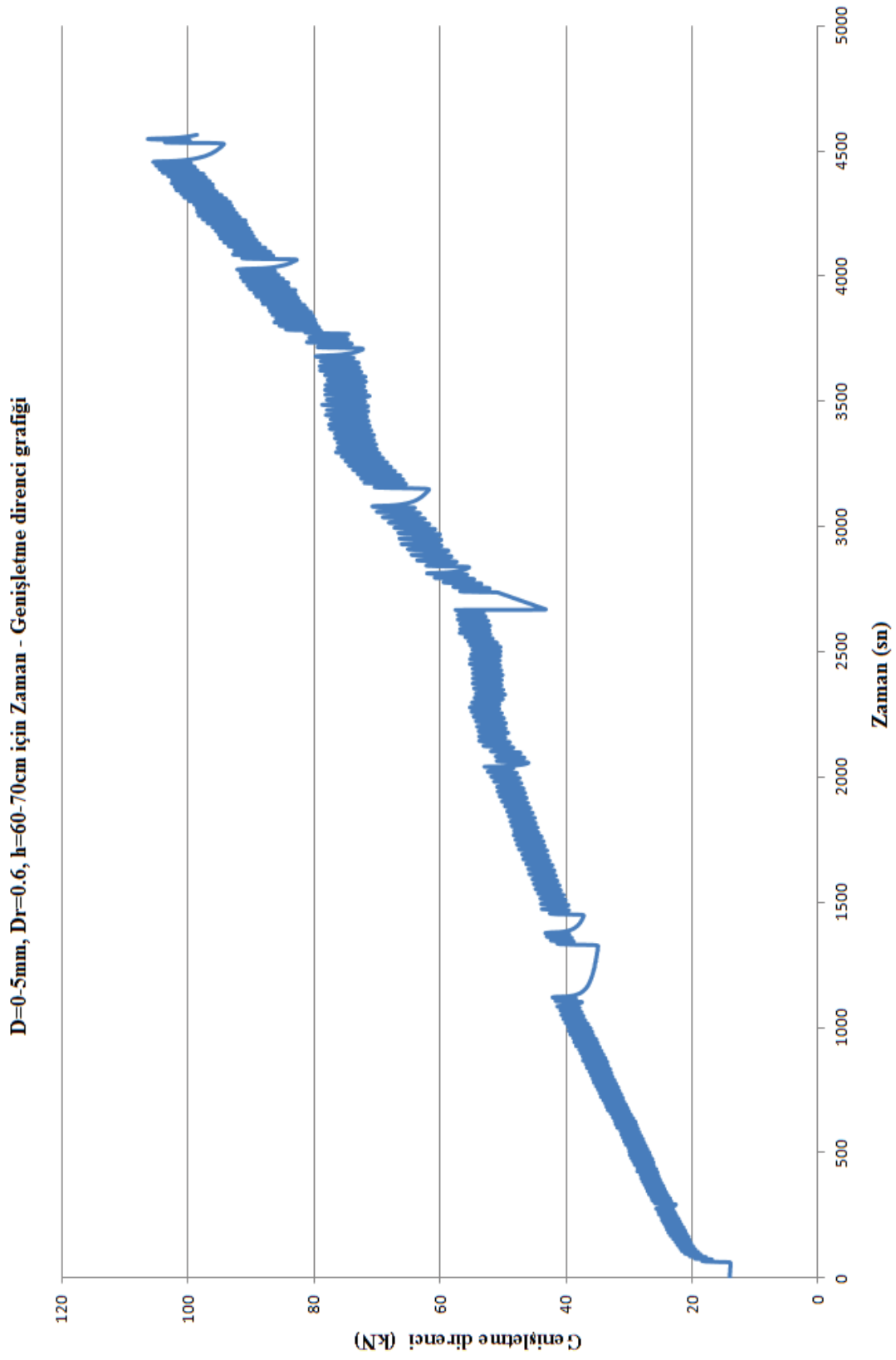
Ek B60



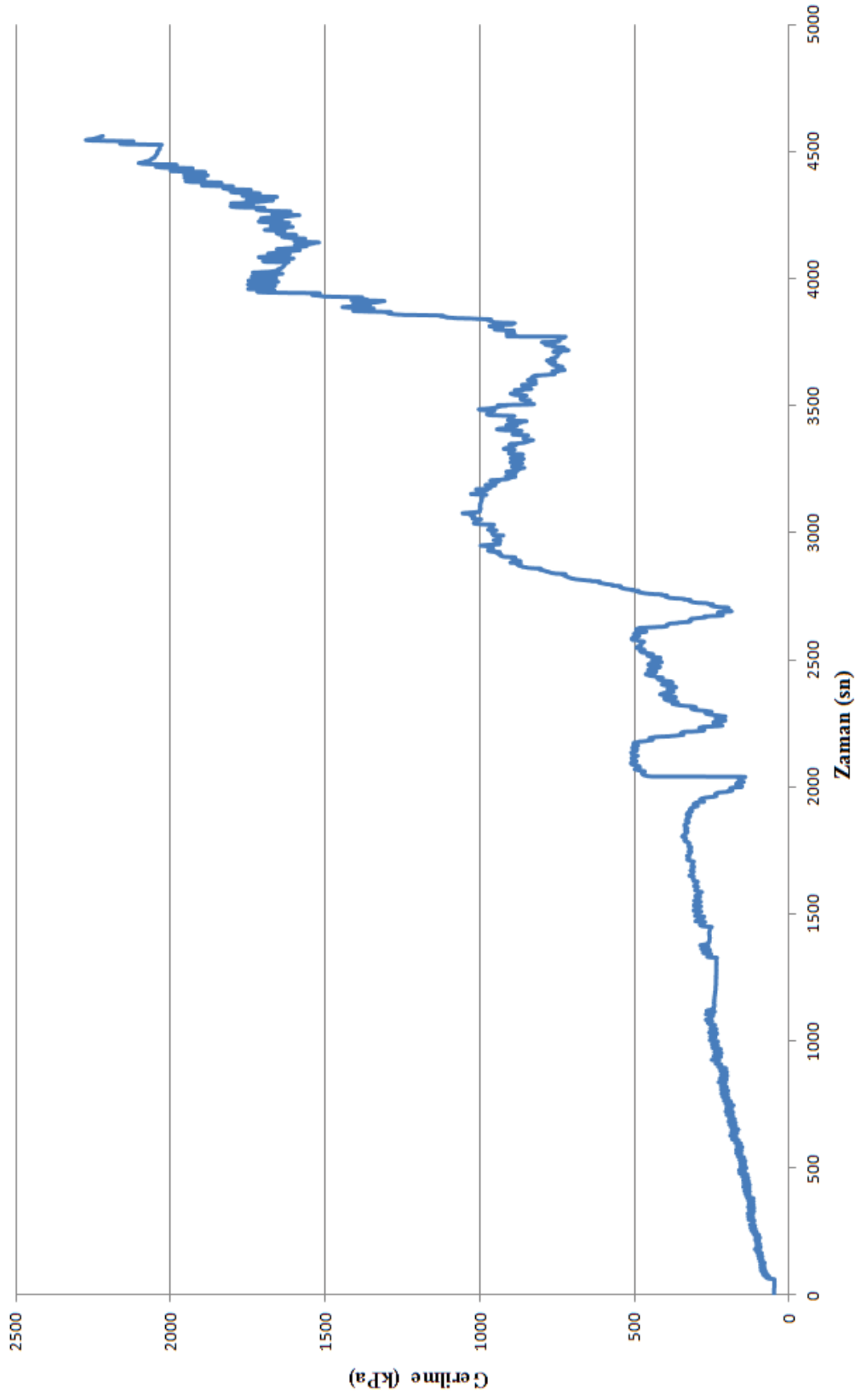
Ek B61

D=0.5mm, Dr=0.6, h=60-70cm için Zaman - Uç direnci grafiği

Ek B62

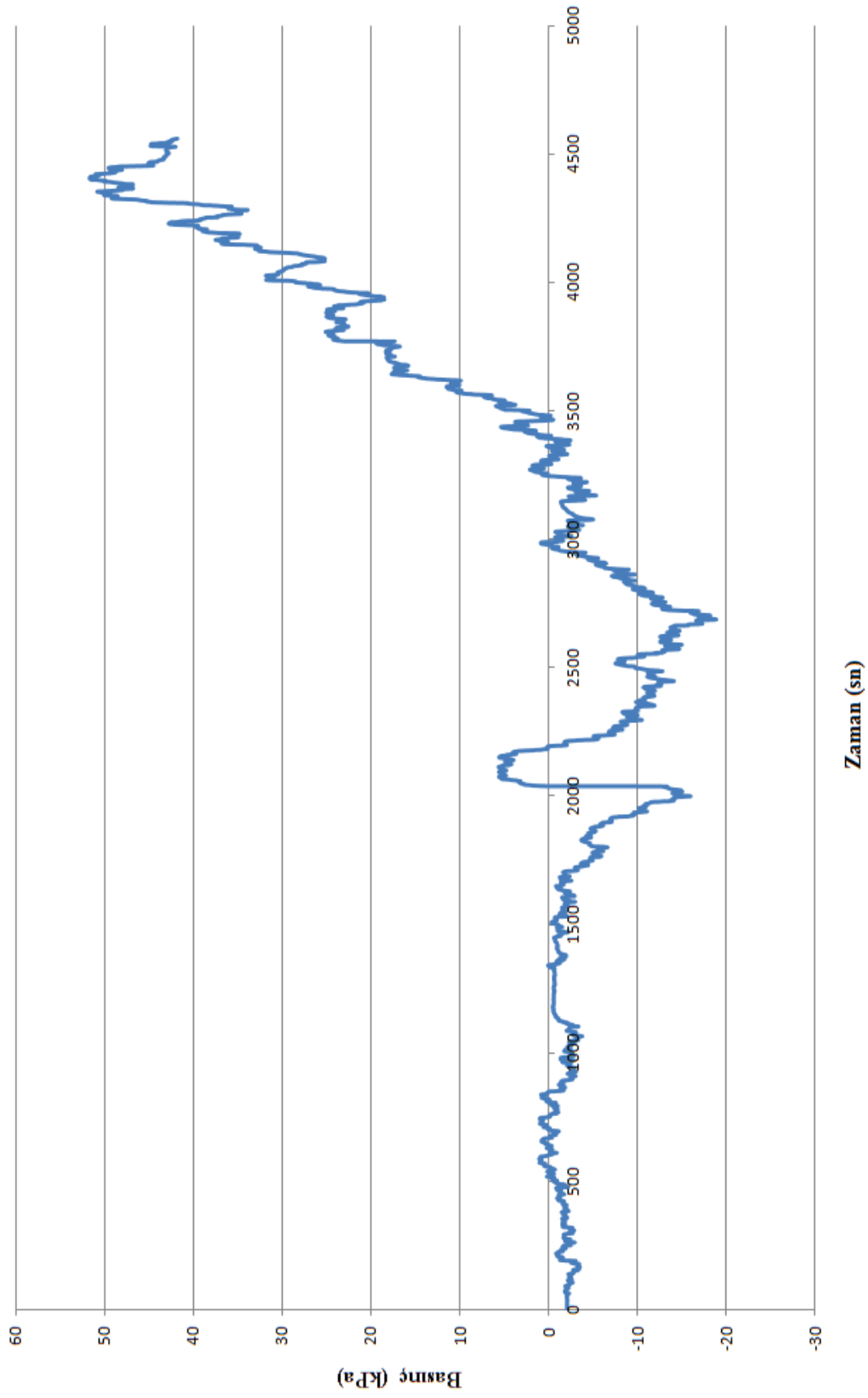


Ek B63

D=0-5mm, $D_r=0.6$, h=60-70cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

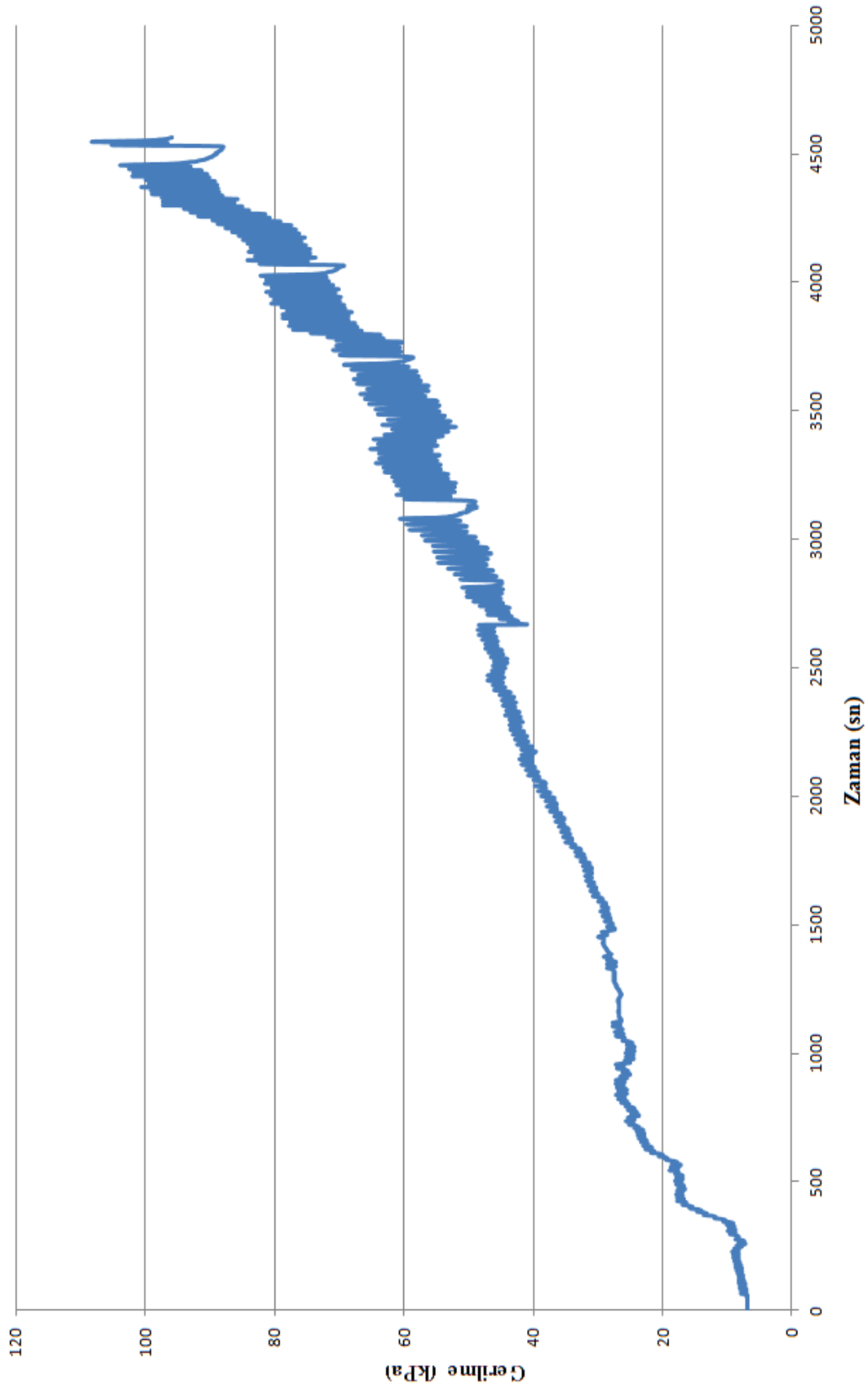
Ek B64

D=0.5mm, Dr=0.6, h=60-70cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

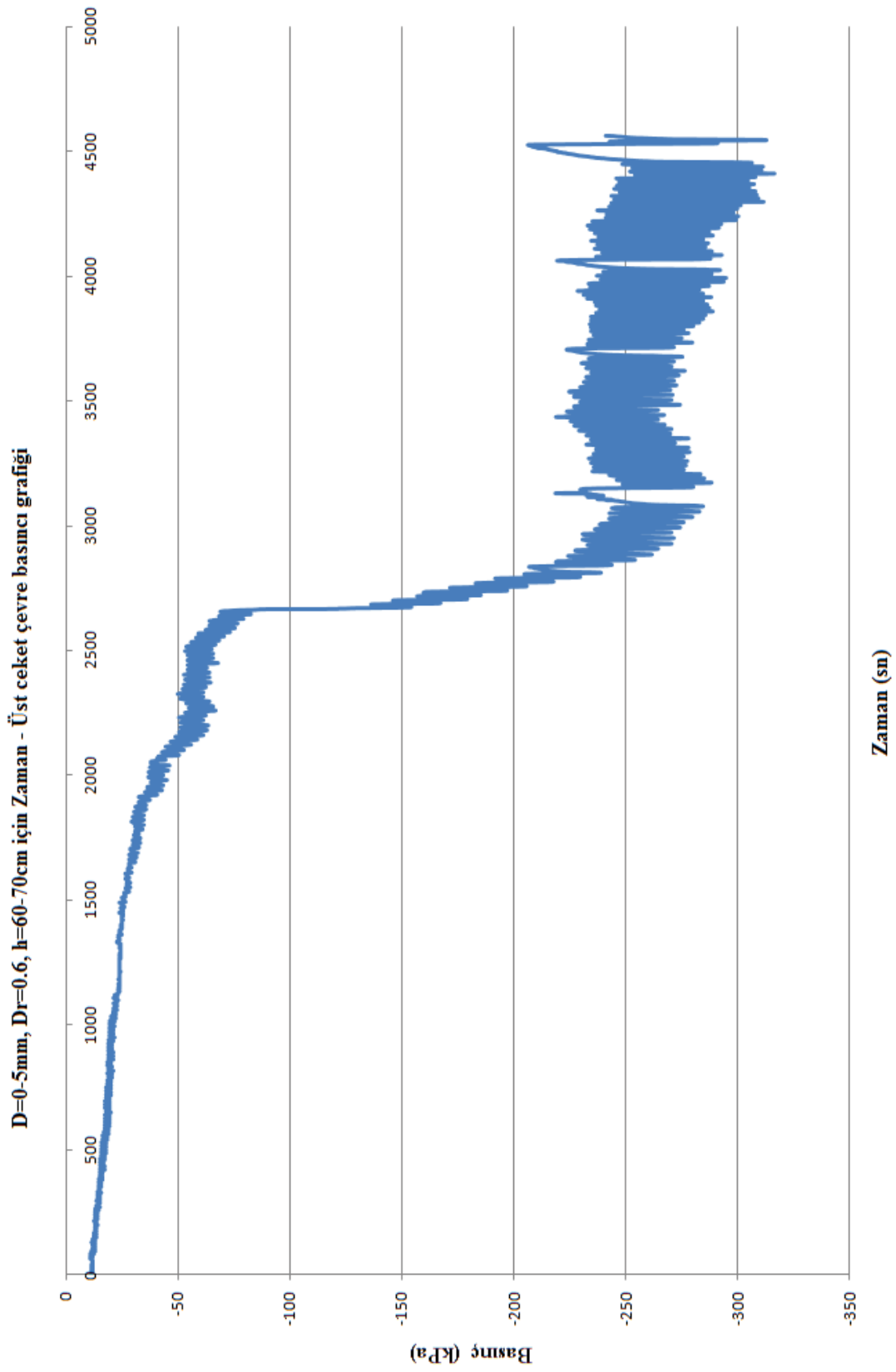


Ek B65

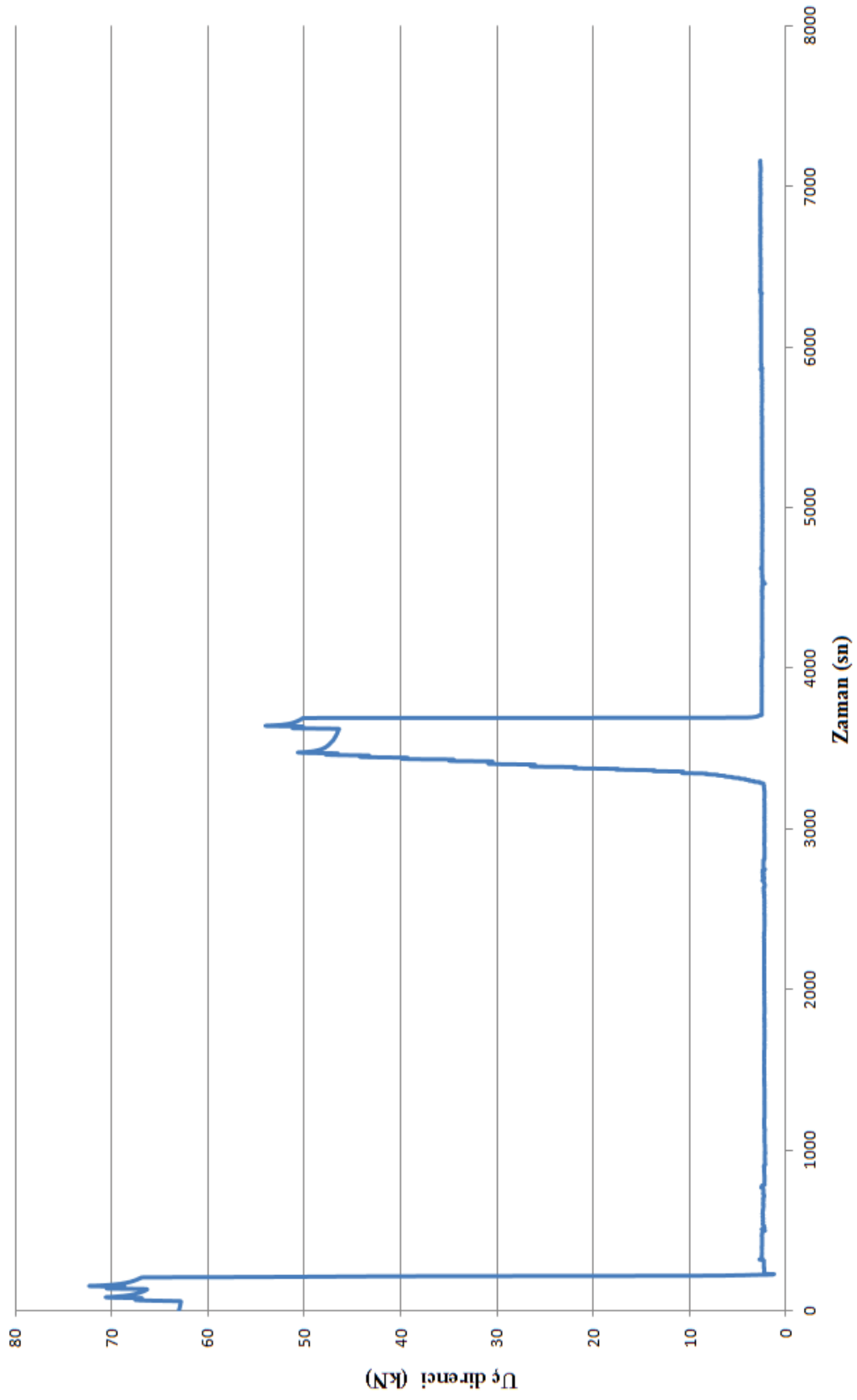
D=0.5mm, Dr=0.6, h=60-70cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği



Ek B66

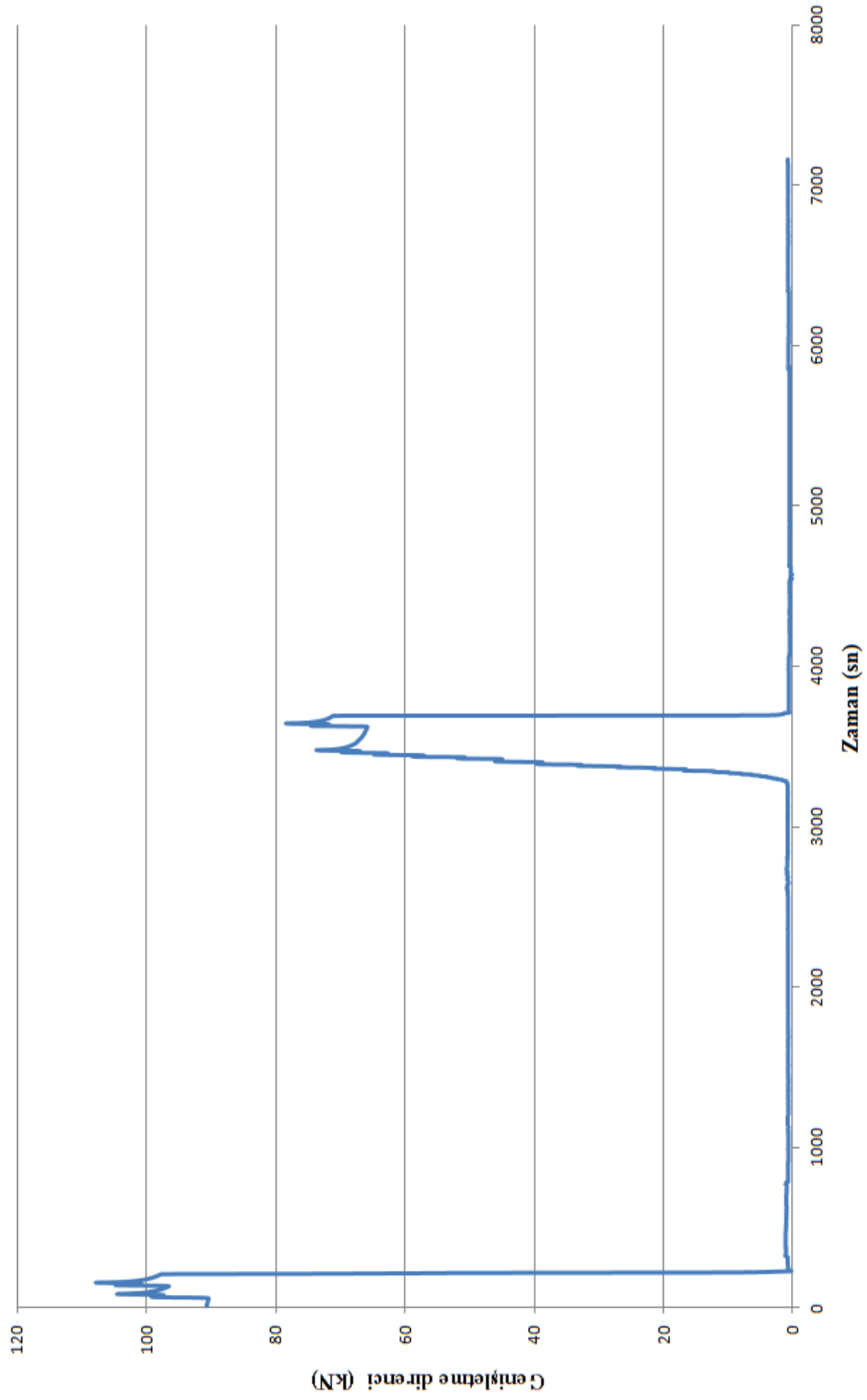


Ek B67

D=0.5mm, Dr=0.6, h=70-80cm için Zaman - Uç direnci grafiği

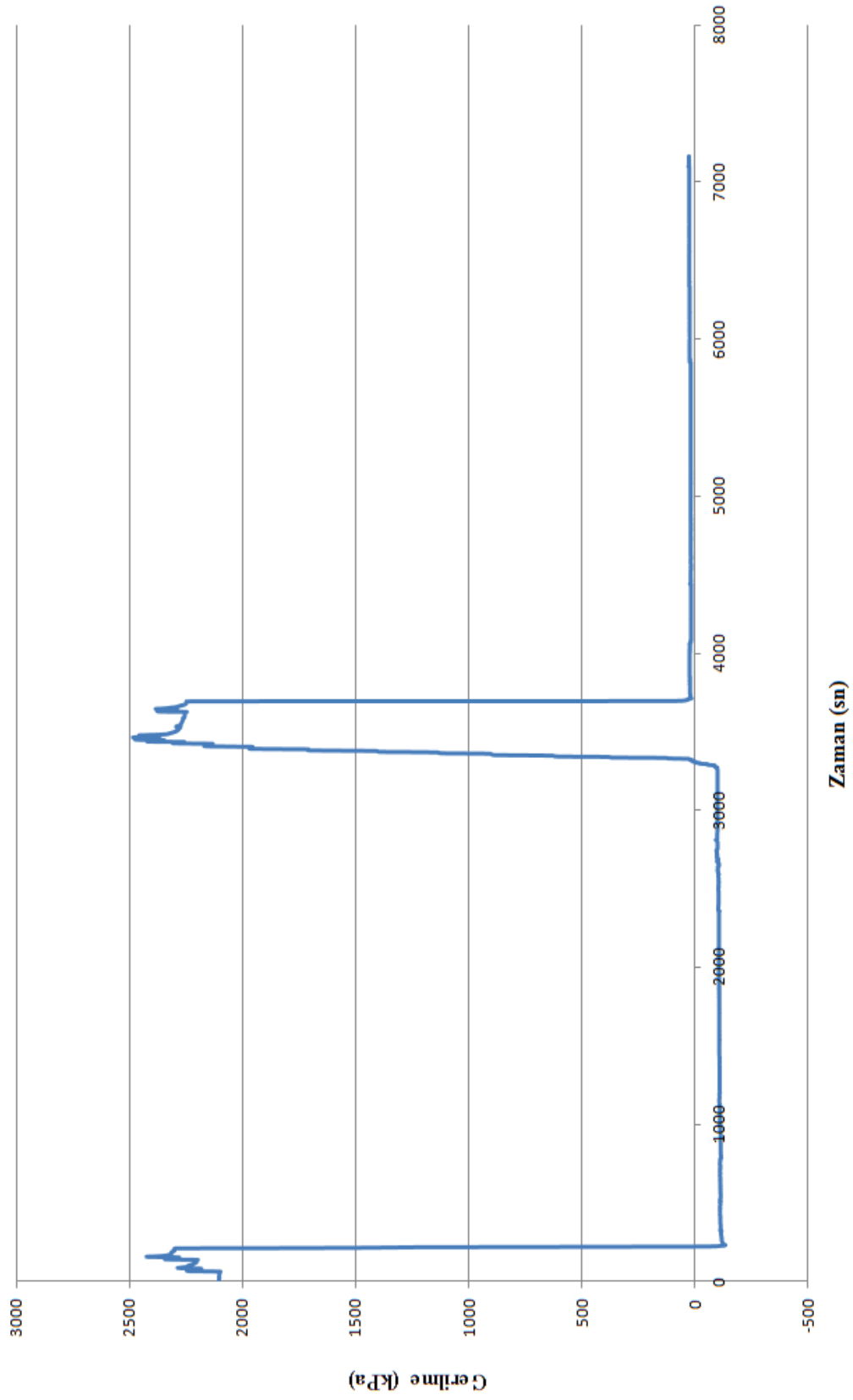
Ek B68

D=0.5mm, Dr=0.6, h=70-80cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği



Ek B69

D=0.5mm, Dr=0.6, h=70-80cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği



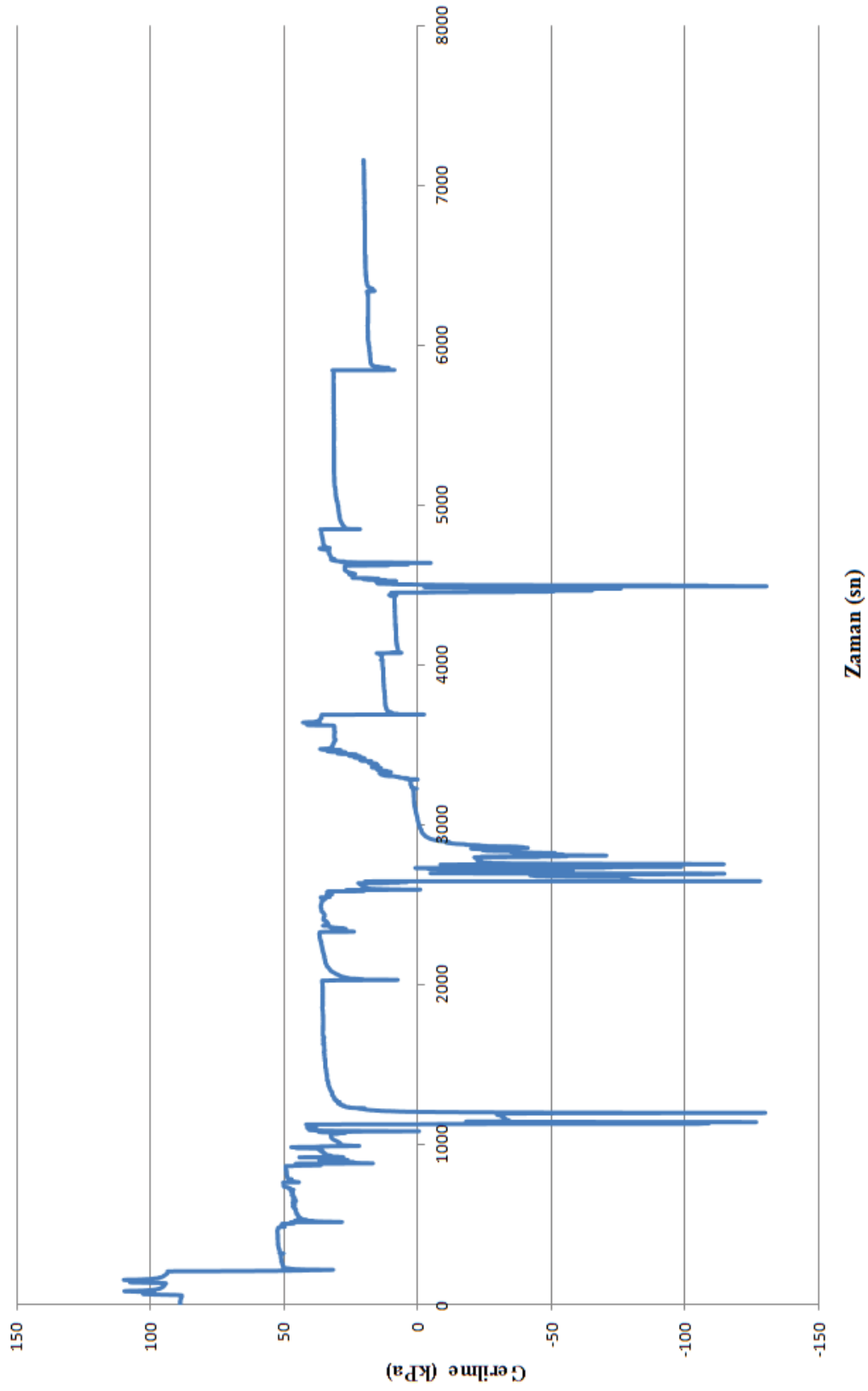
Ek B70

D=0.5mm, Dr=0.6, h=70-80cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği



Ek B71

D=0.5mm, Dr=0.6, h=70-80cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği

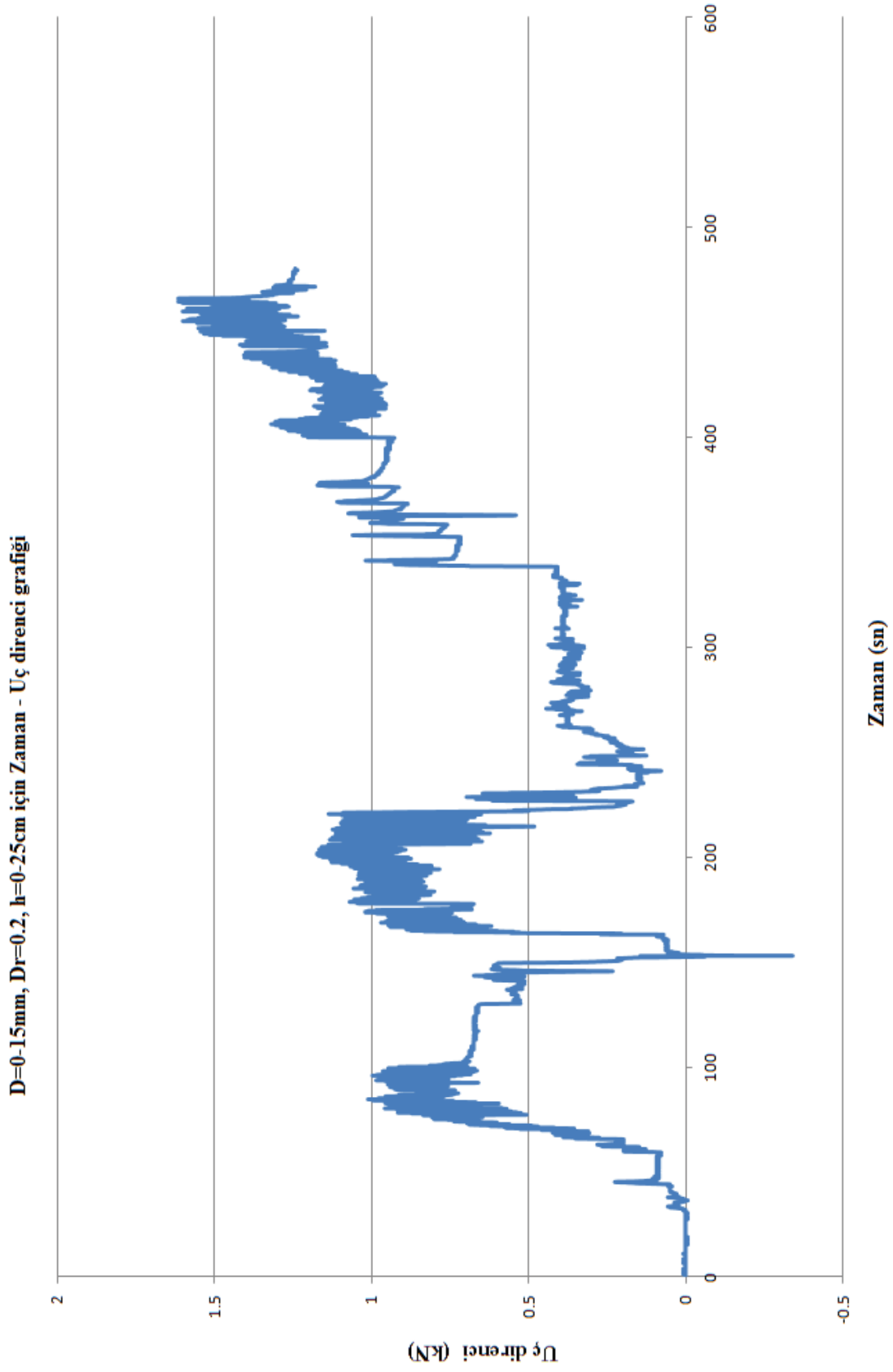


Ek B72

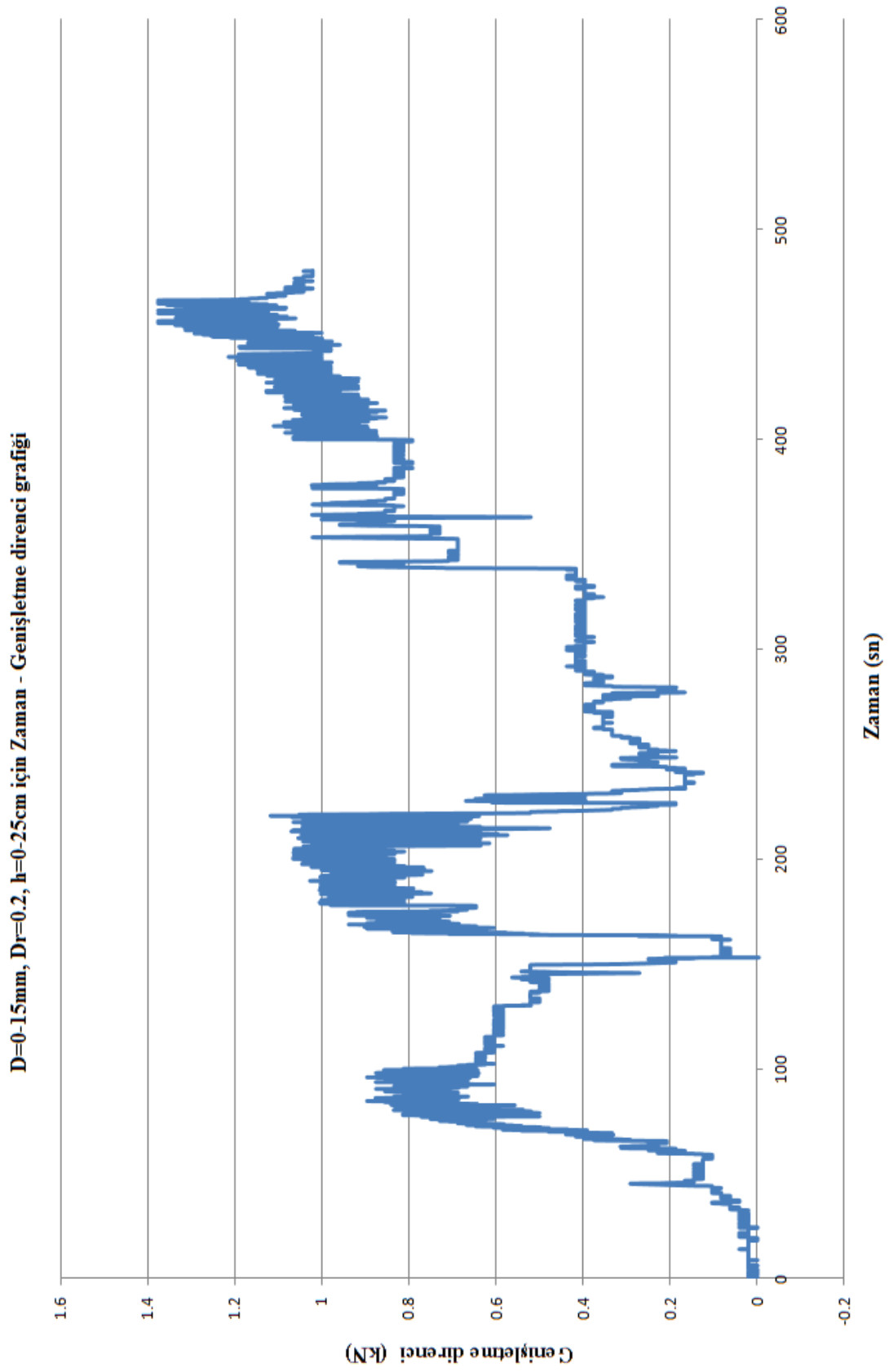
D=0-5mm, $D_f=0.6$, h=70-80cm için Zaman - Üst ceket çevre basıncı grafiği



Ek C1

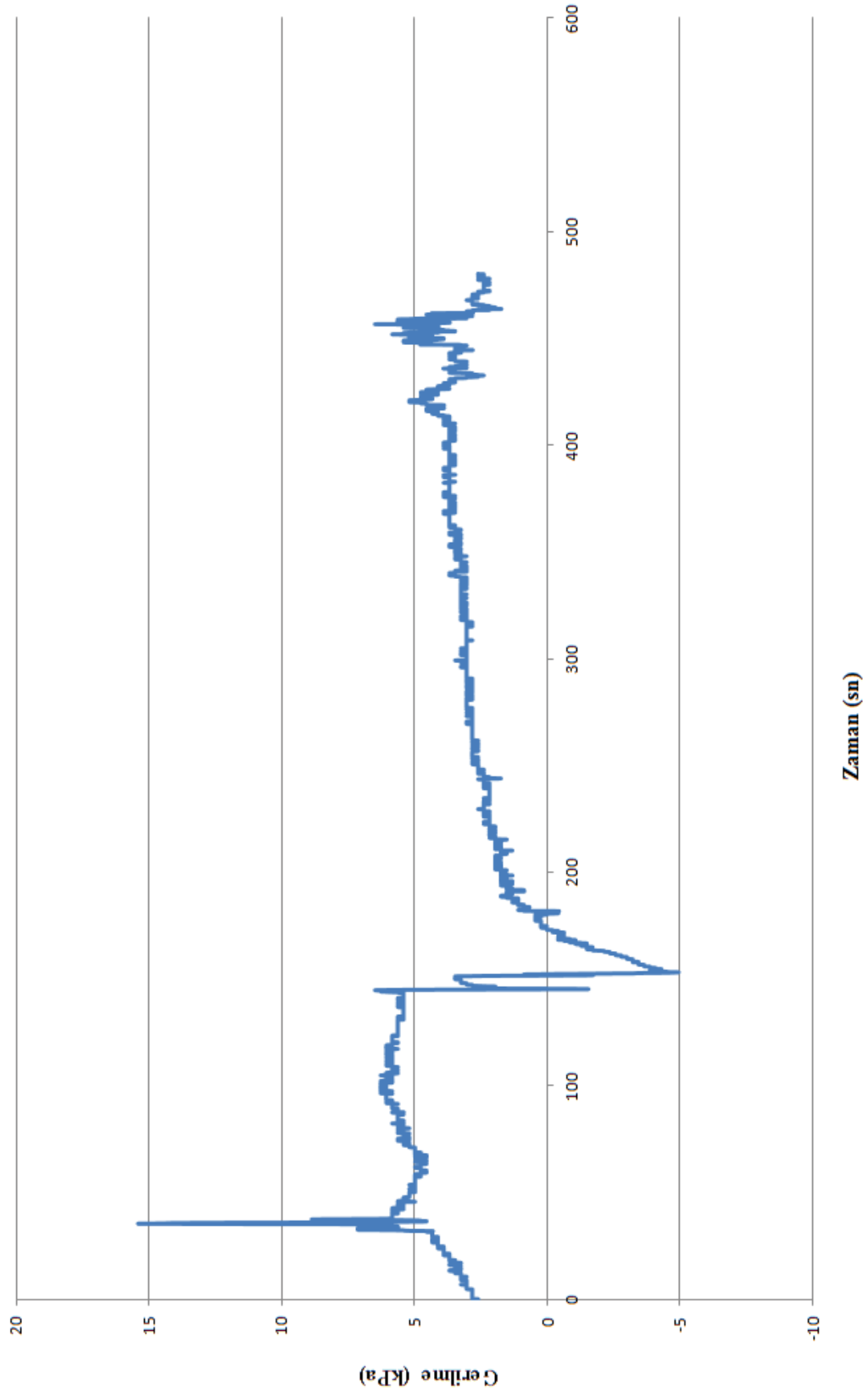


Ek C2



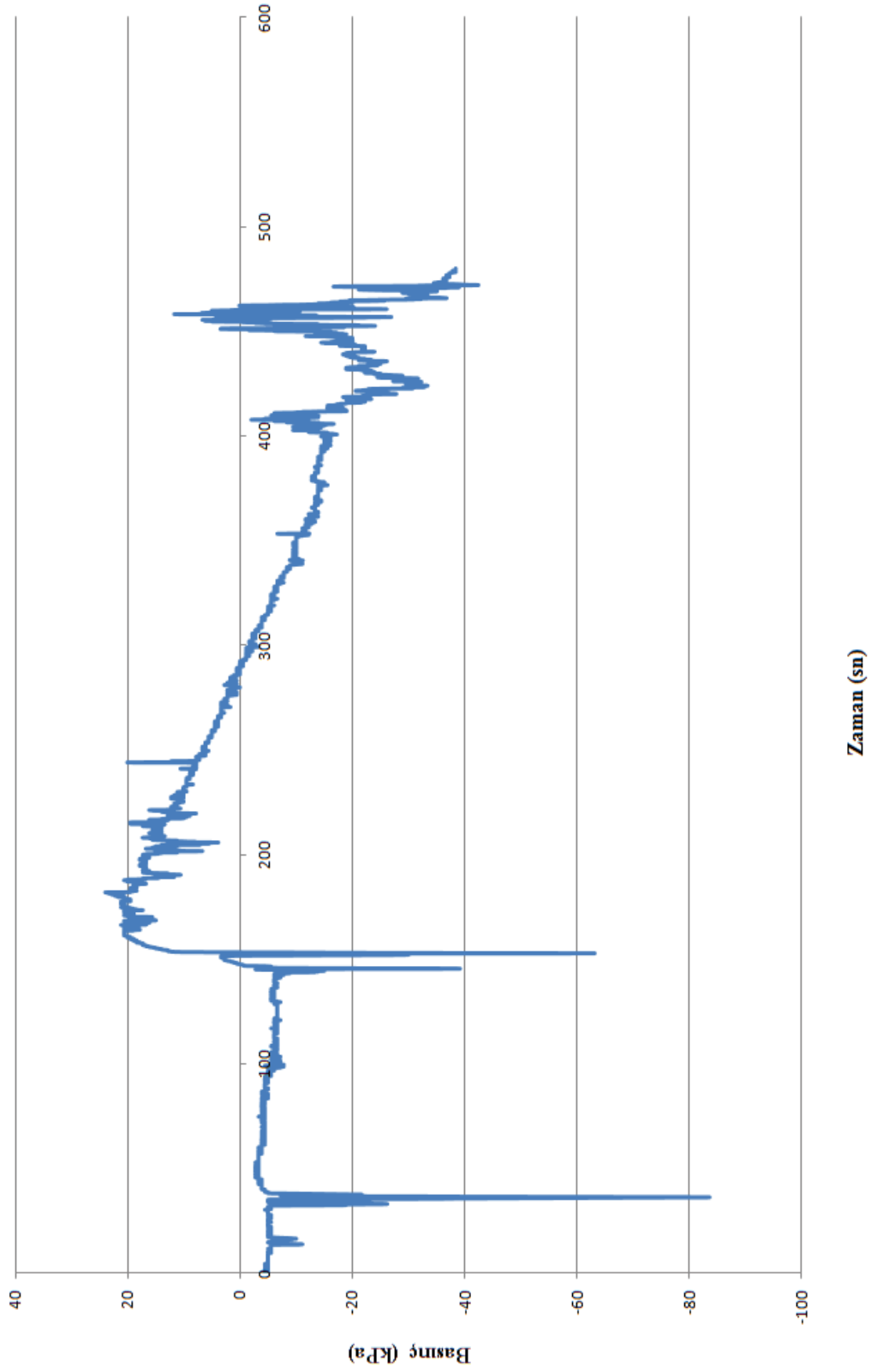
Ek C3

D=0-15mm, Dr=0.2, h=0-25cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

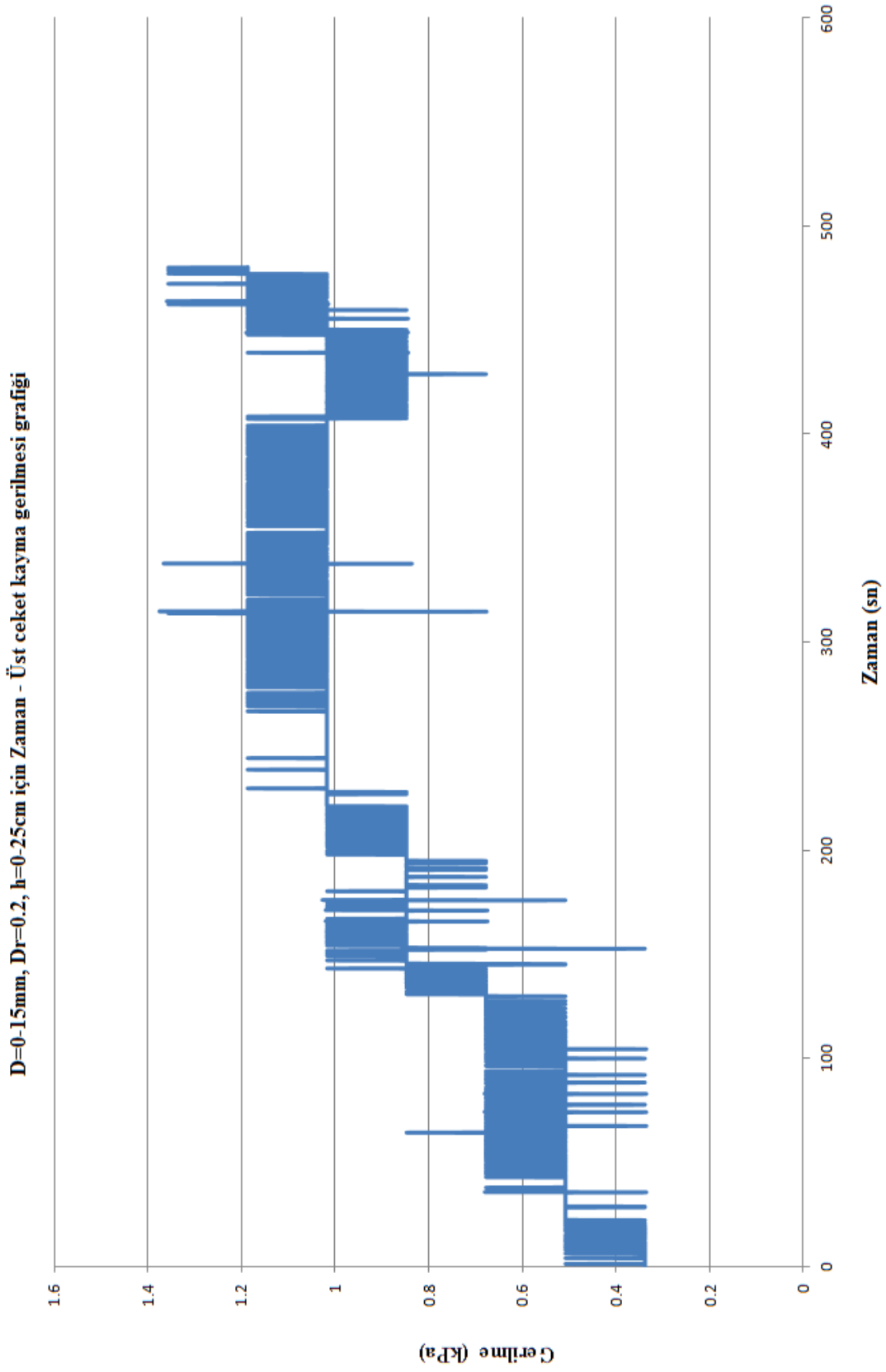


Ek C4

D=0-15mm, Dr=0.2, h=0-25cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

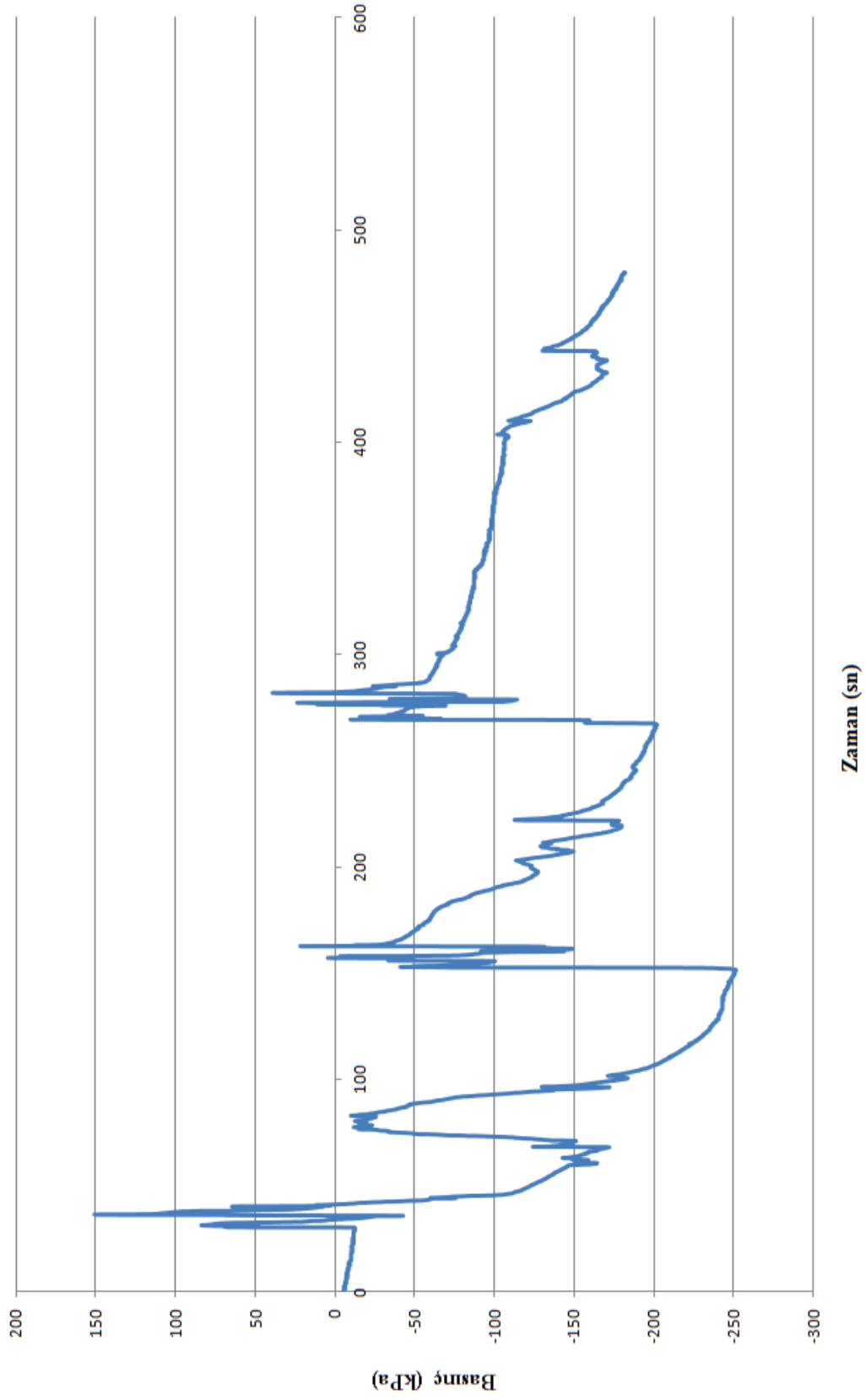


Ek C5

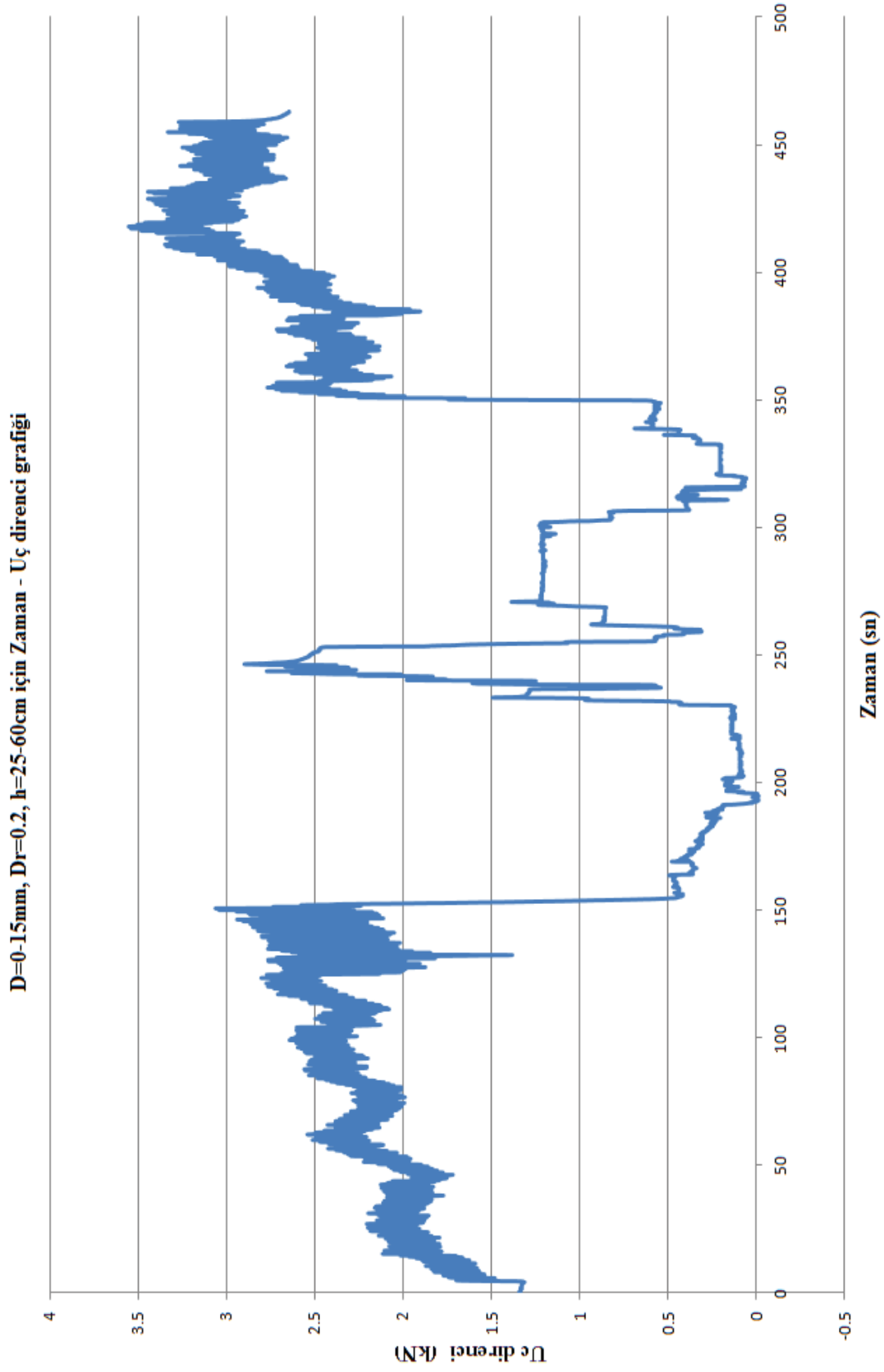


Ek C6

D=0-15mm, Dr=0.2, h=0-25cm için Zaman - Üst ceket çevre basıncı grafiği

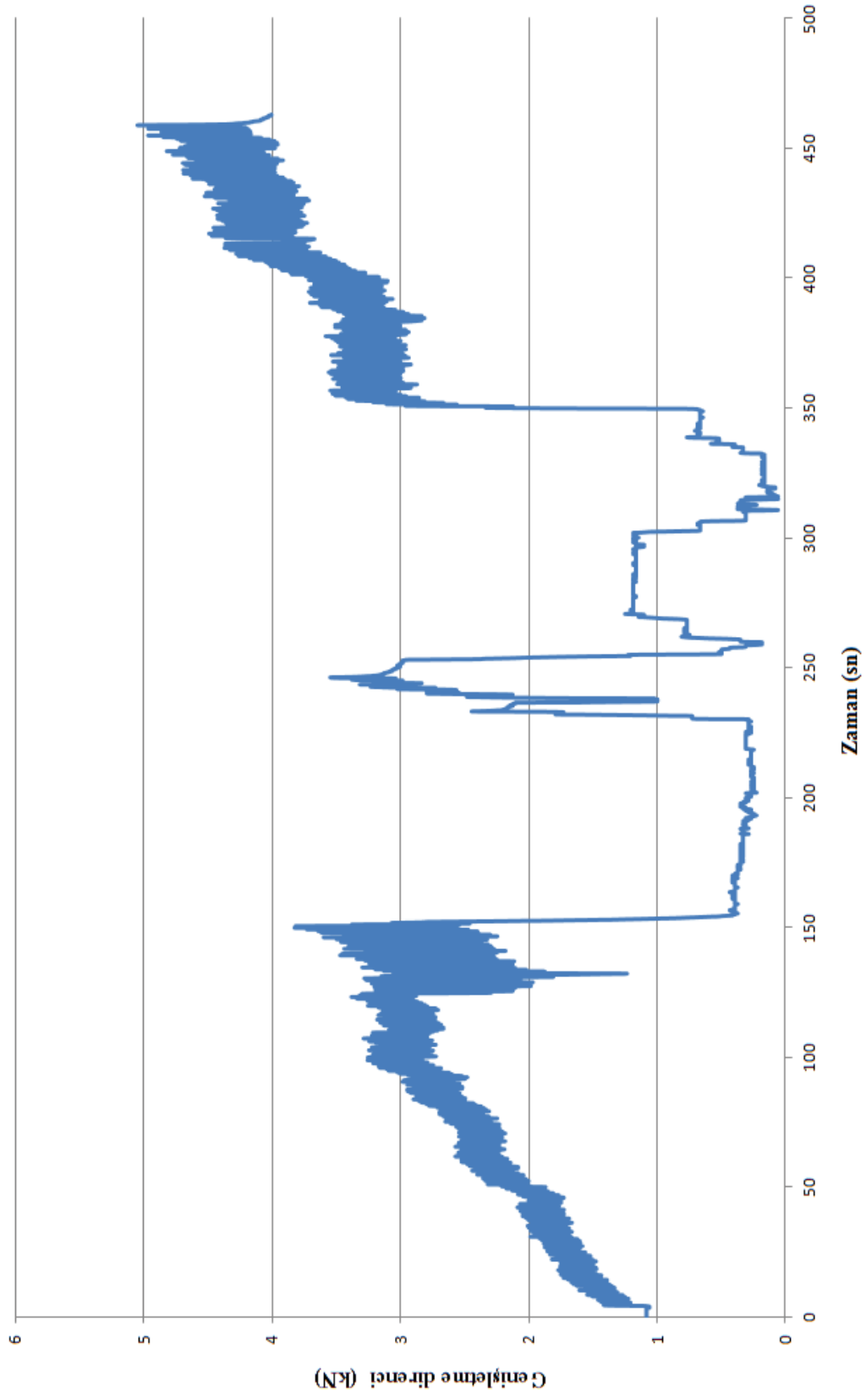


Ek C7

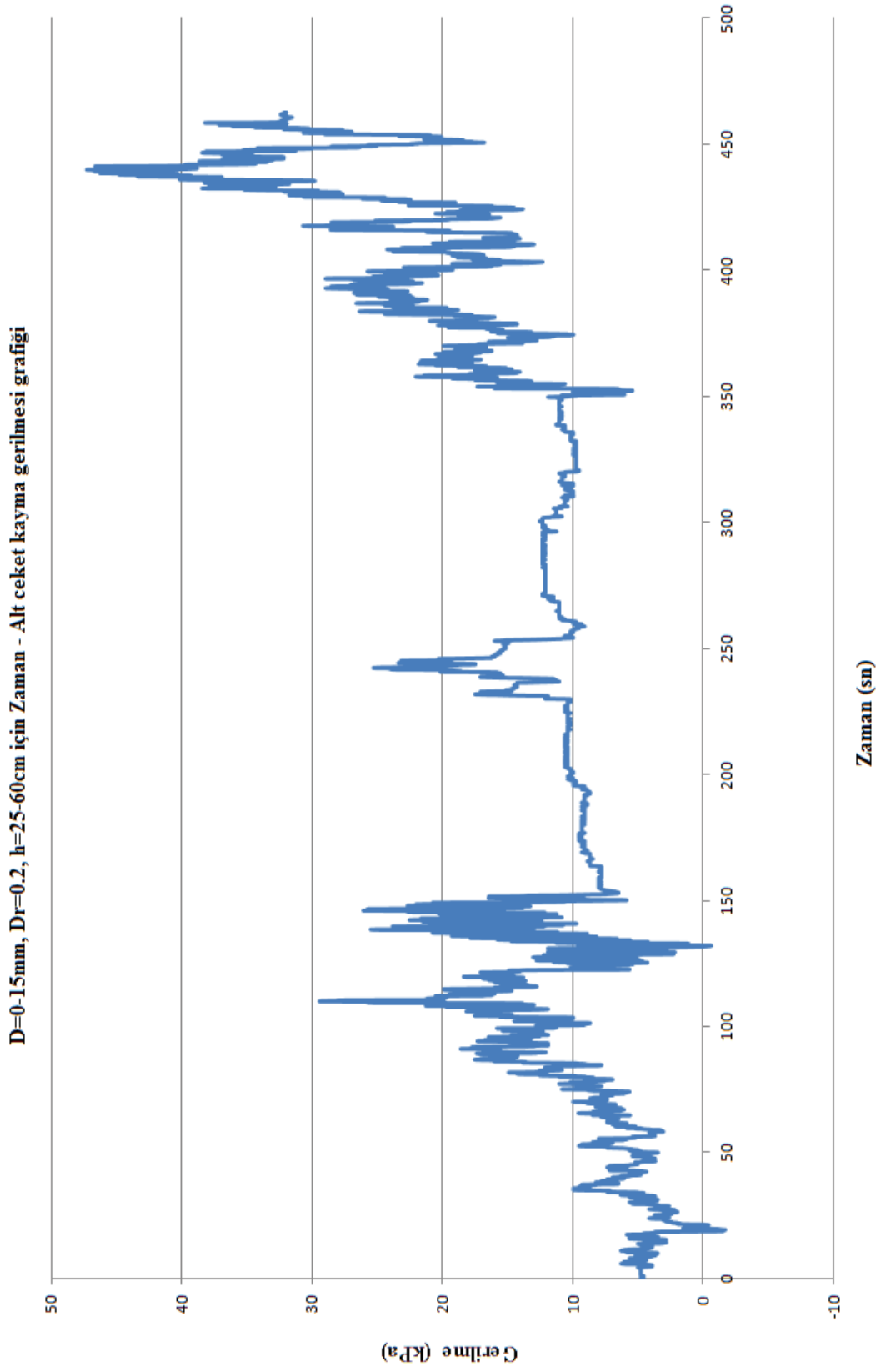


Ek C8

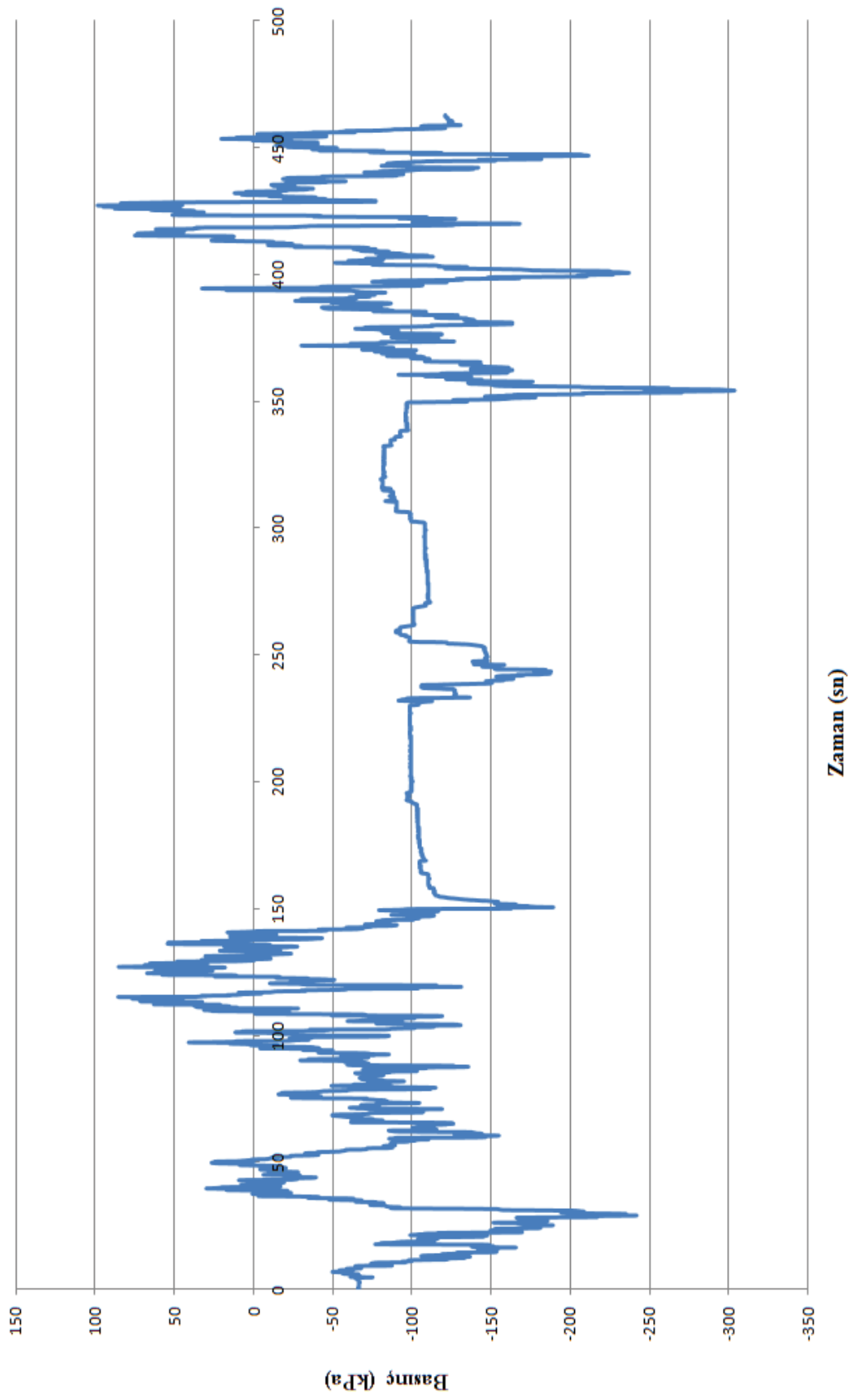
D=0-15mm, Dr=0.2, h=25-60cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği

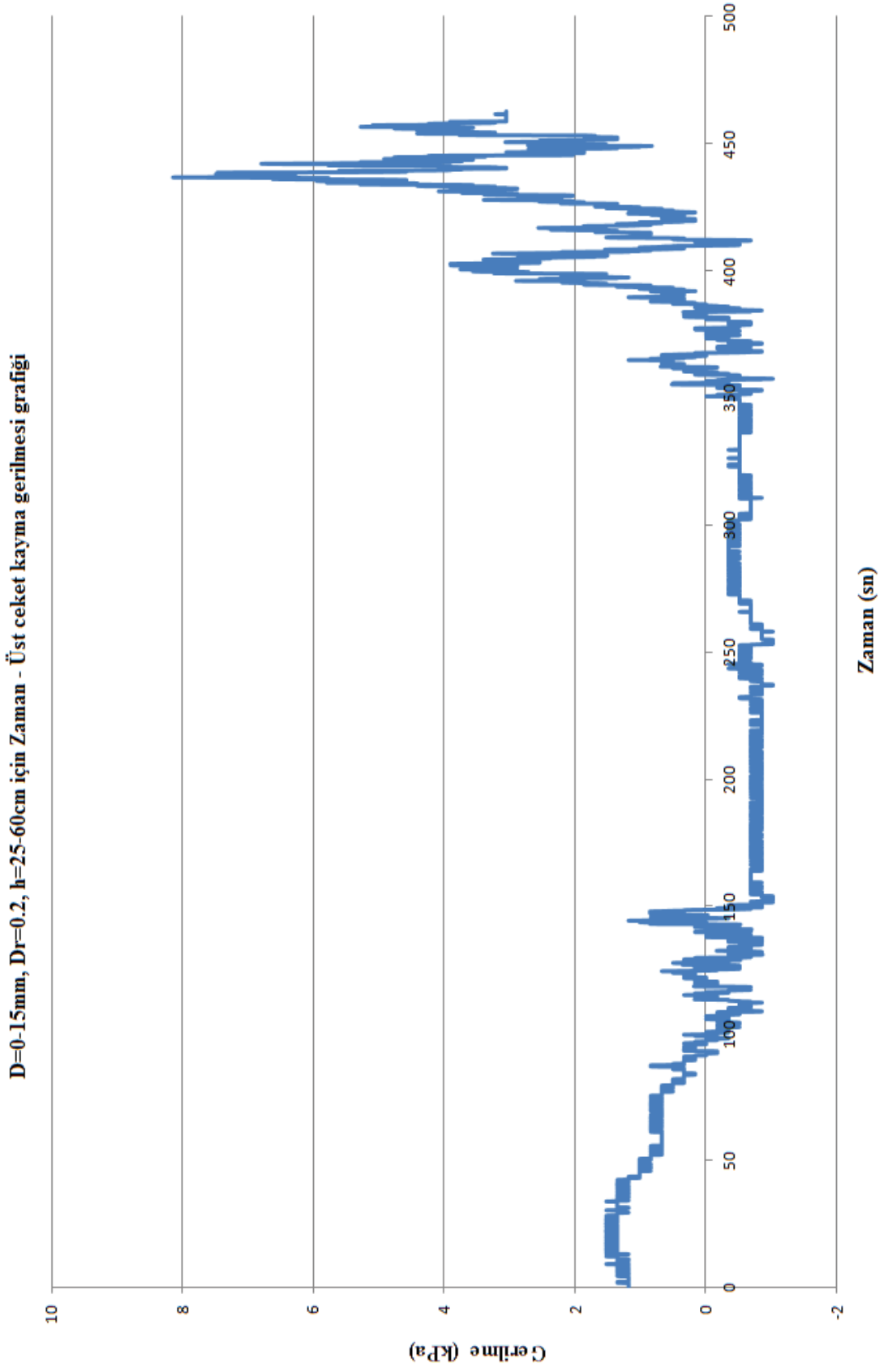


Ek C9

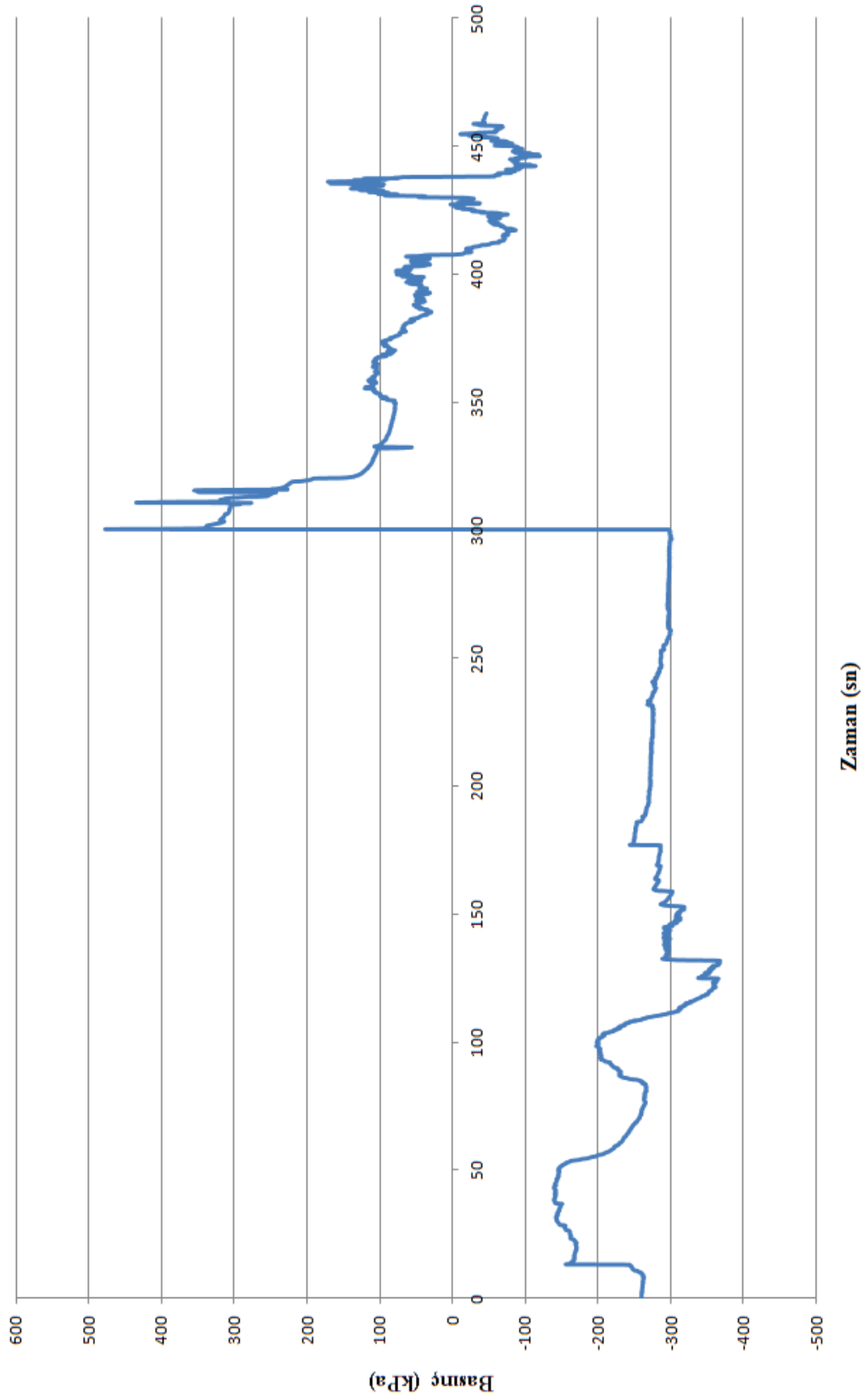


Ek C10

D=0-15mm, $D_r=0.2$, h=25-60cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

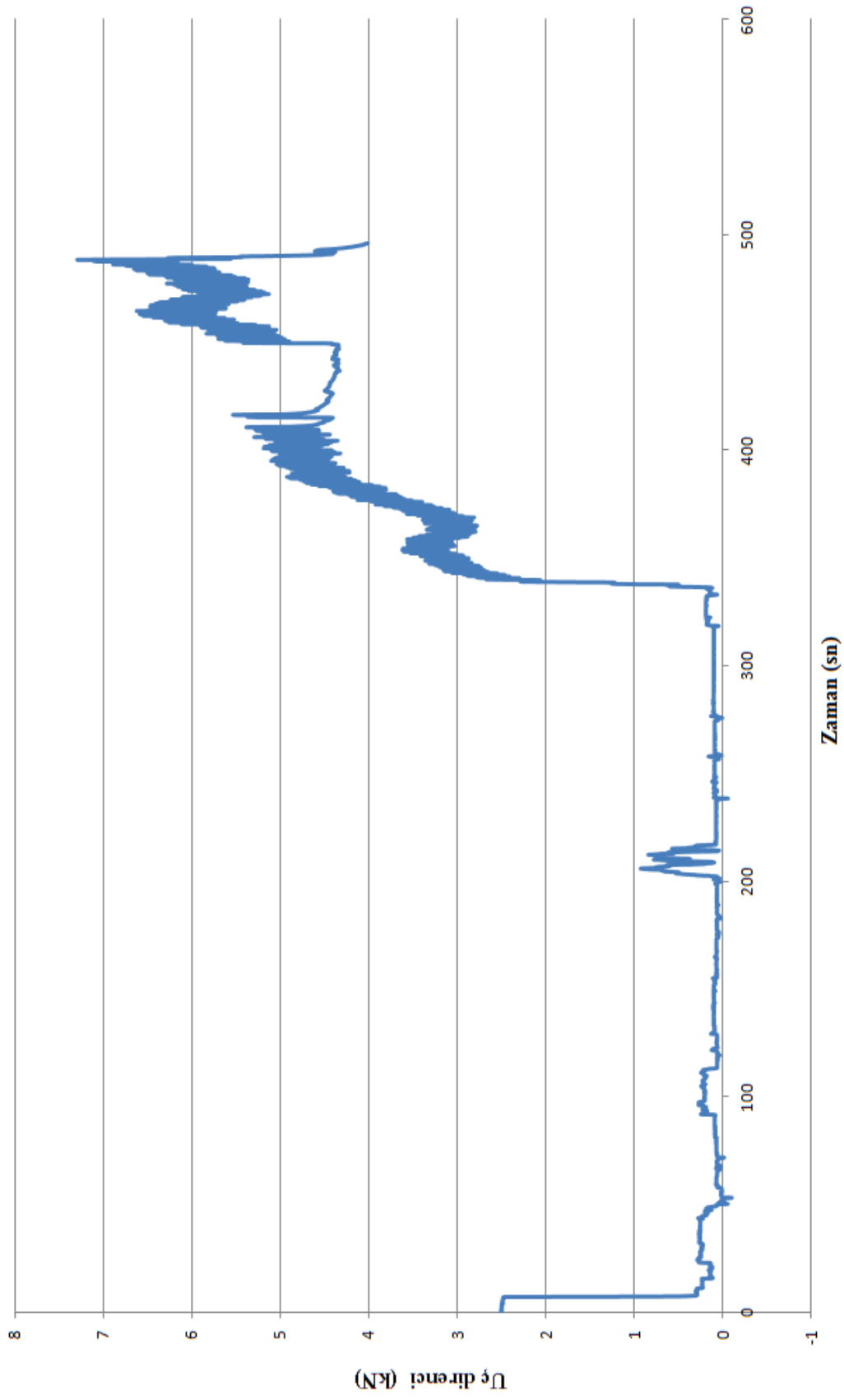


Ek C12

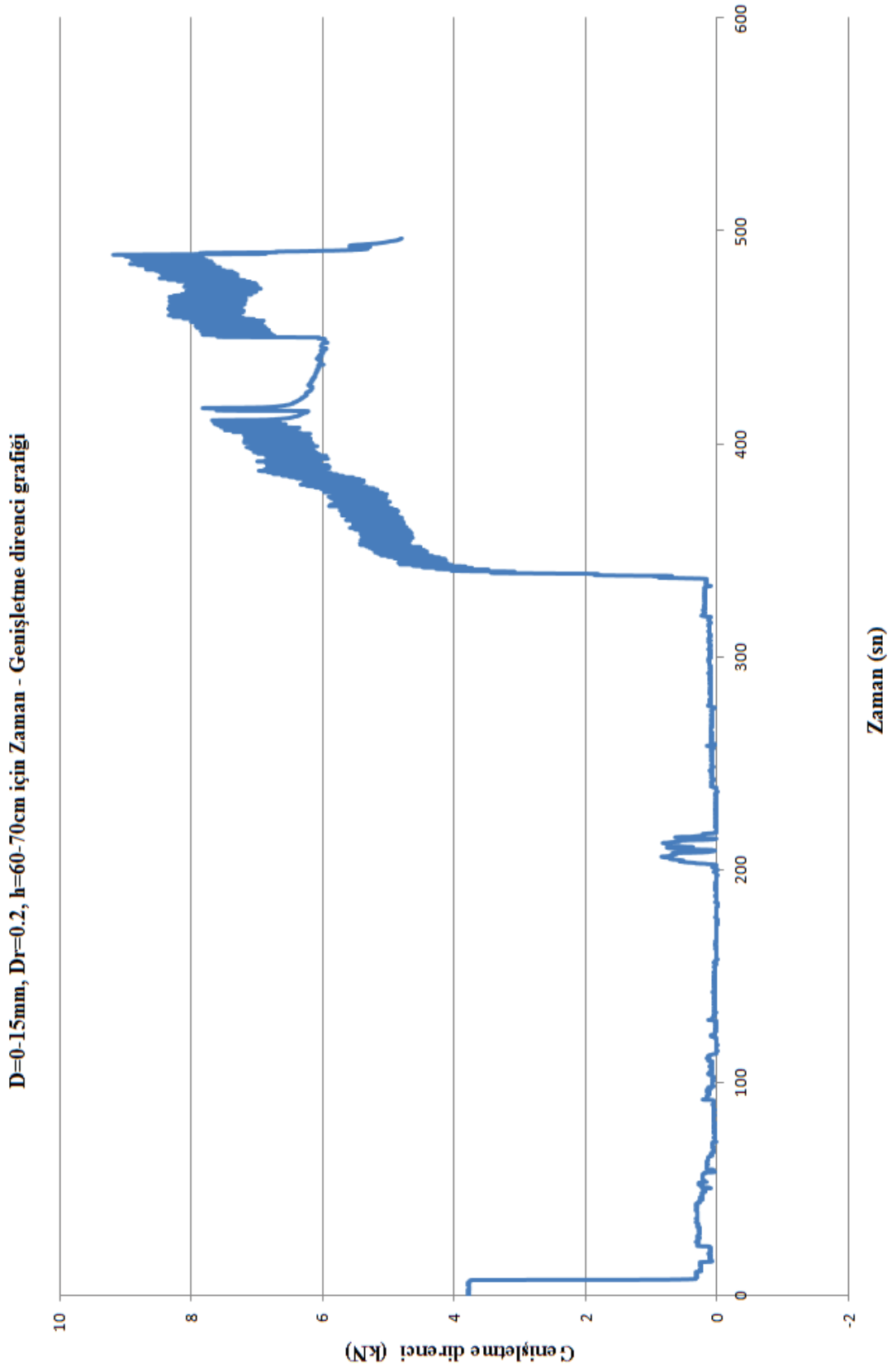
D=0-15mm, $D_r=0.2$, h=25-60cm için Zaman - Üst ceket çevre basıncı grafiği

Ek C13

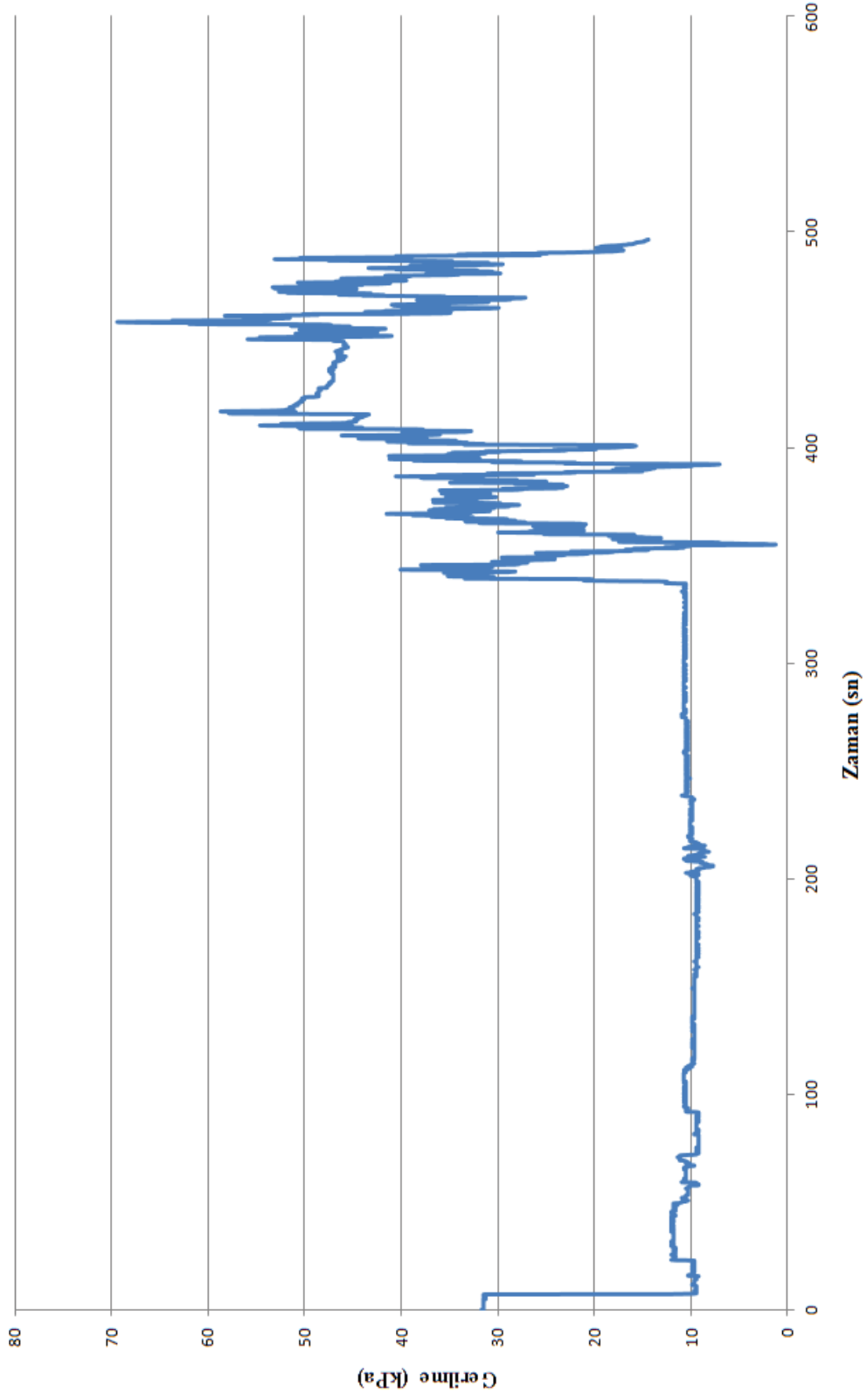
D=0-15mm, $D_f=0.2$, h=60-70cm için Zaman - Uç direnci grafiği



Ek C14

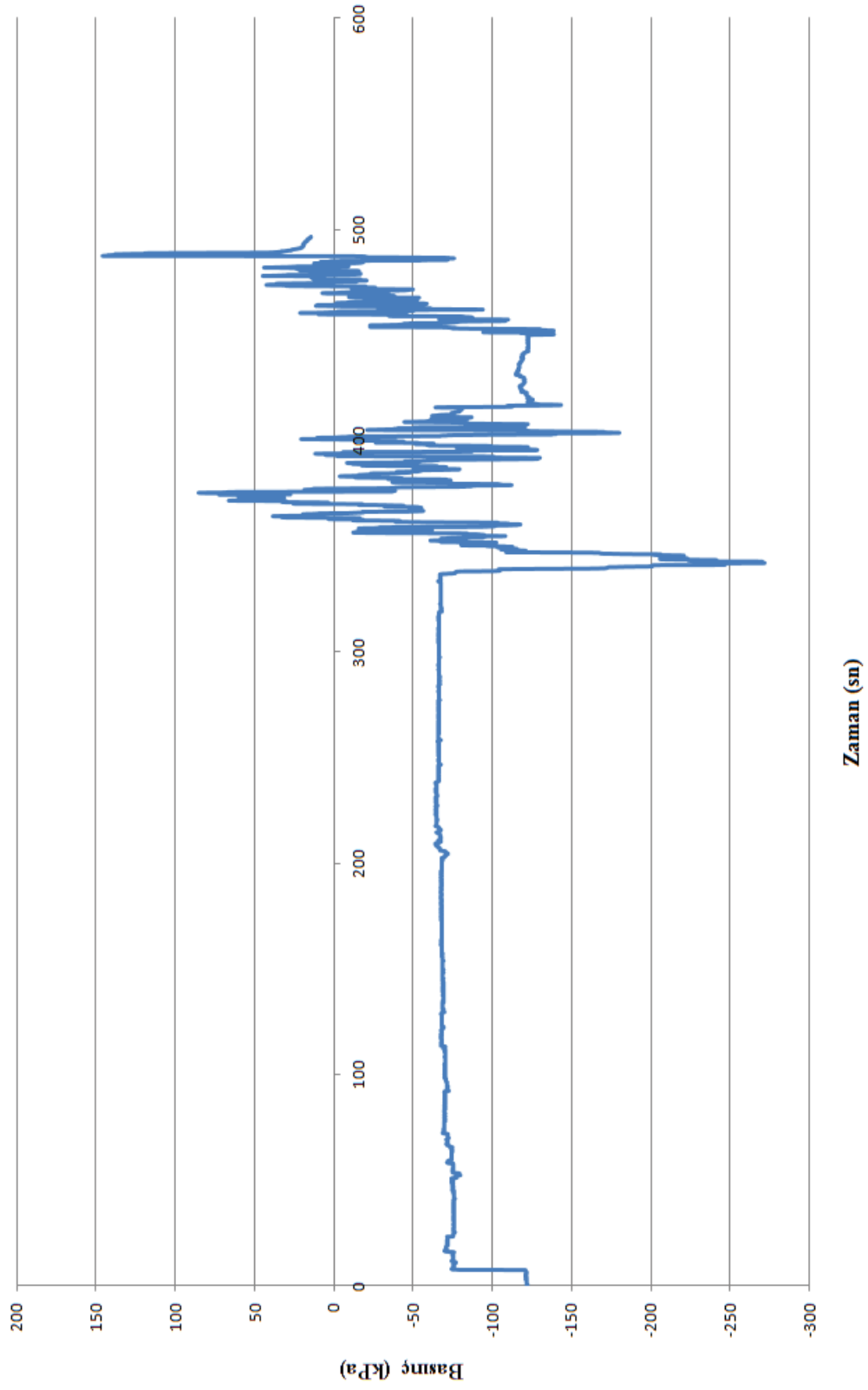


Ek C15

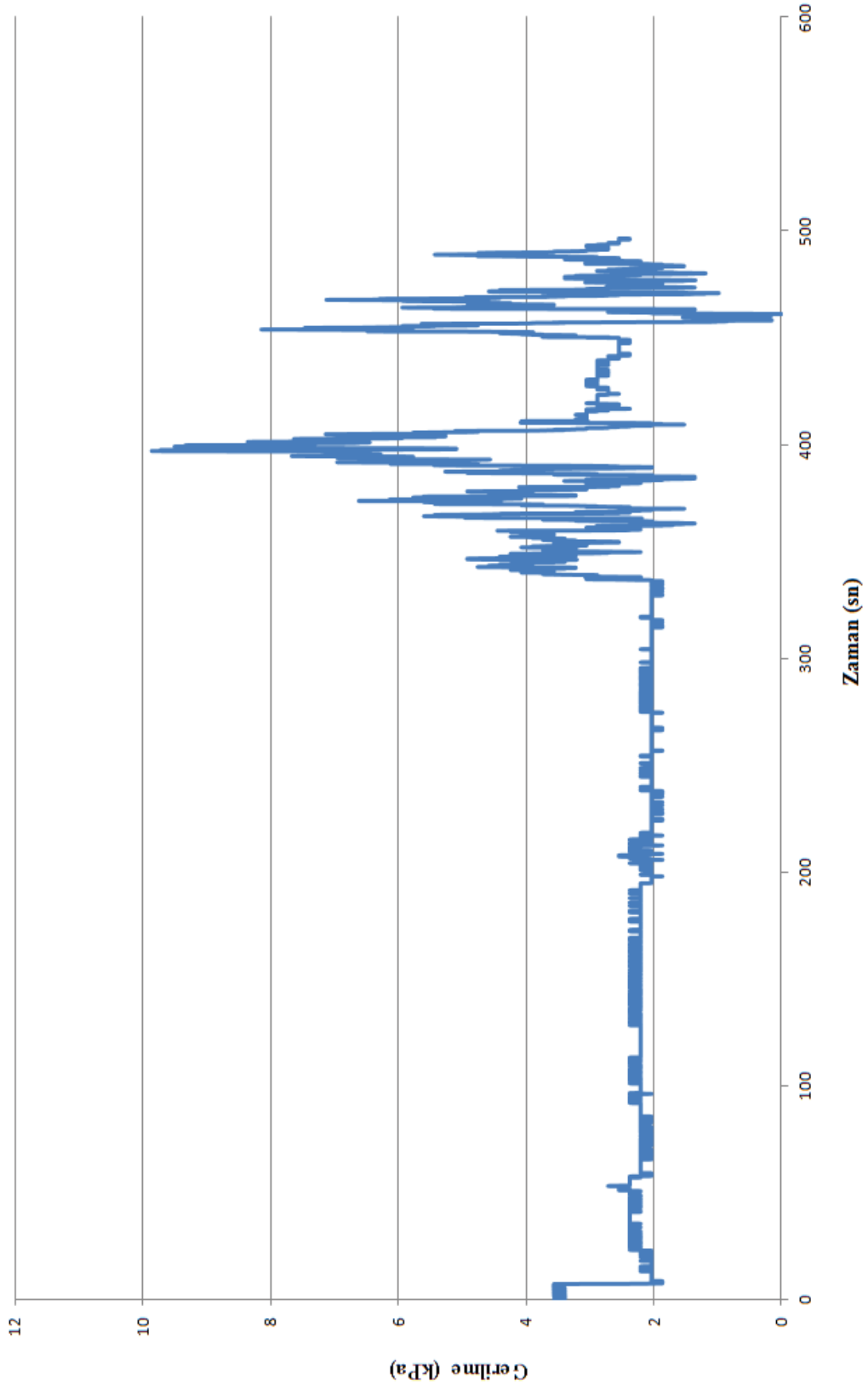
D=0-15mm, $D_r=0.2$, $h=60-70$ cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

Ek C16

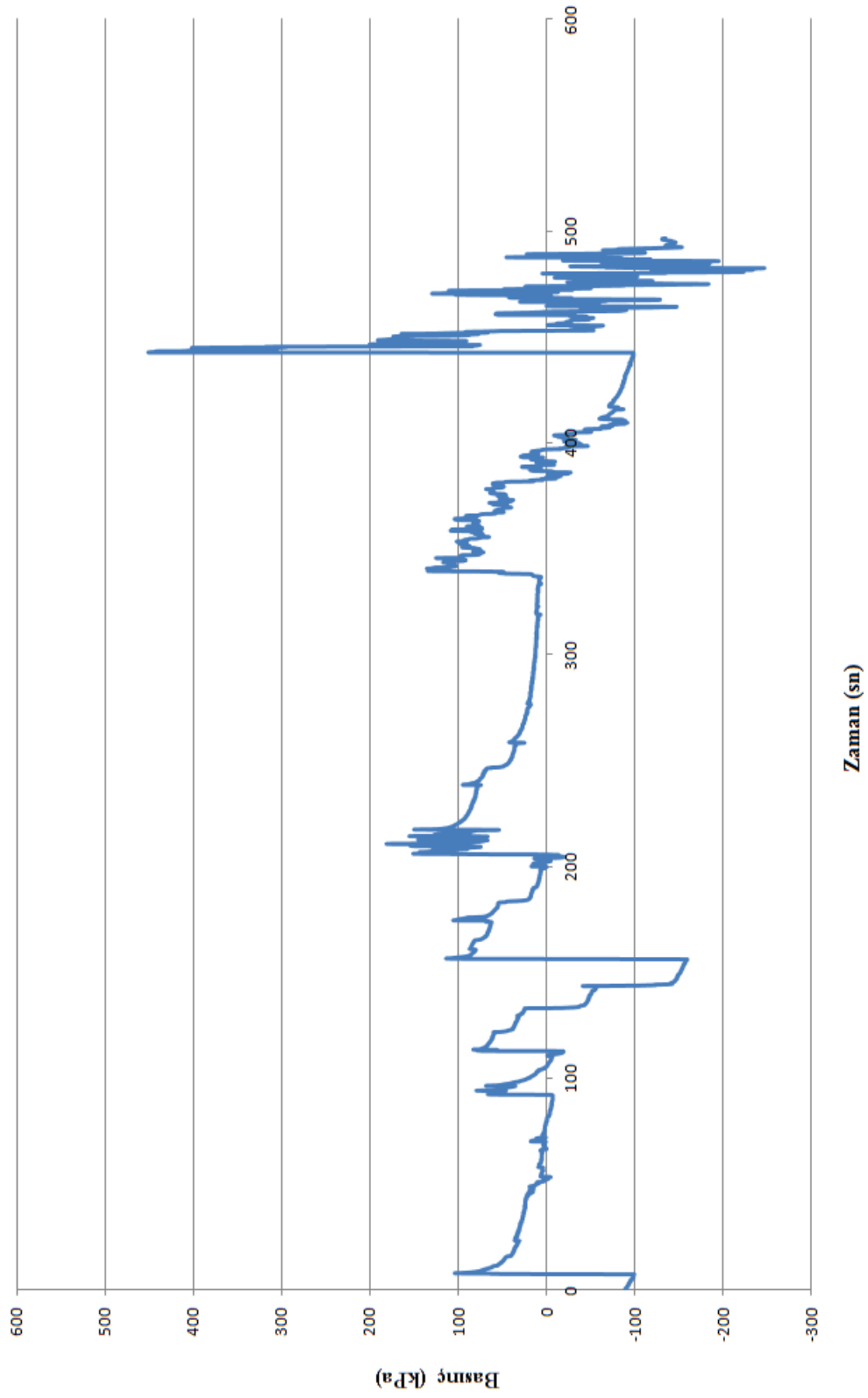
D=0-15mm, Dr=0.2, h=60-70cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği



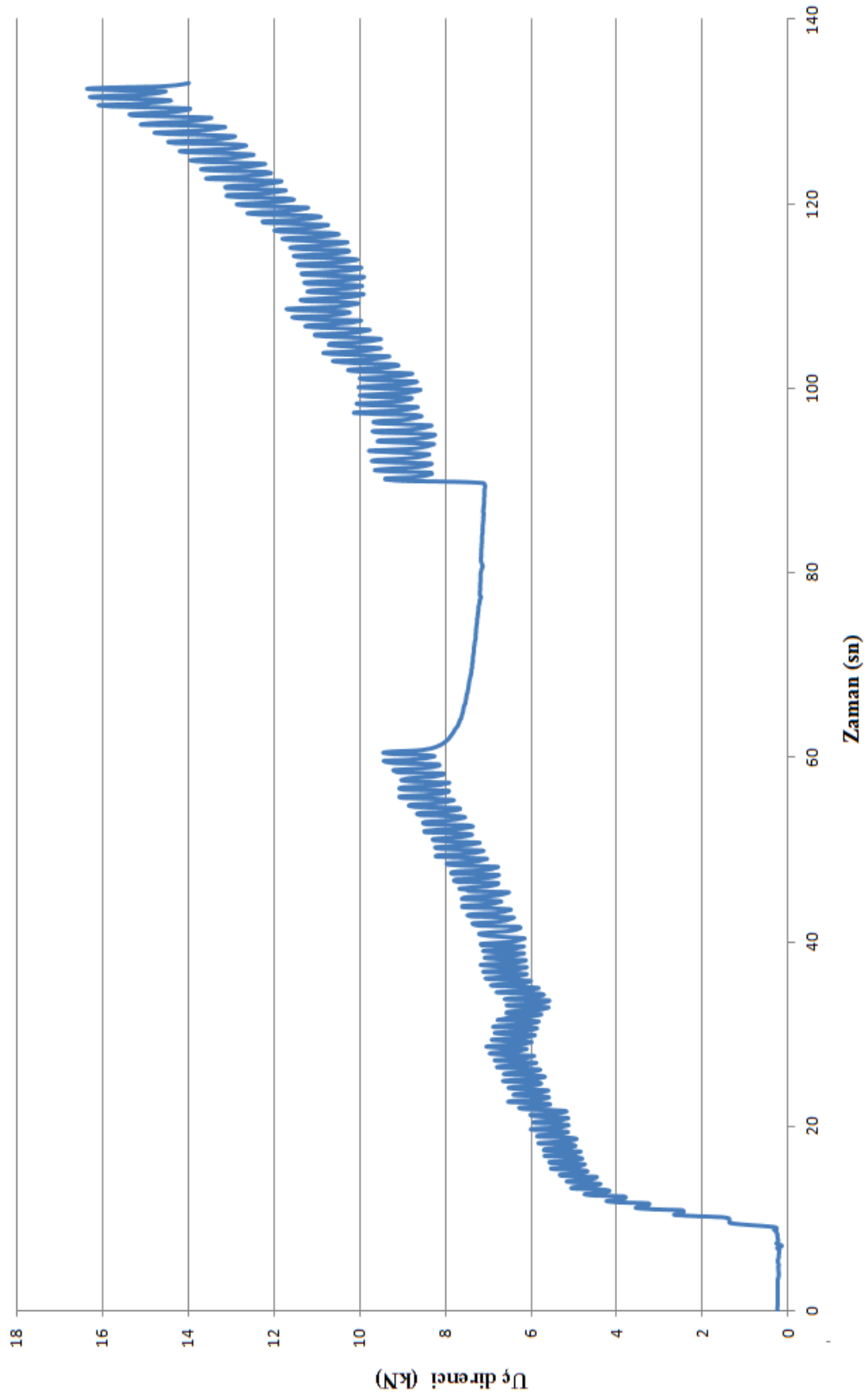
Ek C17

D=0-15mm, $D_r=0.2$, h=60-70cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği

Ek C18

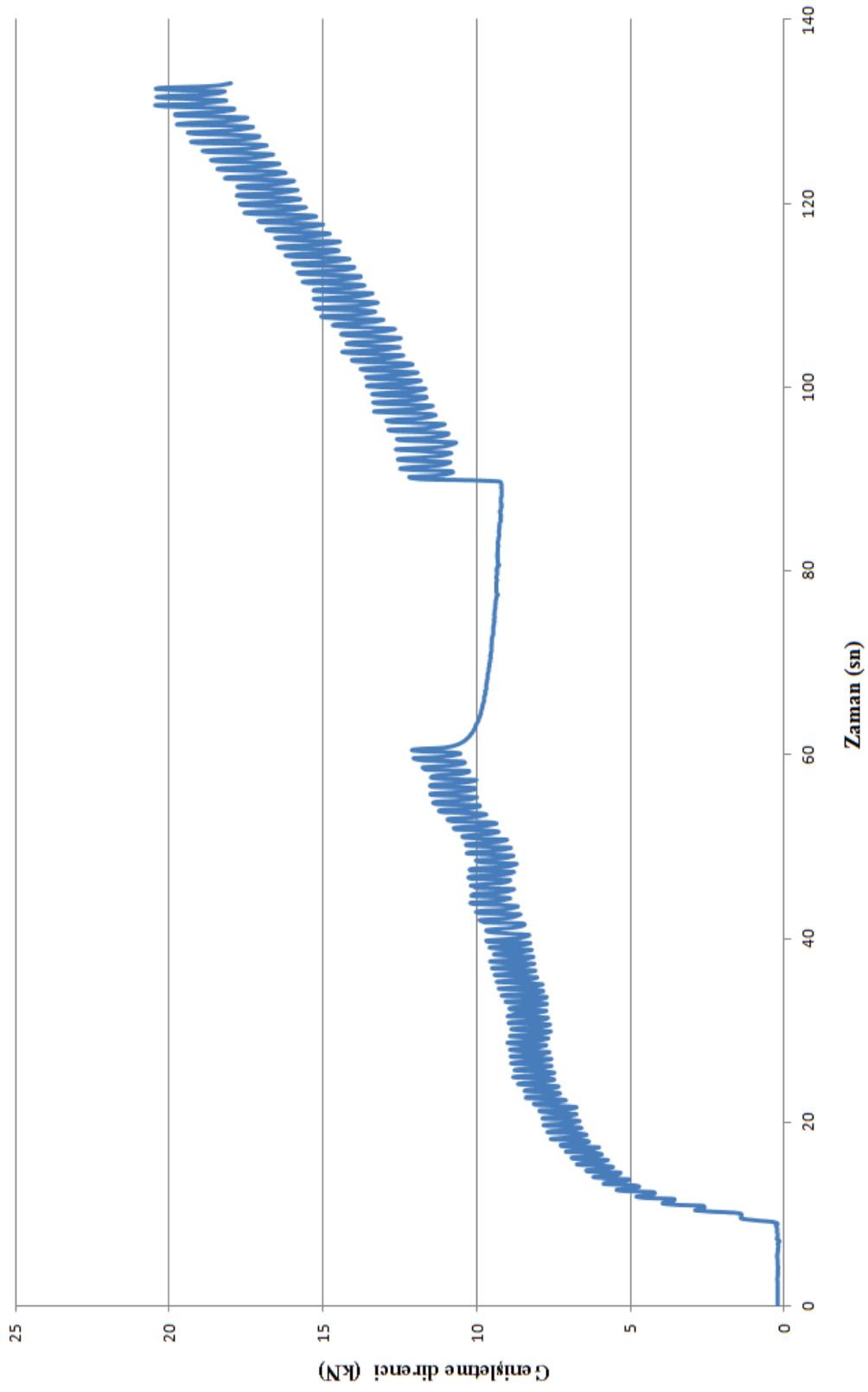
D=0-15mm, Dr=0.2, h=60-70cm için Zaman - Üst ceket çevre basıncı grafiği

Ek C19

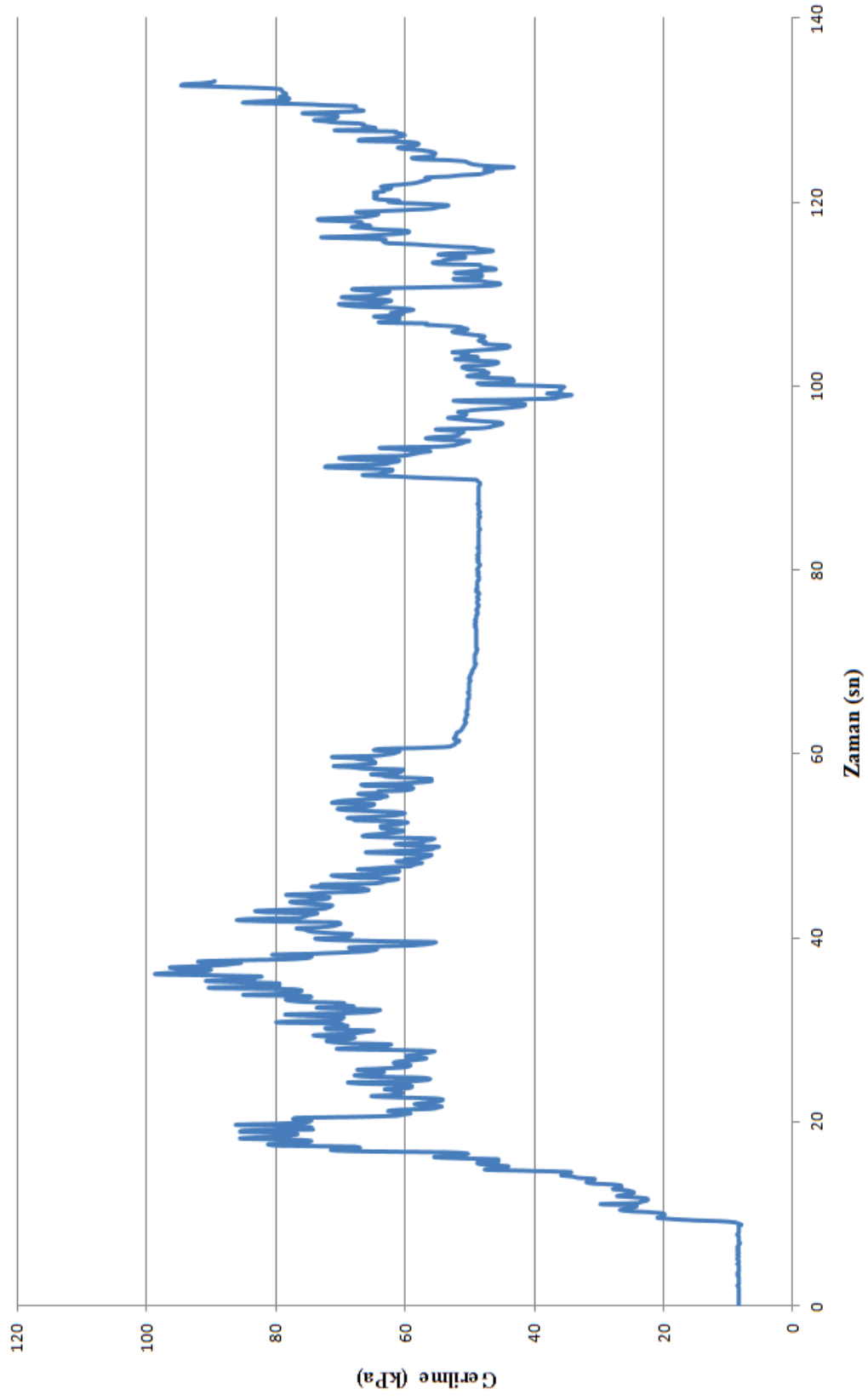
D=0-15mm, Dr=0.2, h=70-80cm için Zaman - Uç direnci grafiği

Ek C20

D=0-15mm, $D_r=0.2$, $h=70-80$ cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği

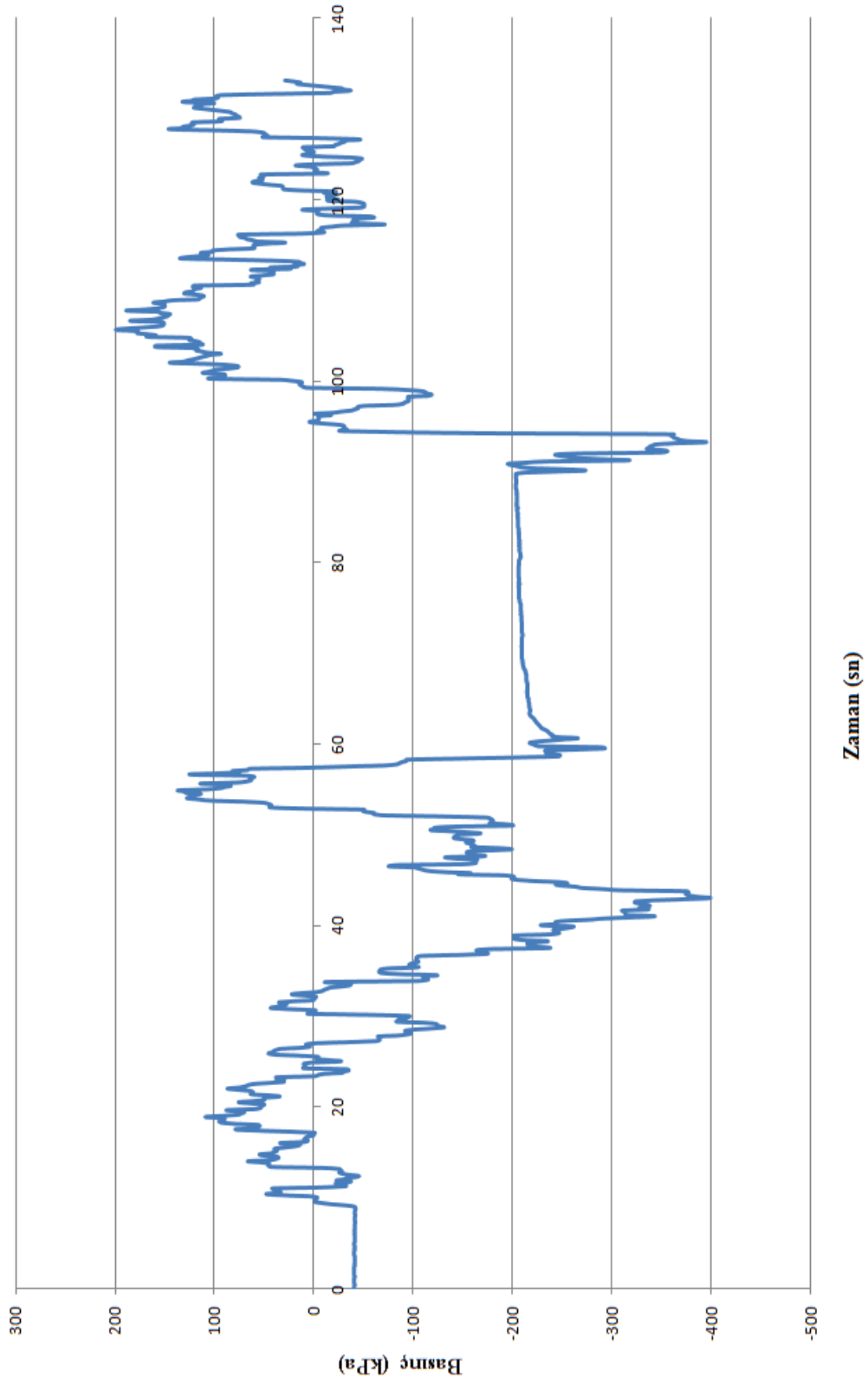


Ek C21

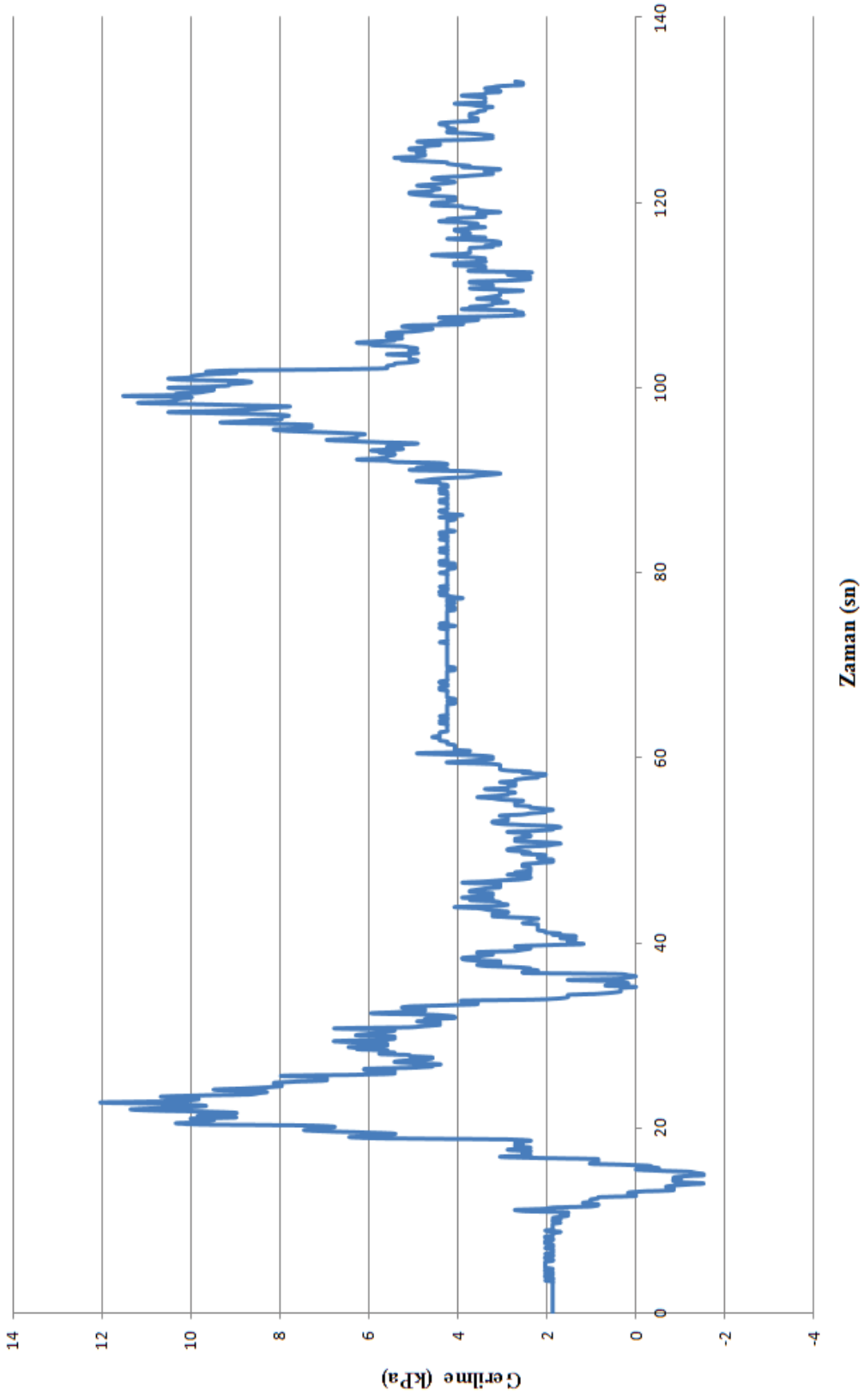
D=0-15mm, $D_r=0.2$, h=70-80cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

Ek C22

D=0-15mm, Dr=0.2, h=70-80cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

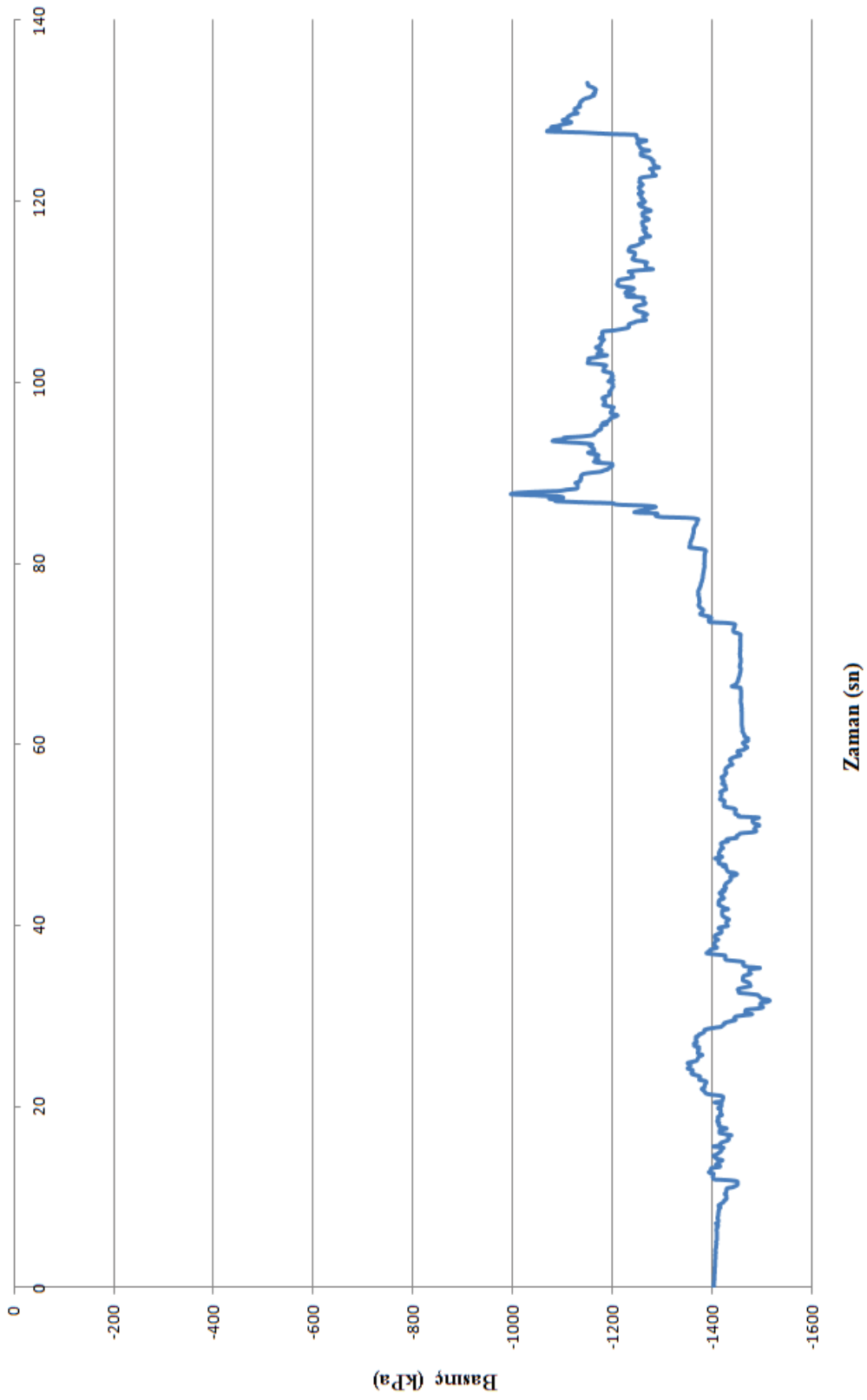


D=0-15mm, Dr=0.2, h=70-80cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği



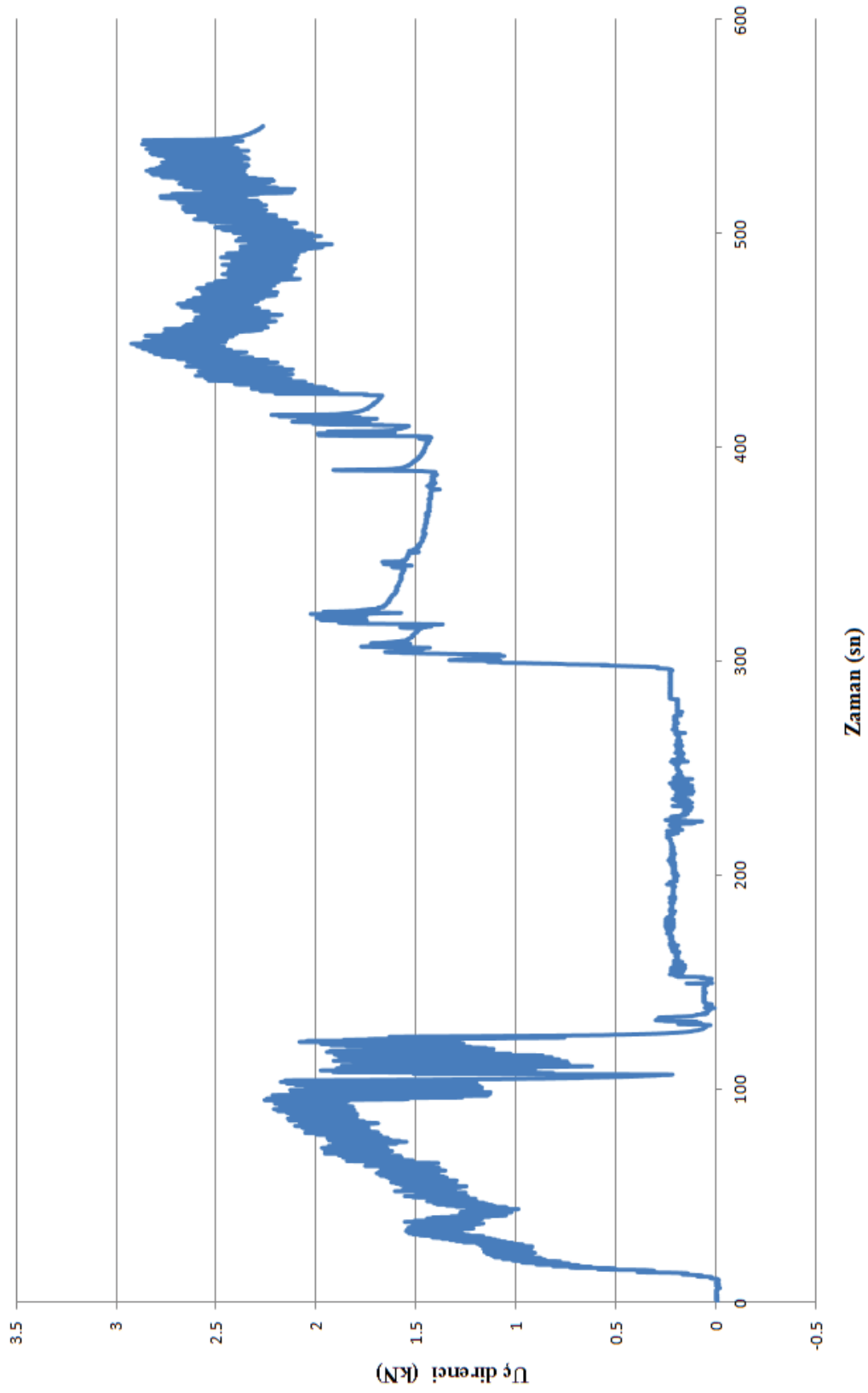
Zaman (sn)

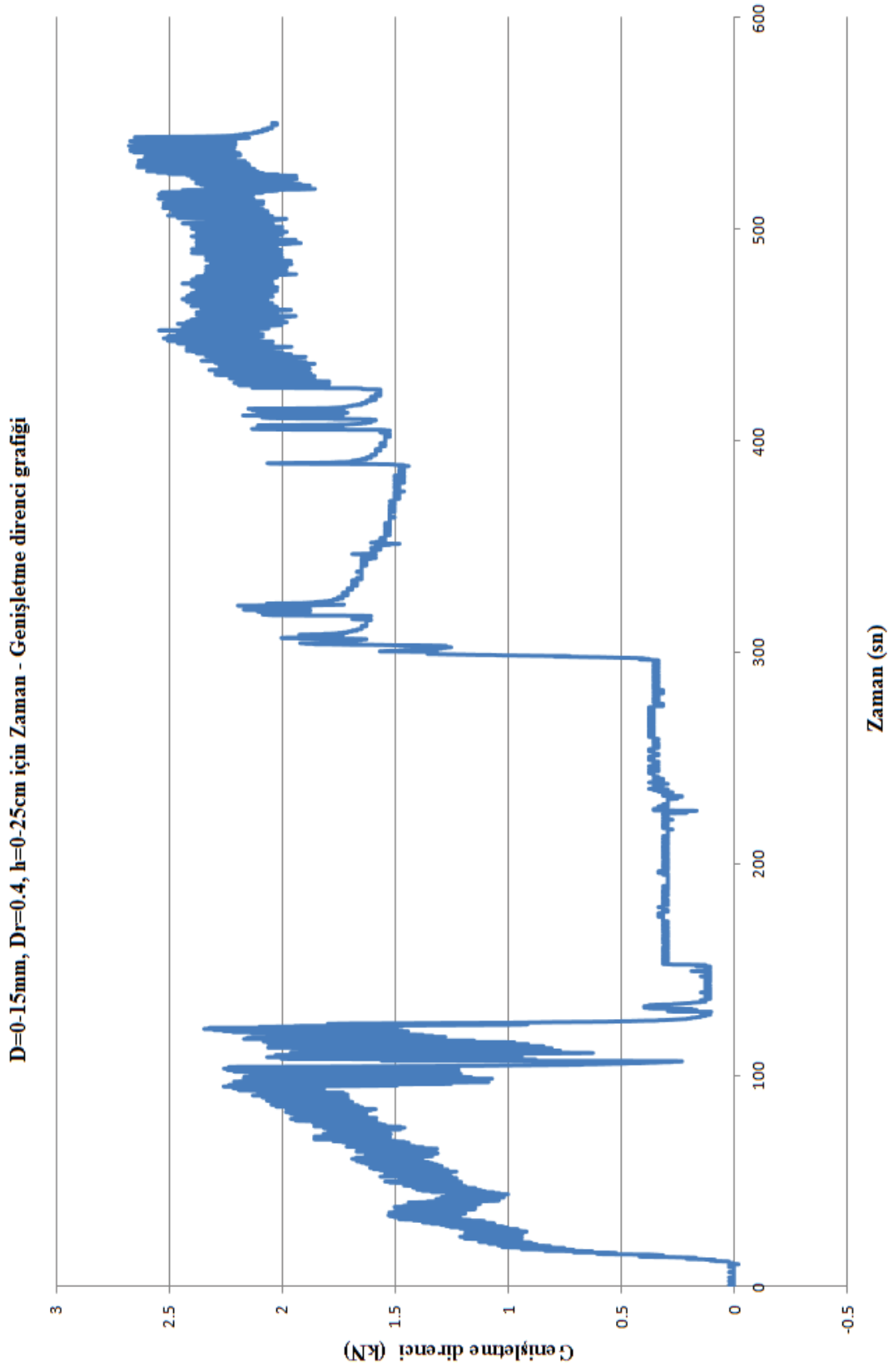
Ek C24

D=0-15mm, Dr=0.2, h=70-80cm için Zaman - Üst çeket çevre basıncı grafiği

Ek C25

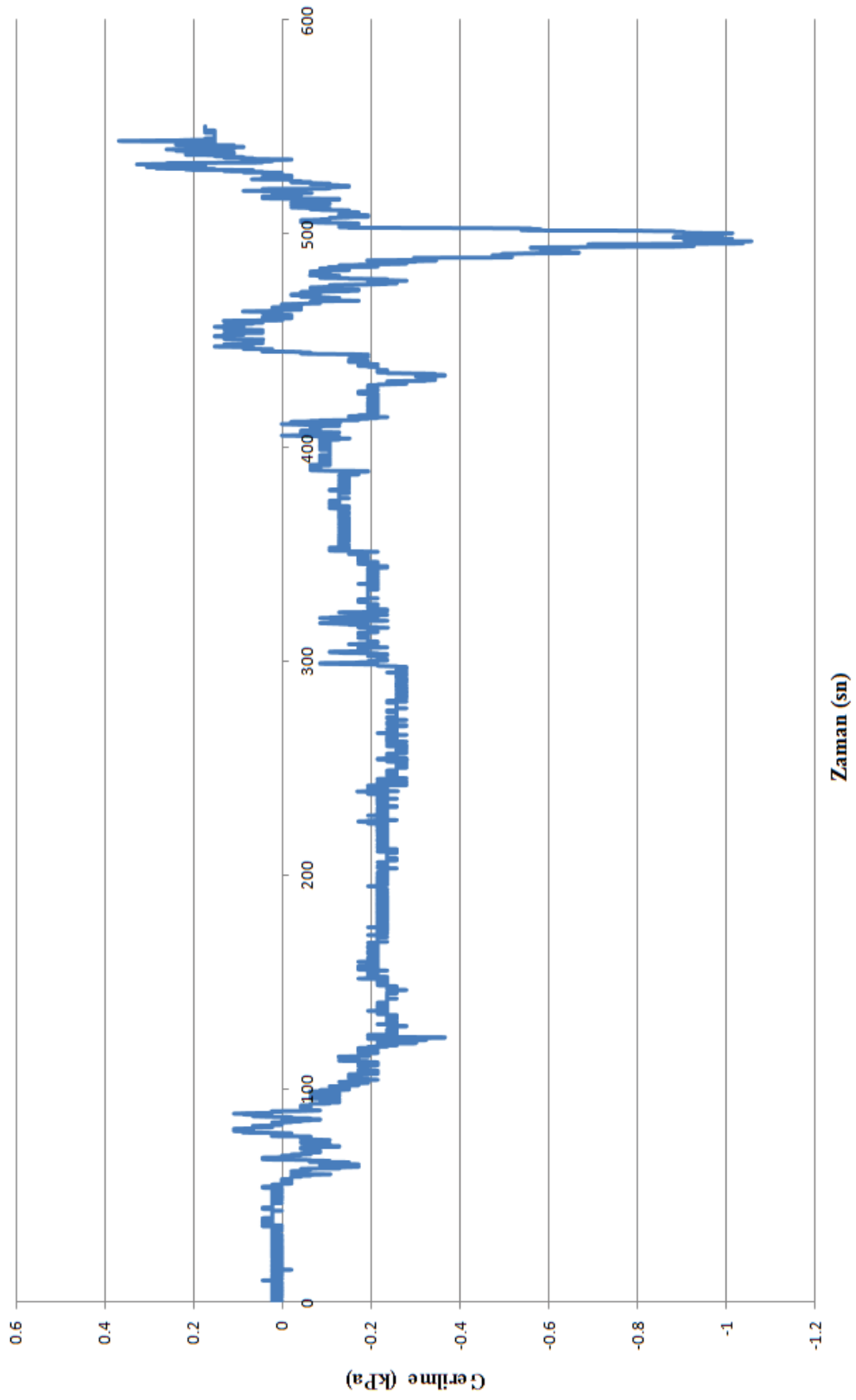
D=0-15mm, Dr=0.4, h=0-25cm için Zaman - Uç direnci grafiği



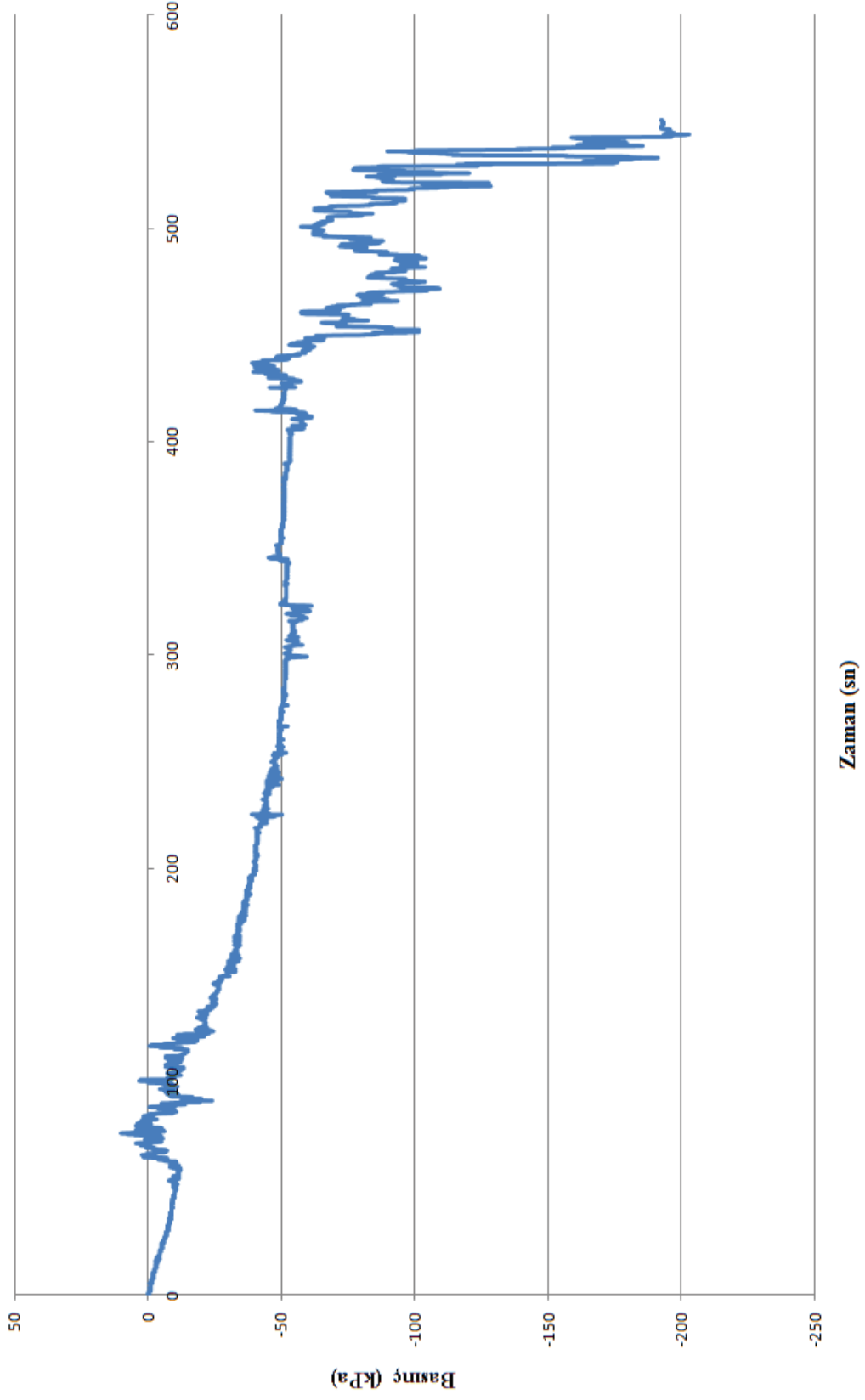


Ek C27

D=0-15mm, Dr=0.4, h=0-25cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

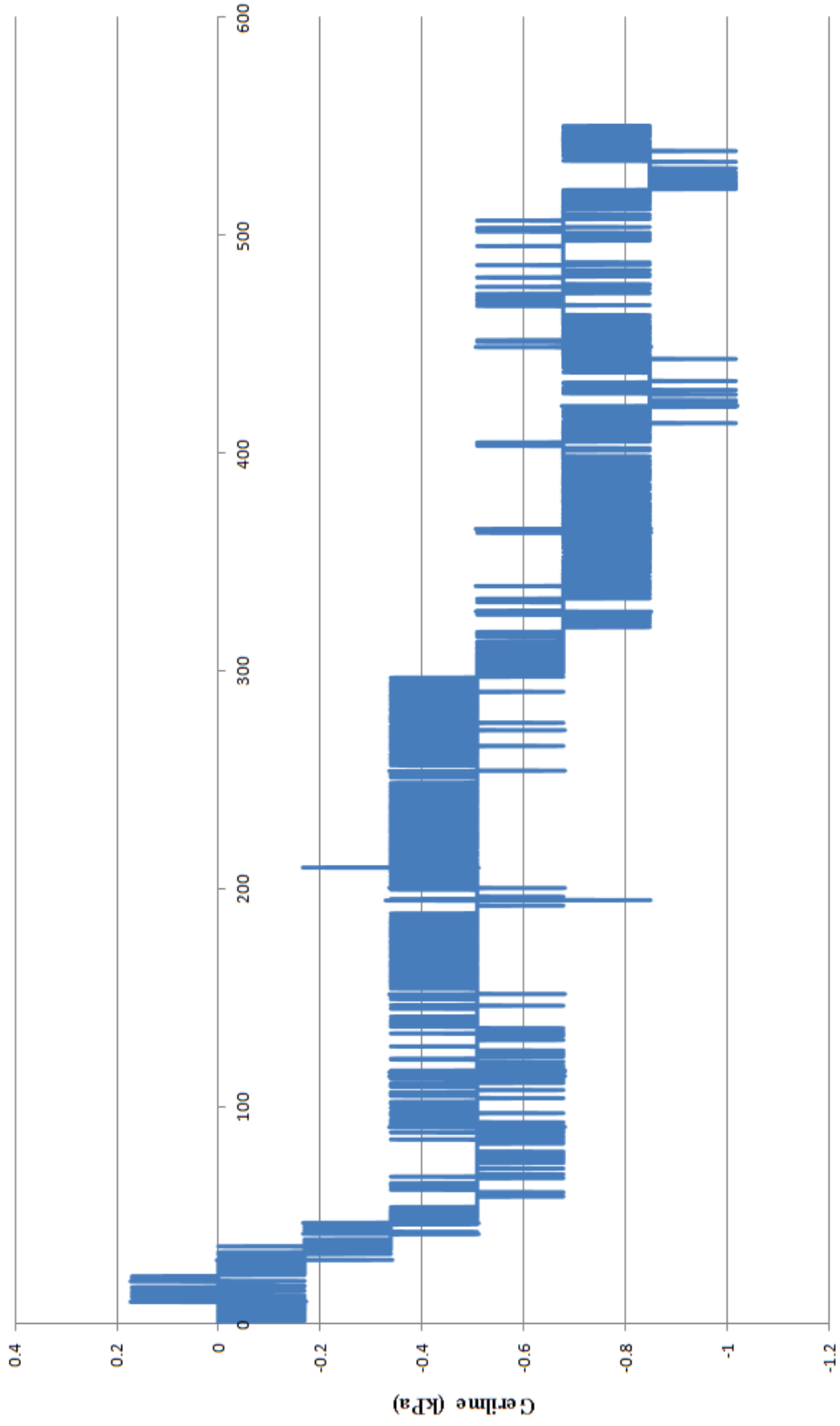


D=0-15mm, Dr=0.4, h=0-25cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği



Ek C29

D=0-15mm, Dr=0.4, h=0-25cm için Zaman - Üst cekef kayma gerilmesi grafiği

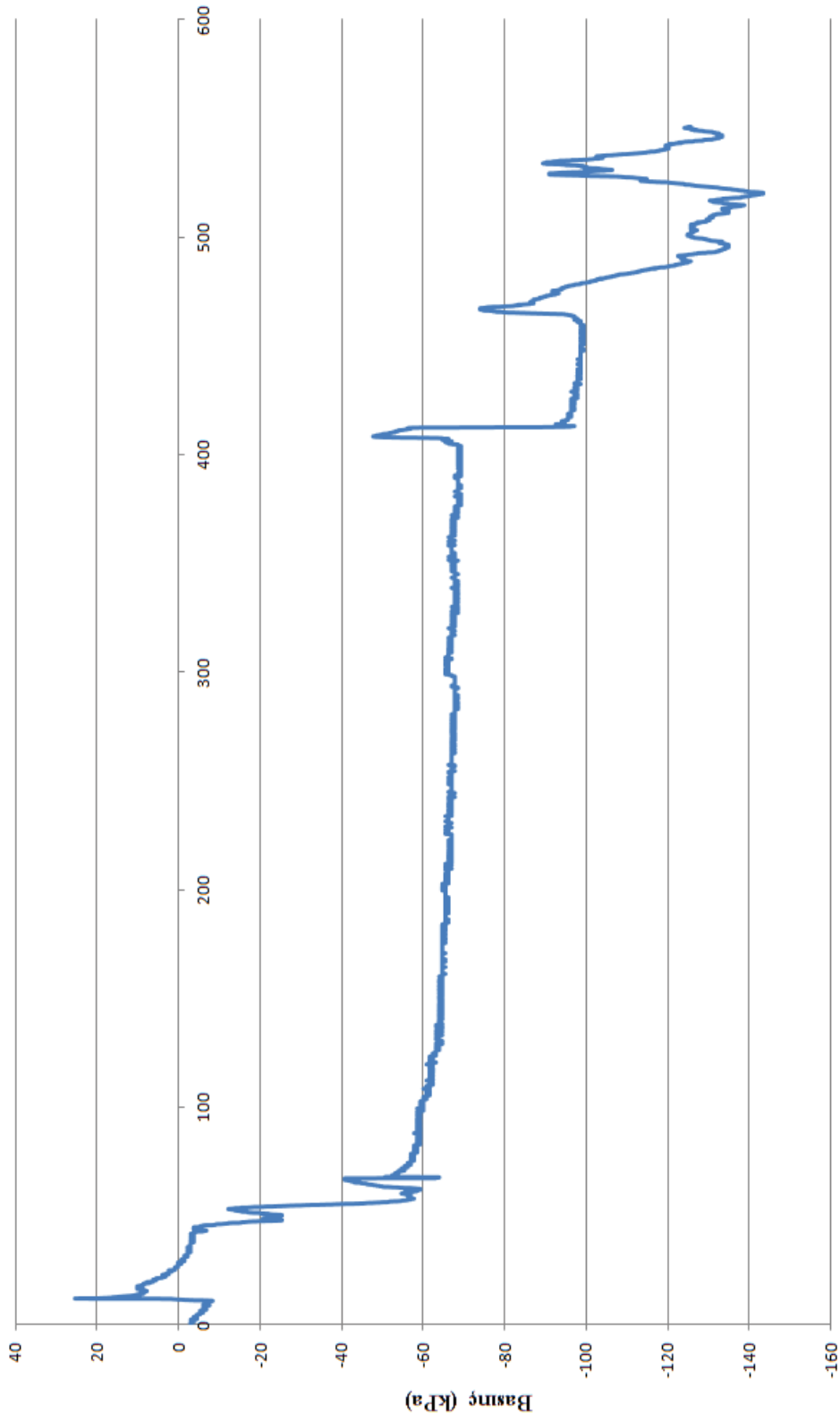


Zaman (sn)

Gerilme (kPa)

Ek C30

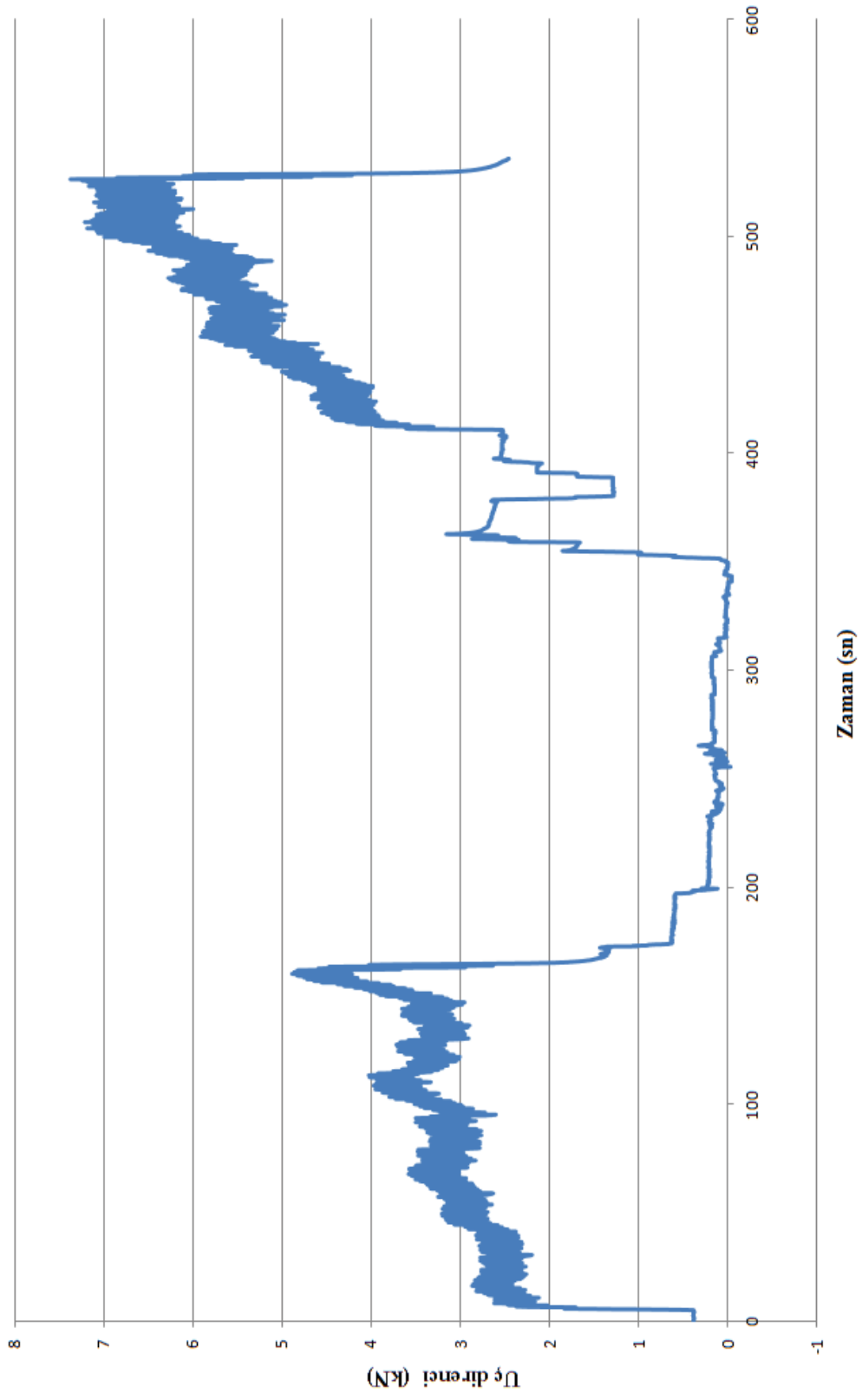
D=0-15mm, Dr=0.4, h=0-25cm için Zaman - Üst ceket çevre basıncı grafiği



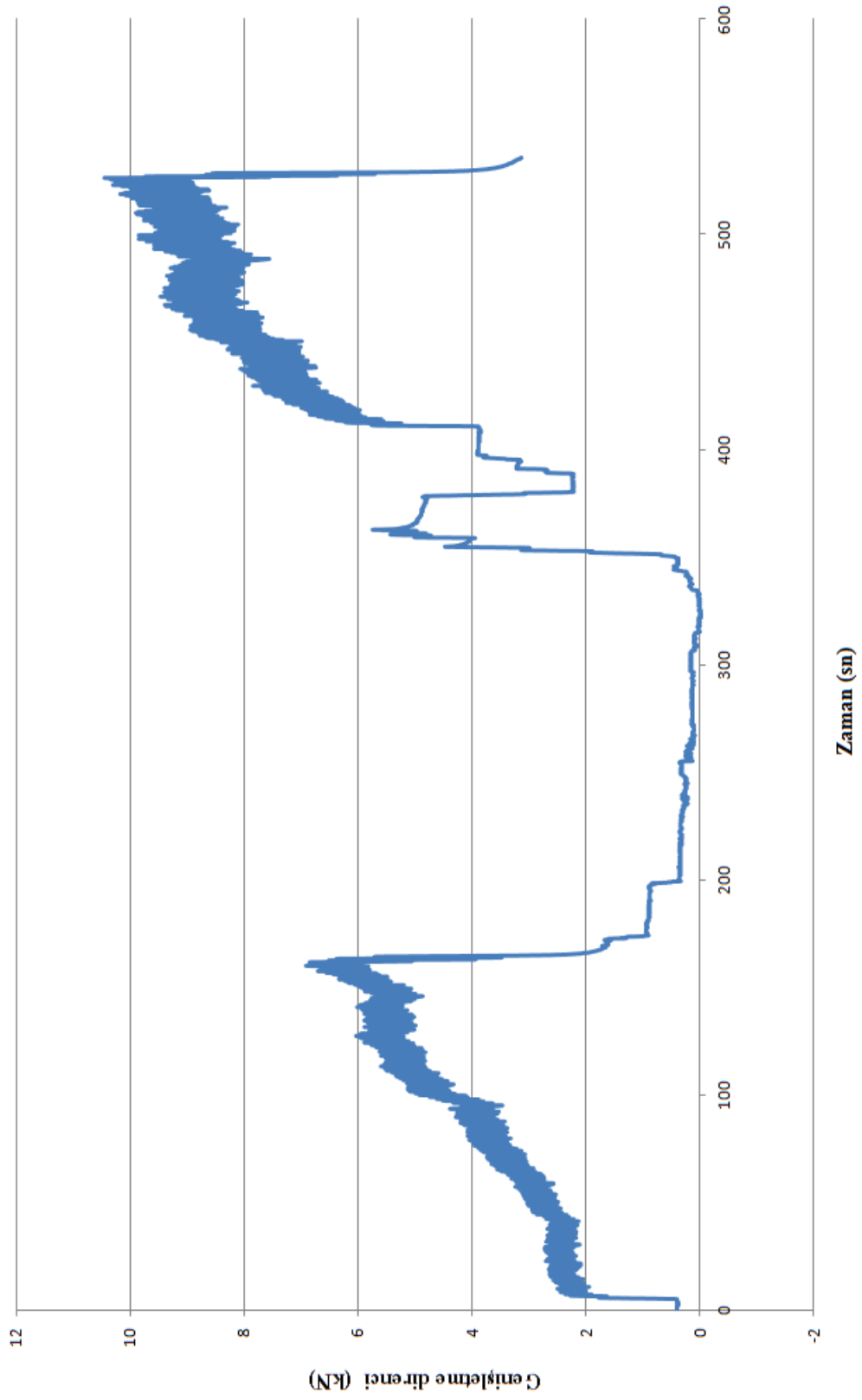
Zaman (sn)

Ek C31

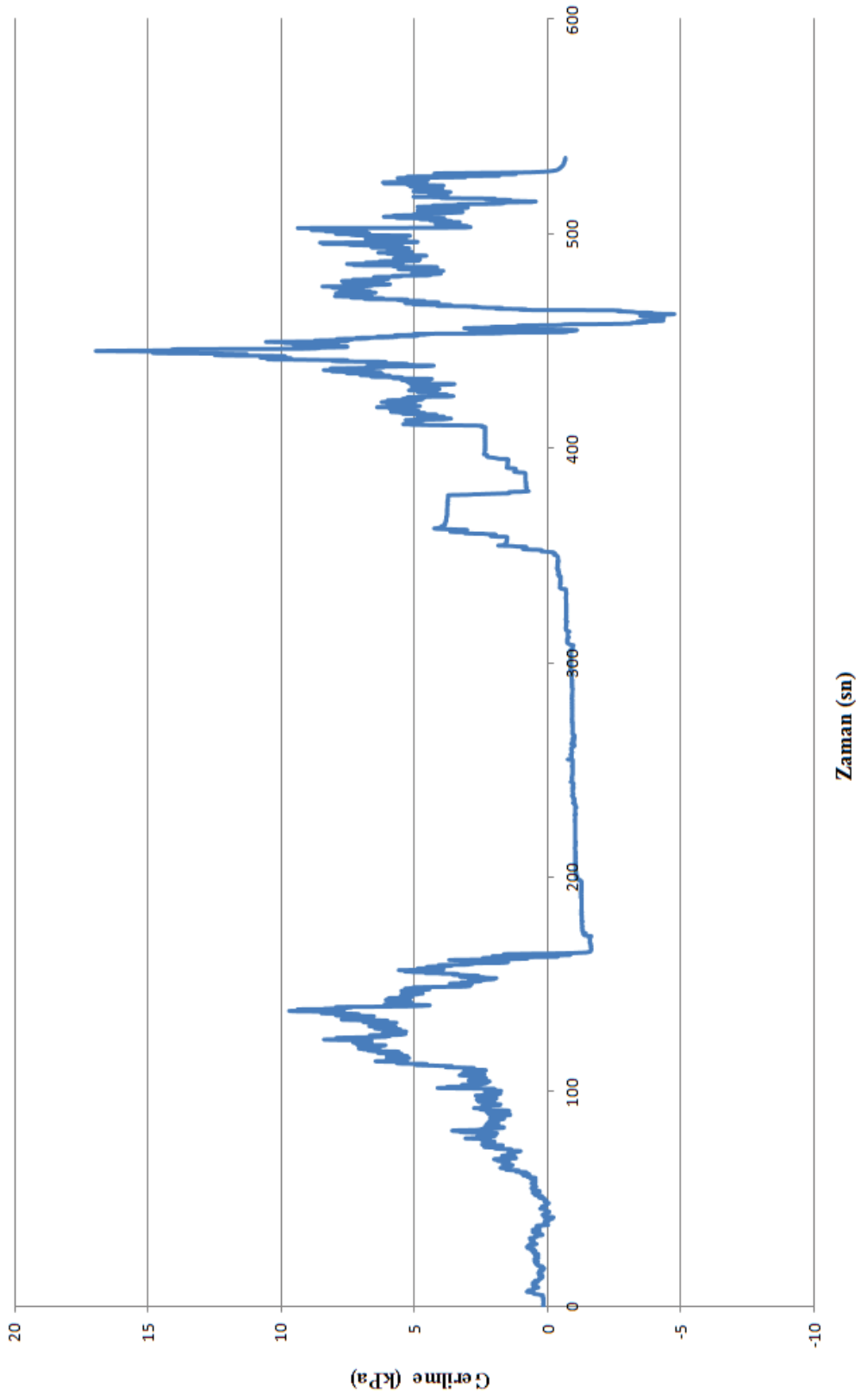
D=0-15mm, Dr=0.4, h=25-60cm için Zaman - Uç direnci grafiği



Ek C32

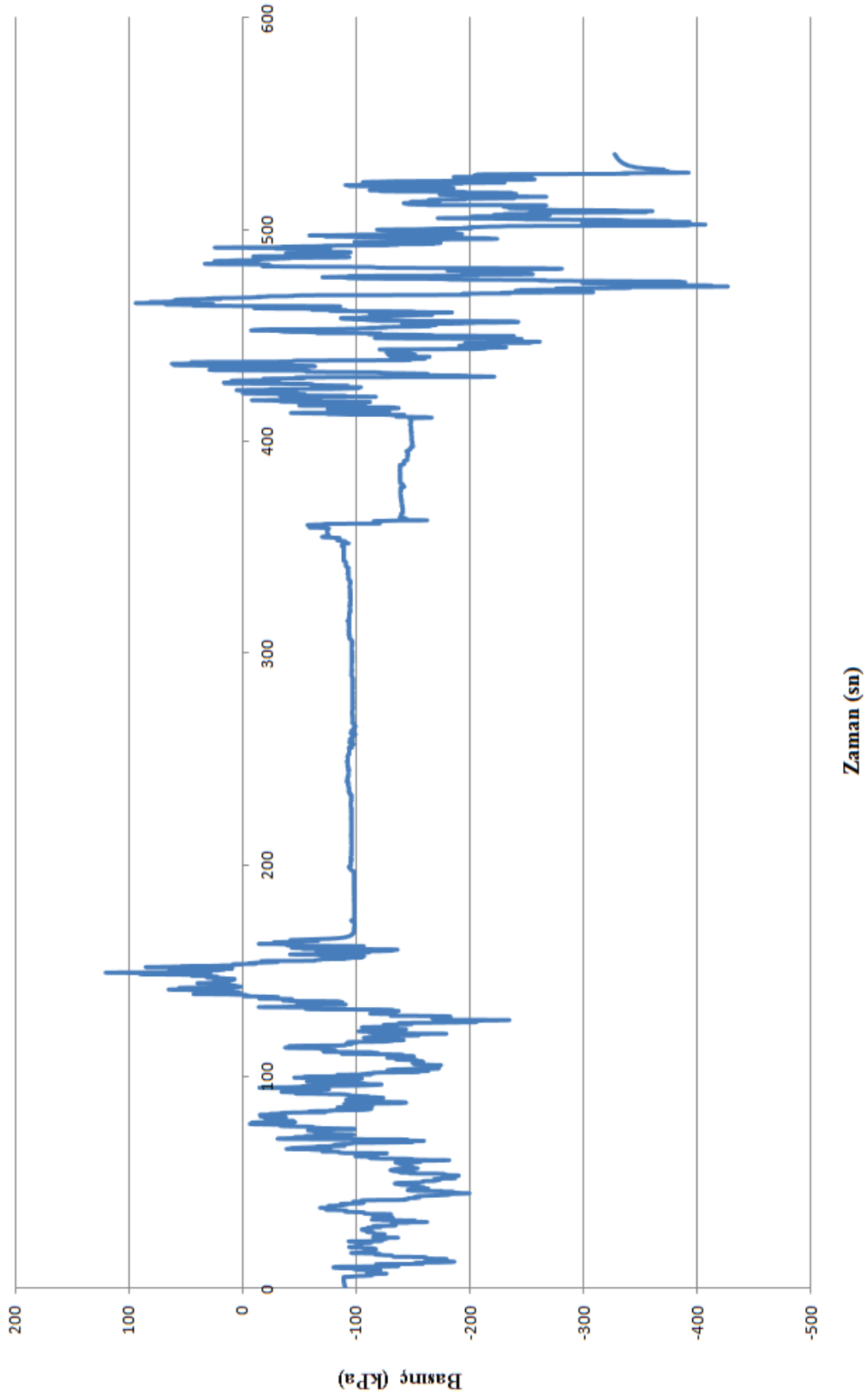
D=0-15mm, $D_r=0.4$, h=25-60cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği

Ek C33

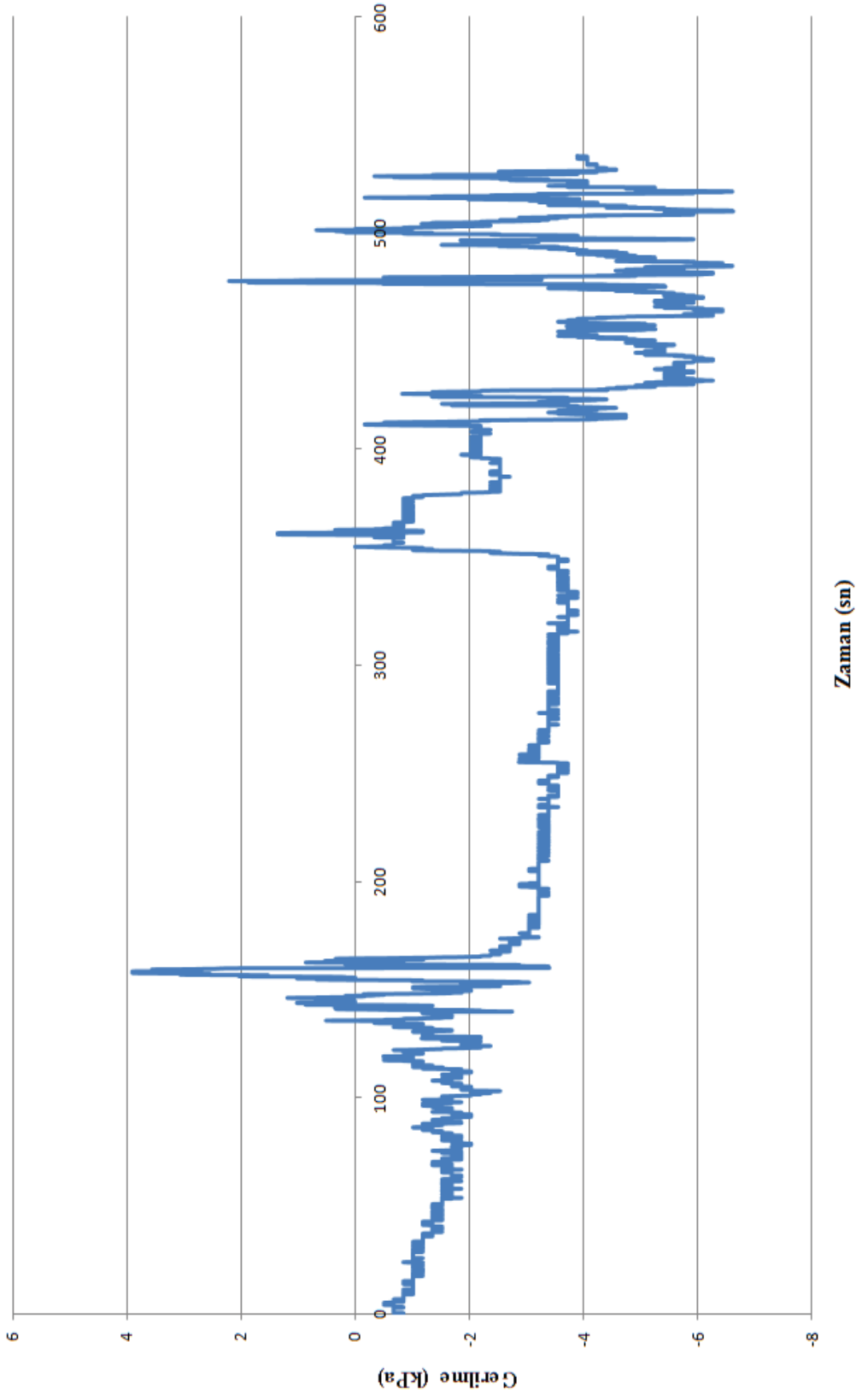
D=0.15mm, Dr=0.4, h=25-60cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

Ek C34

D=0-15mm, Dr=0.4, h=25-60cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

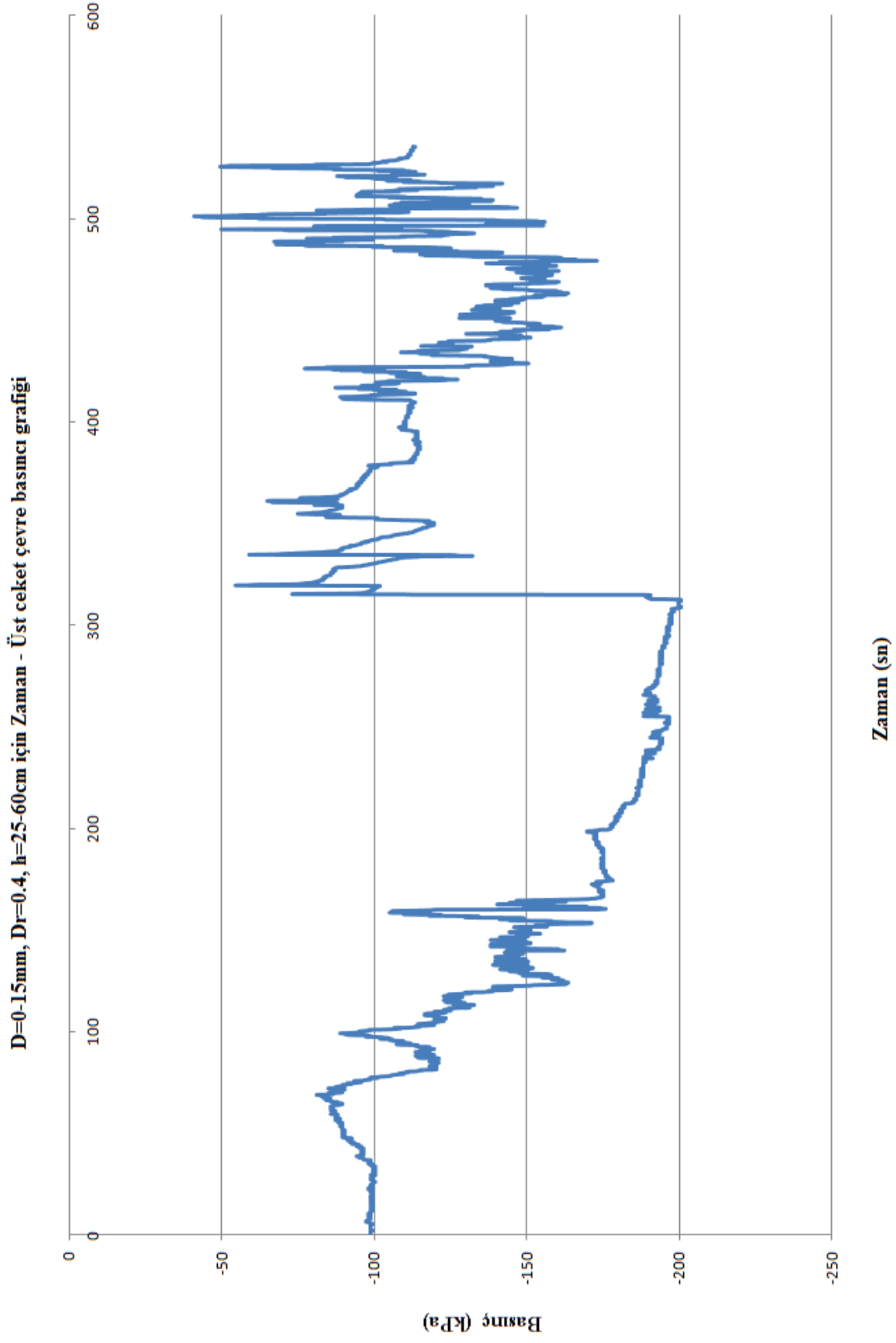


D=0-15mm, $D_r=0.4$, h=25-60cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği



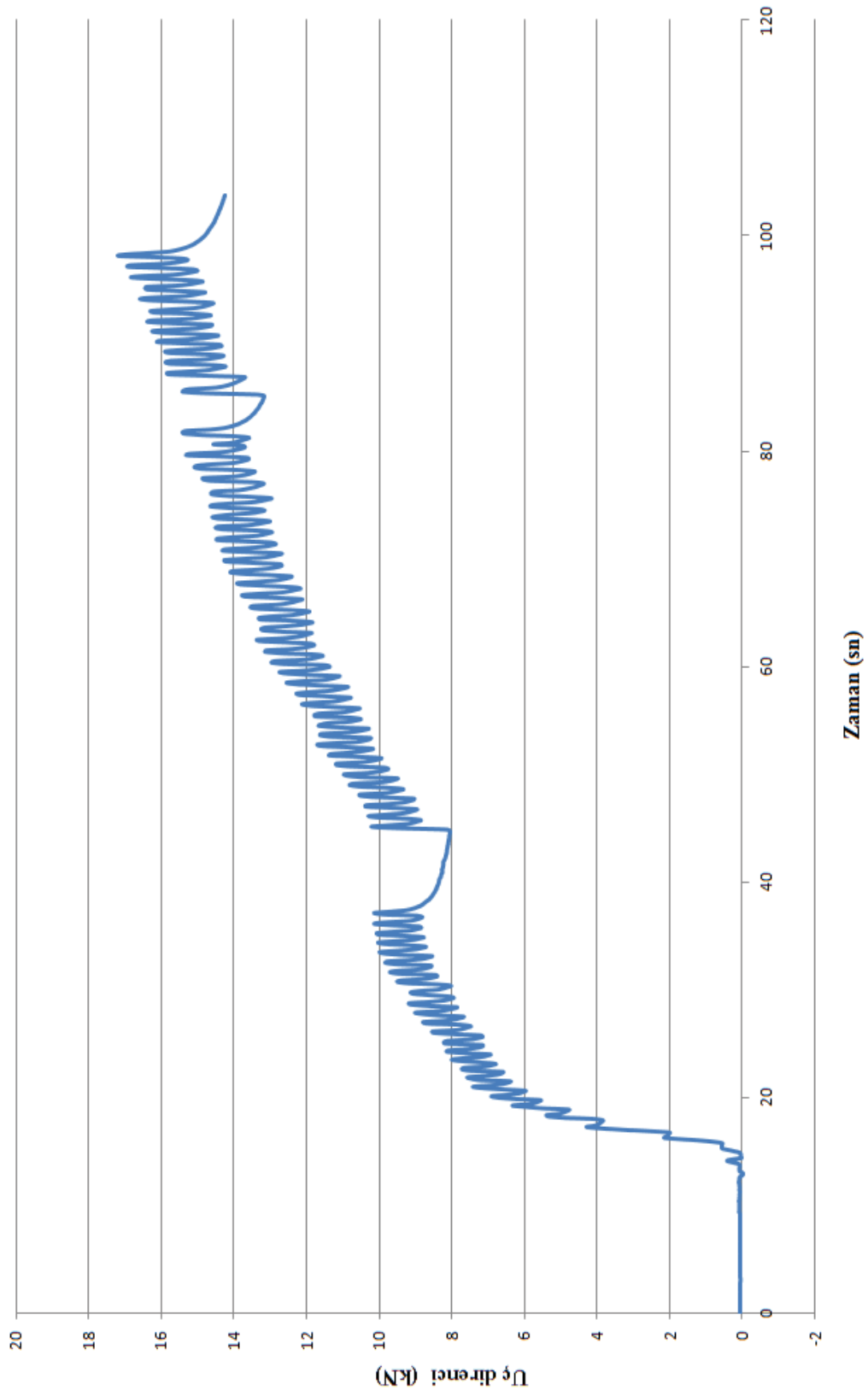
Zaman (sn)

Ek C36

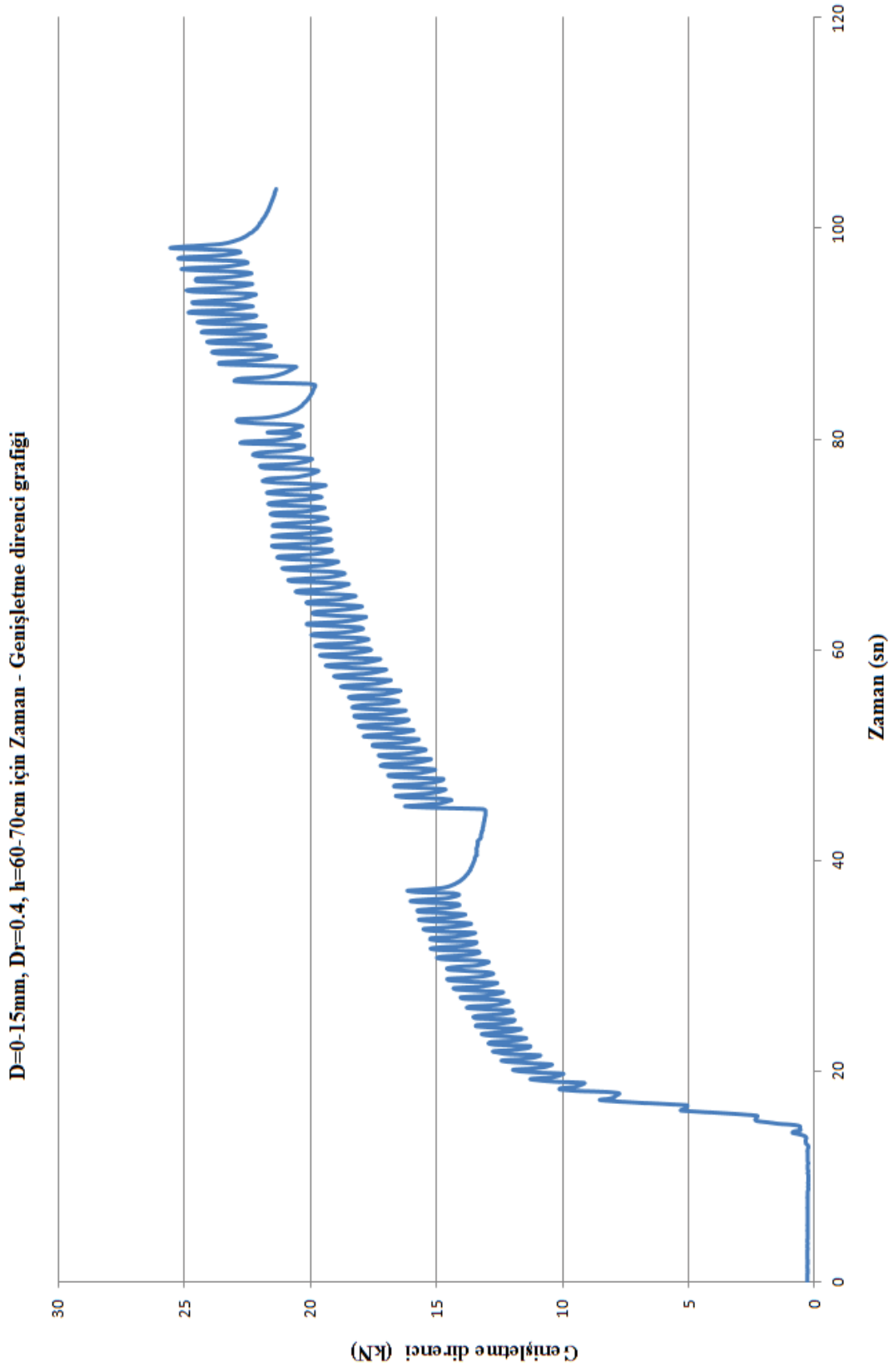


Ek C37

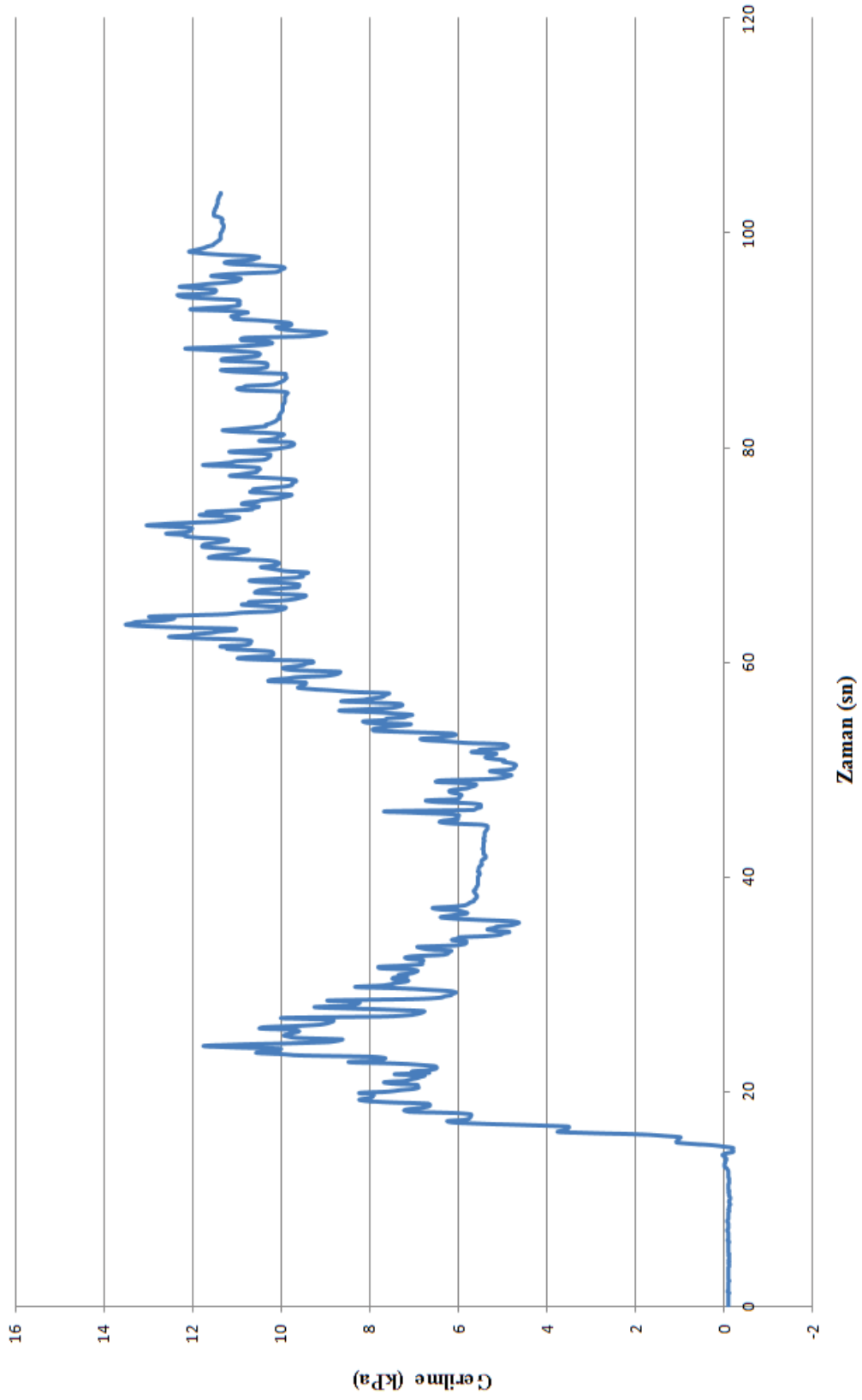
D=0-15mm, Dr=0.4, h=60-70cm için Zaman - Uç direnci grafiği



Ek C38

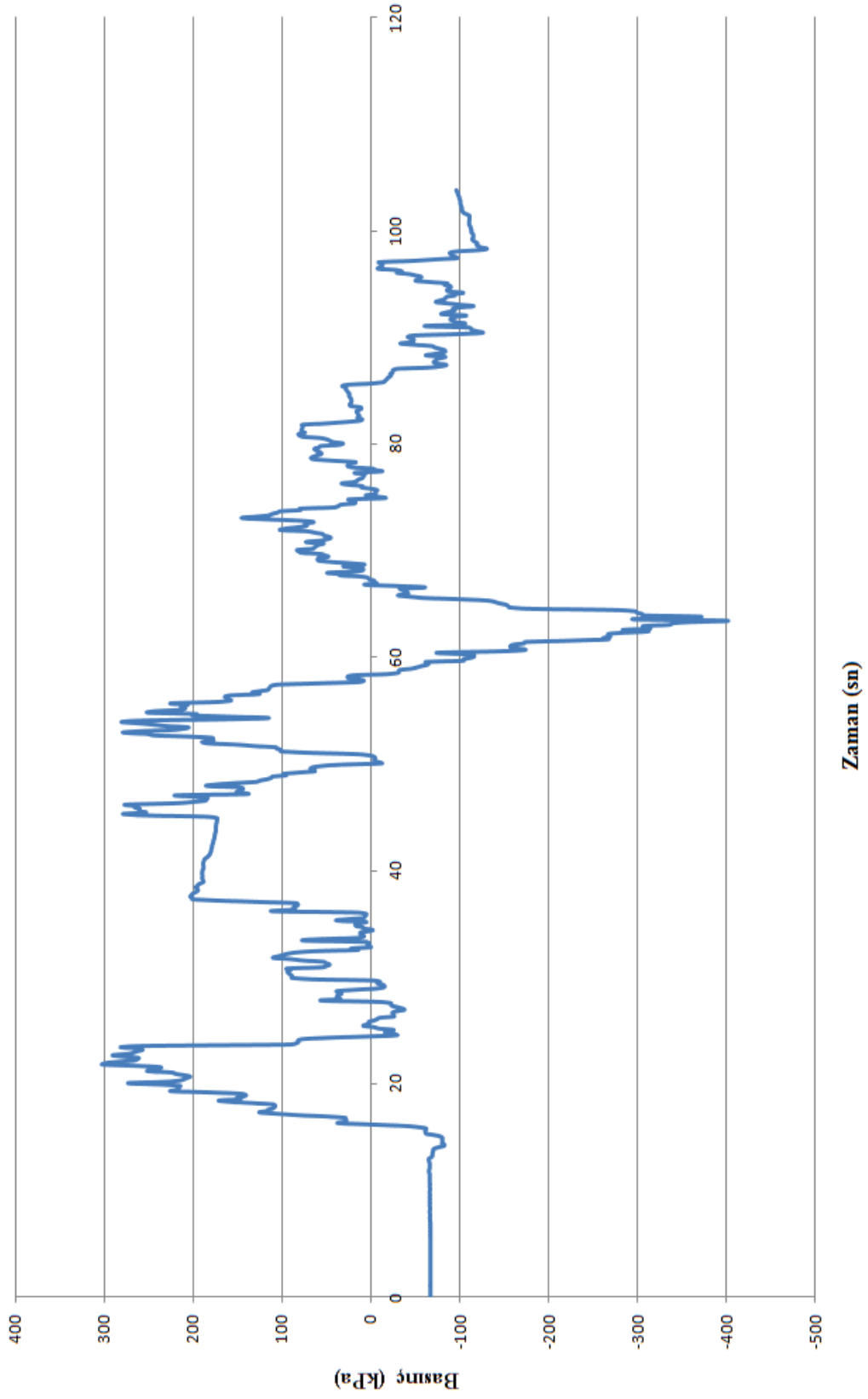


Ek C39

D=0-15mm, $D_r=0.4$, h=60-70cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

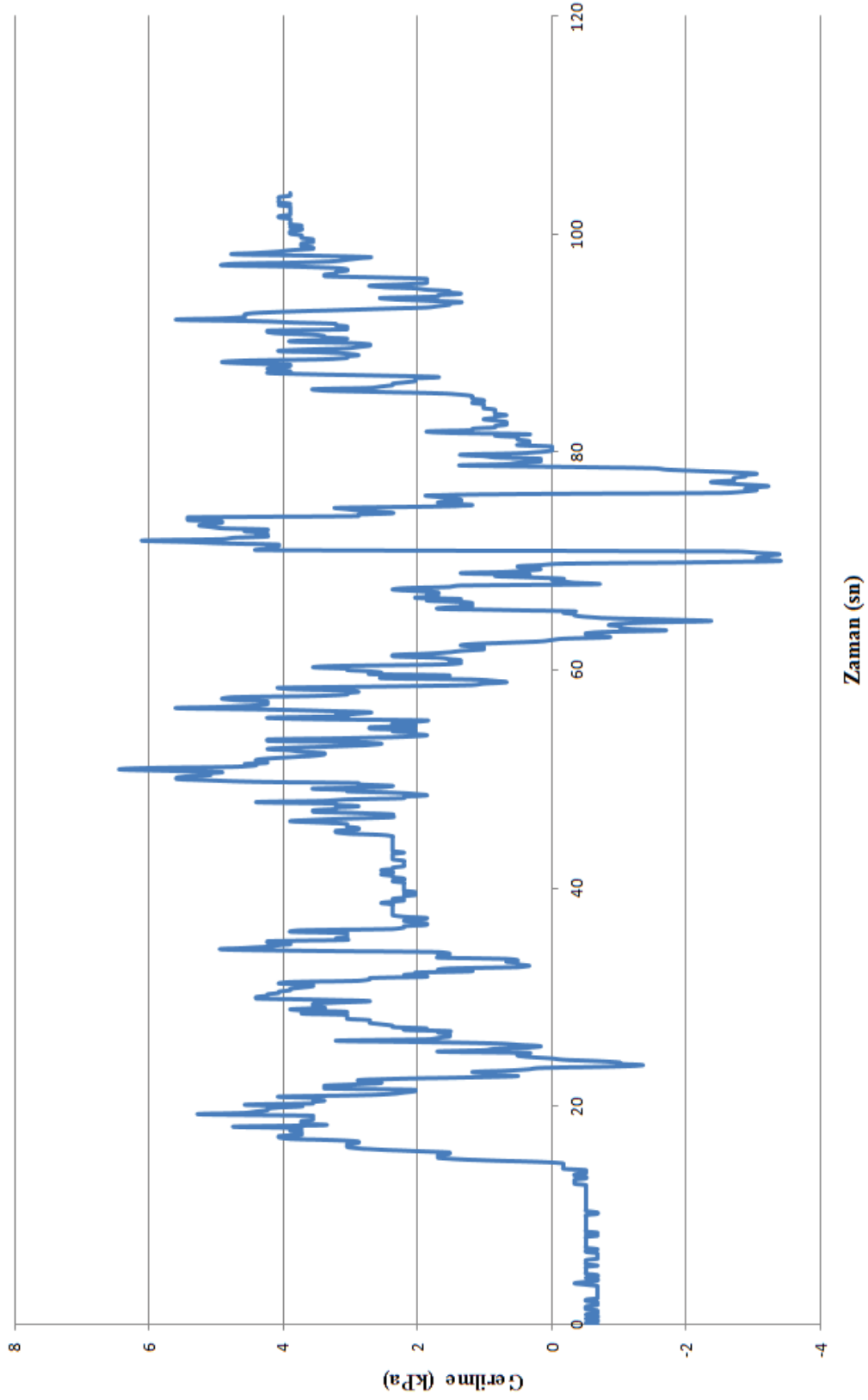
Ek C40

D=0-15mm, $D_r=0.4$, h=60-70cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

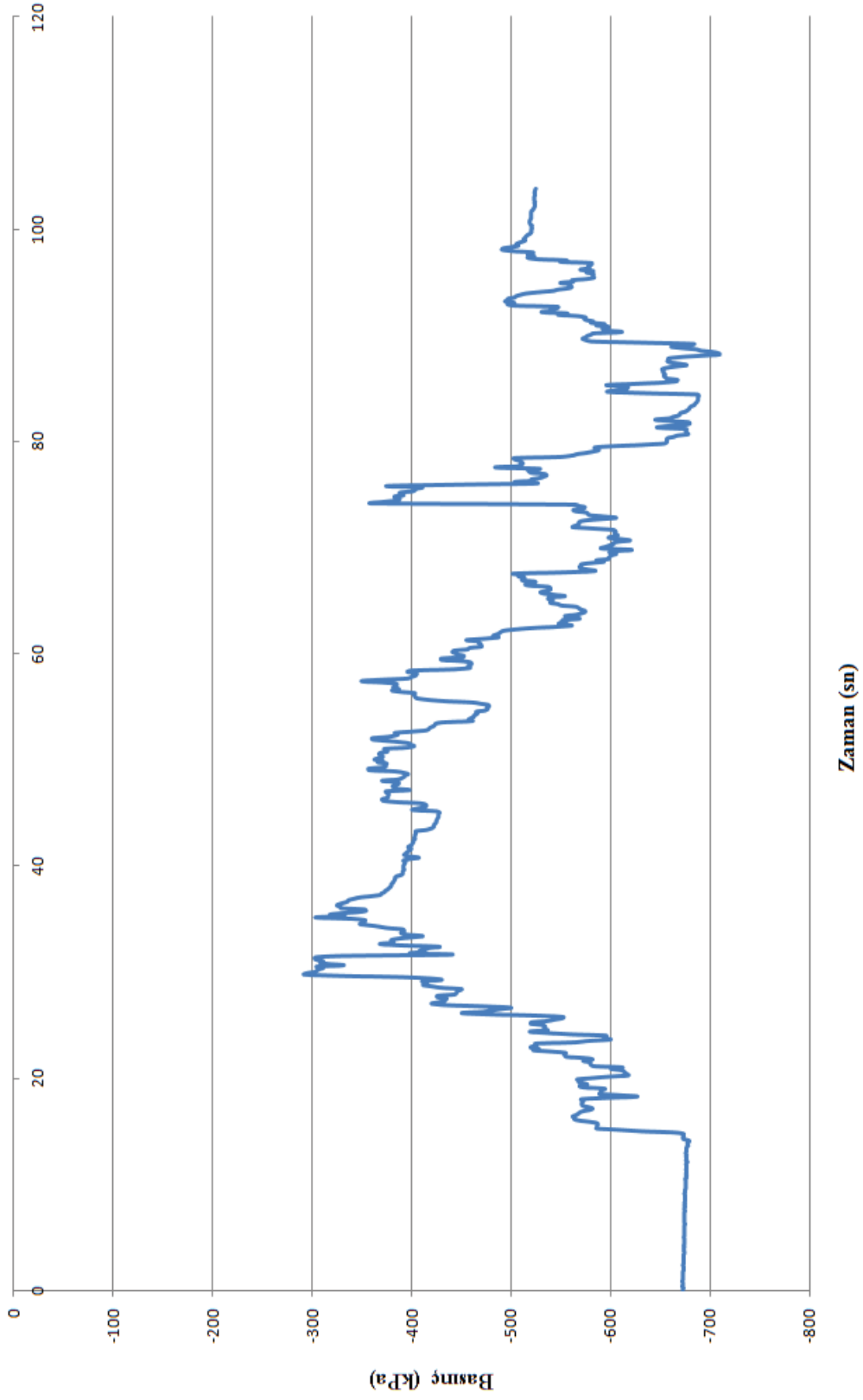


Ek C41

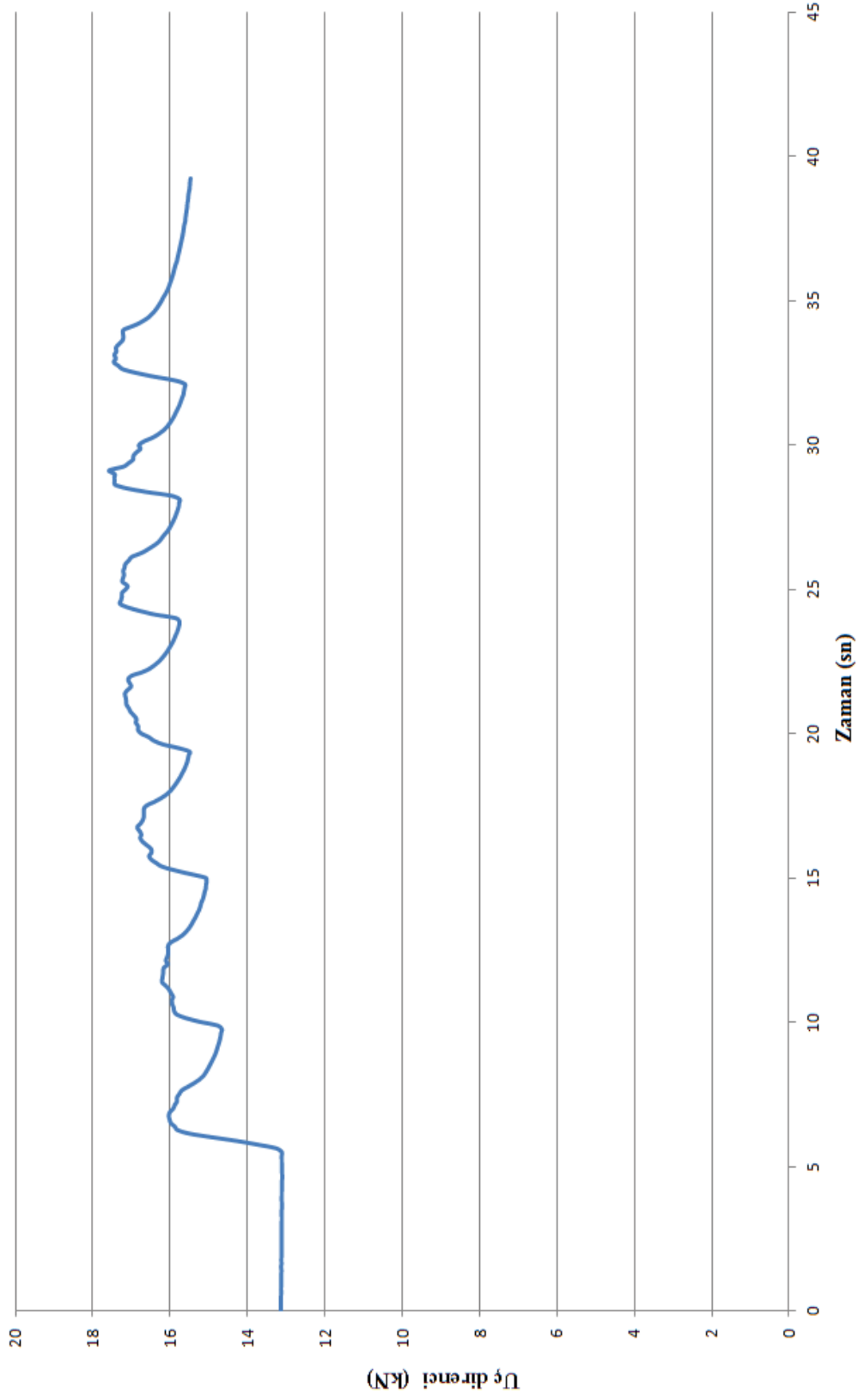
D=0-15mm, Dr=0.4, h=60-70cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği



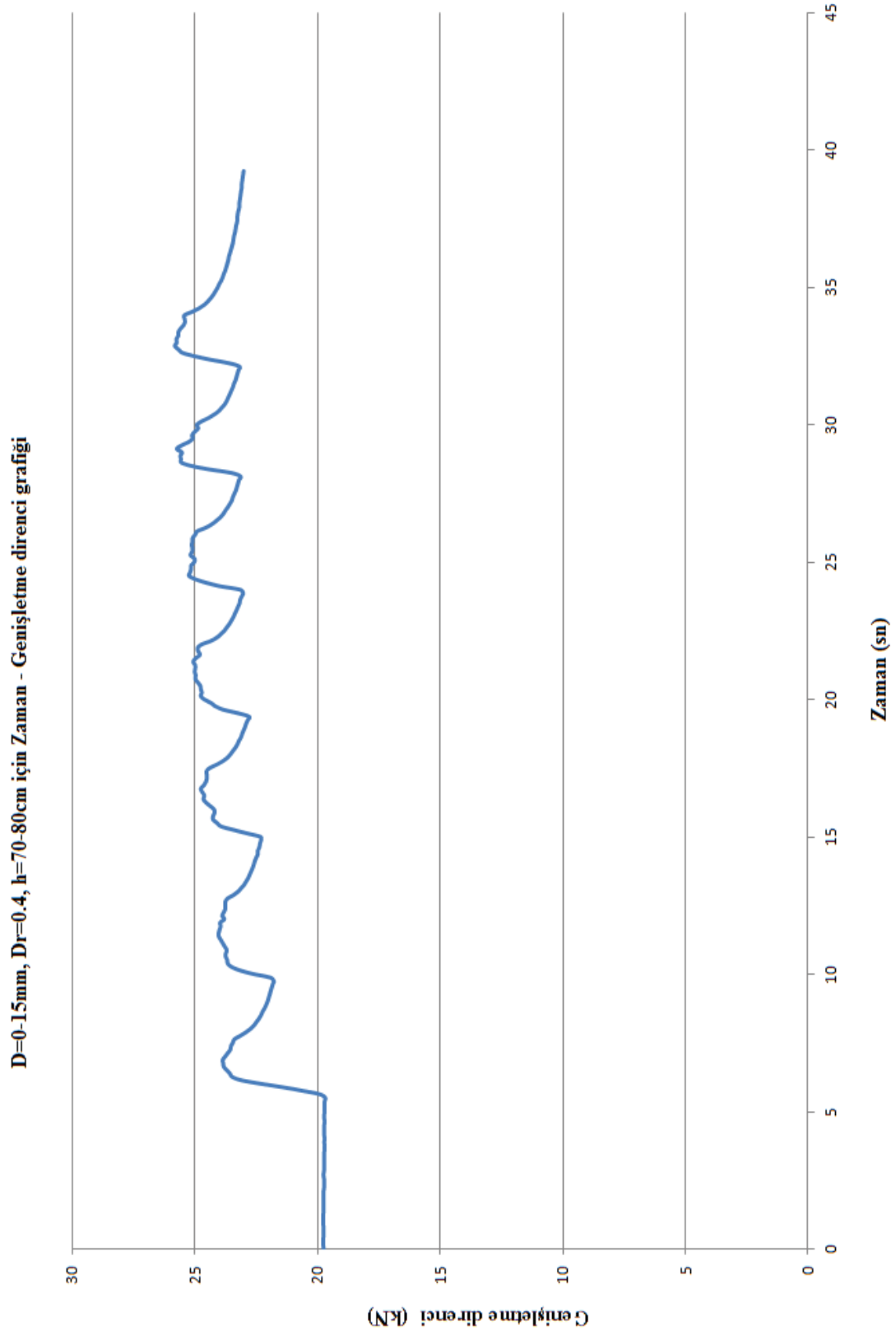
Ek C42

D=0-15mm, Dr=0.4, h=60-70cm için Zaman - Üst ceket çevre basıncı grafiği

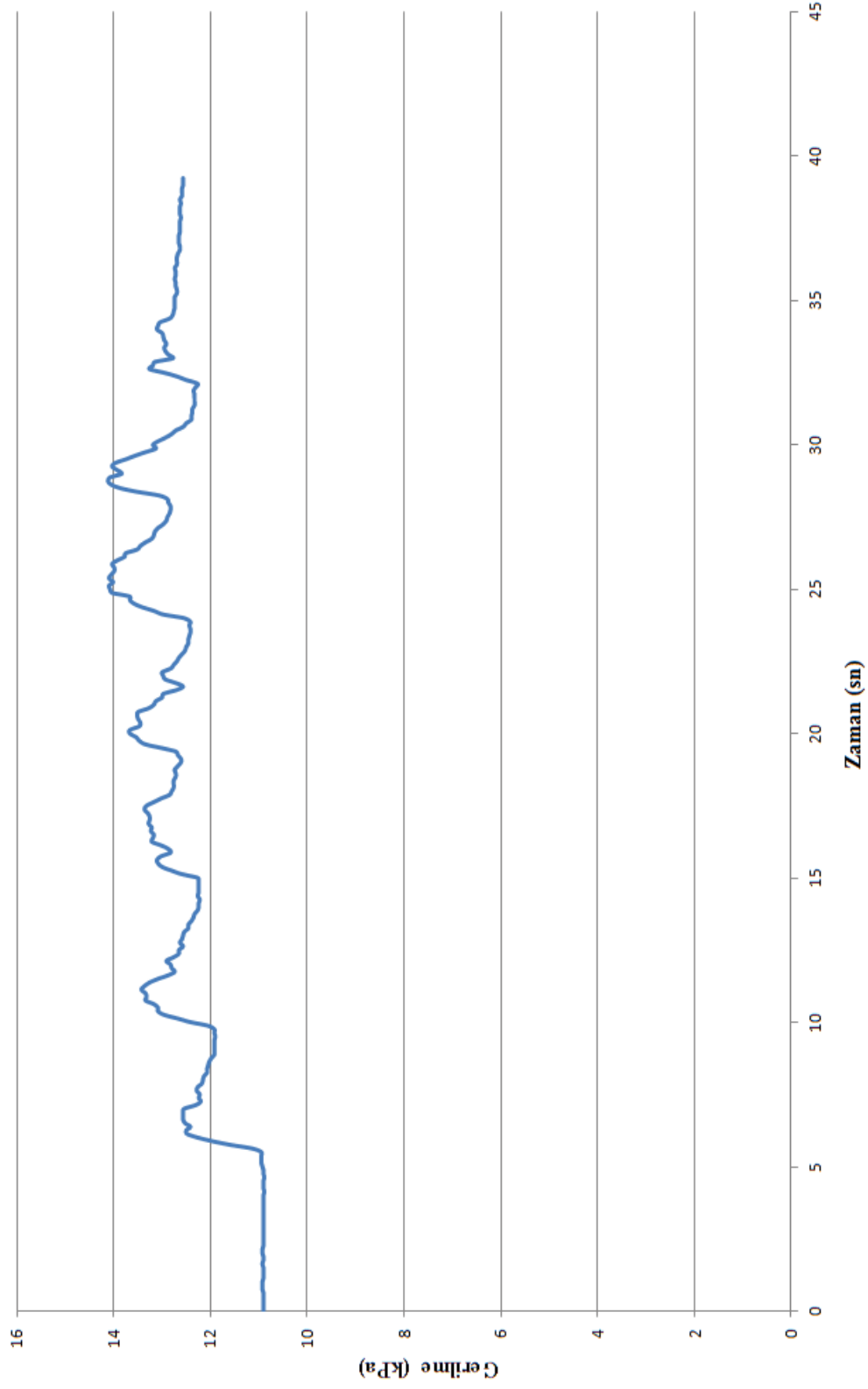
Ek C43

D=0-15mm, Dr=0.4, h=70-80cm için Zaman - Uç direnci grafiği

Ek C44

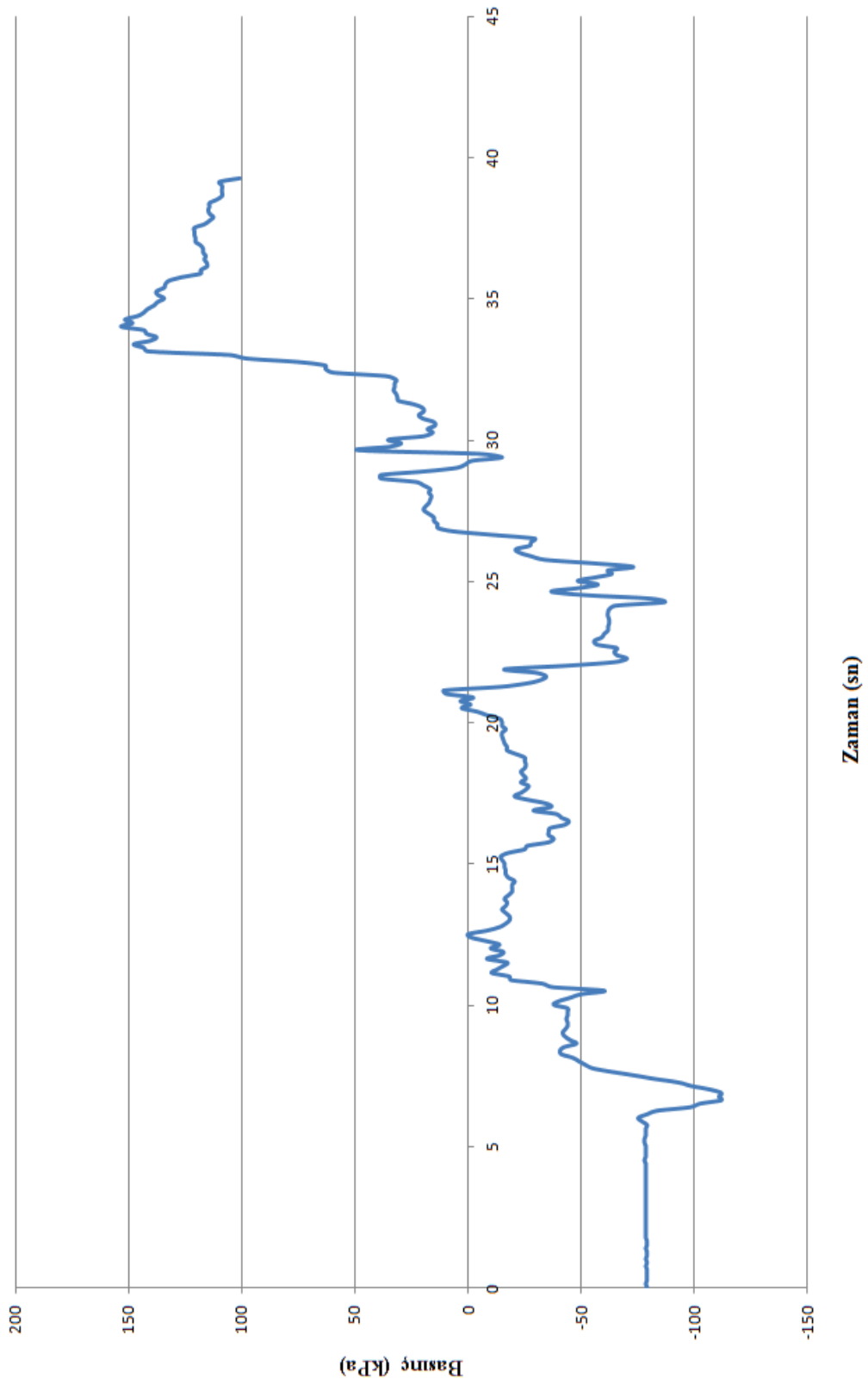


Ek C45

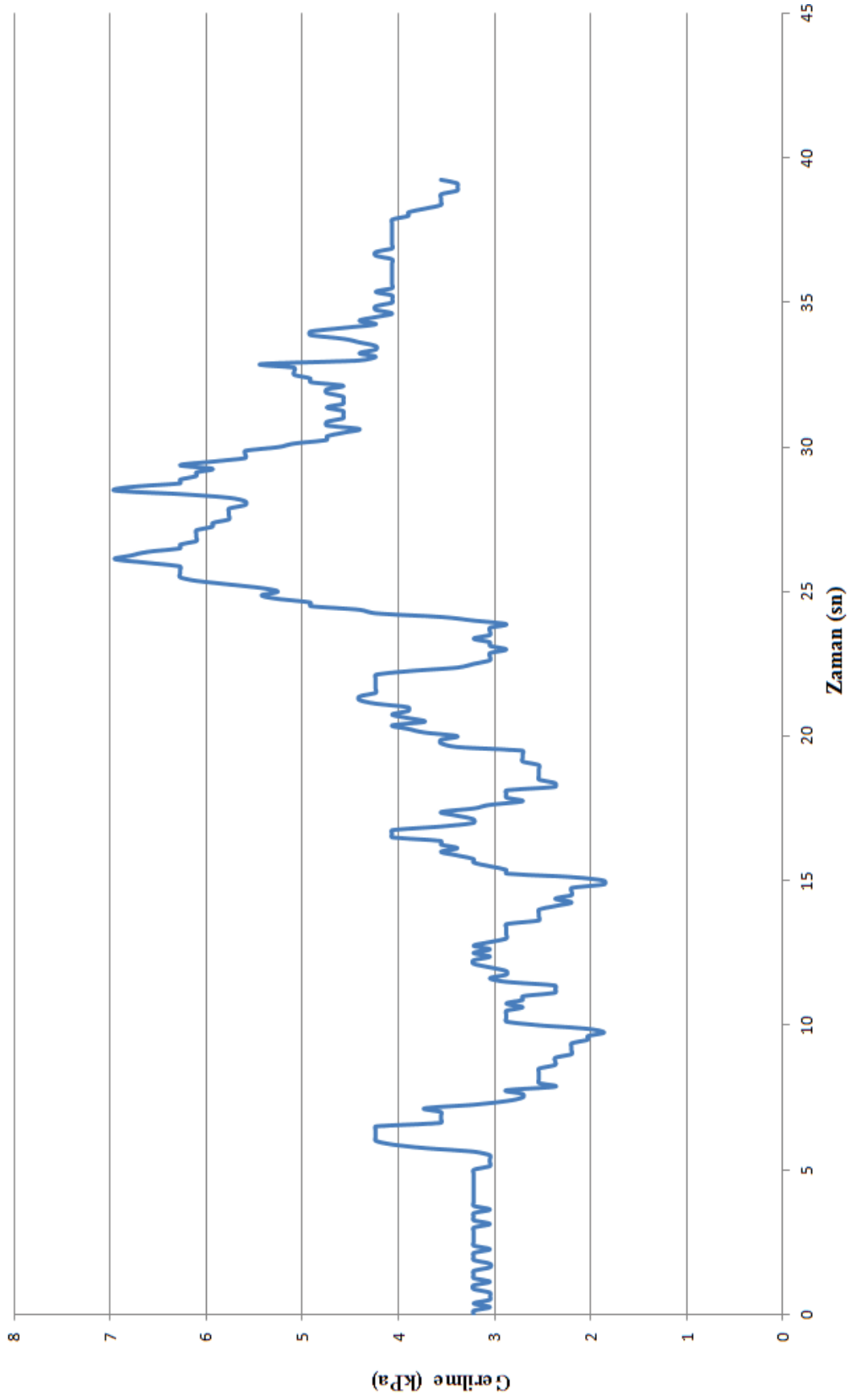
D=0-15mm, $D_r=0.4$, $h=70-80$ cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

Ek C46

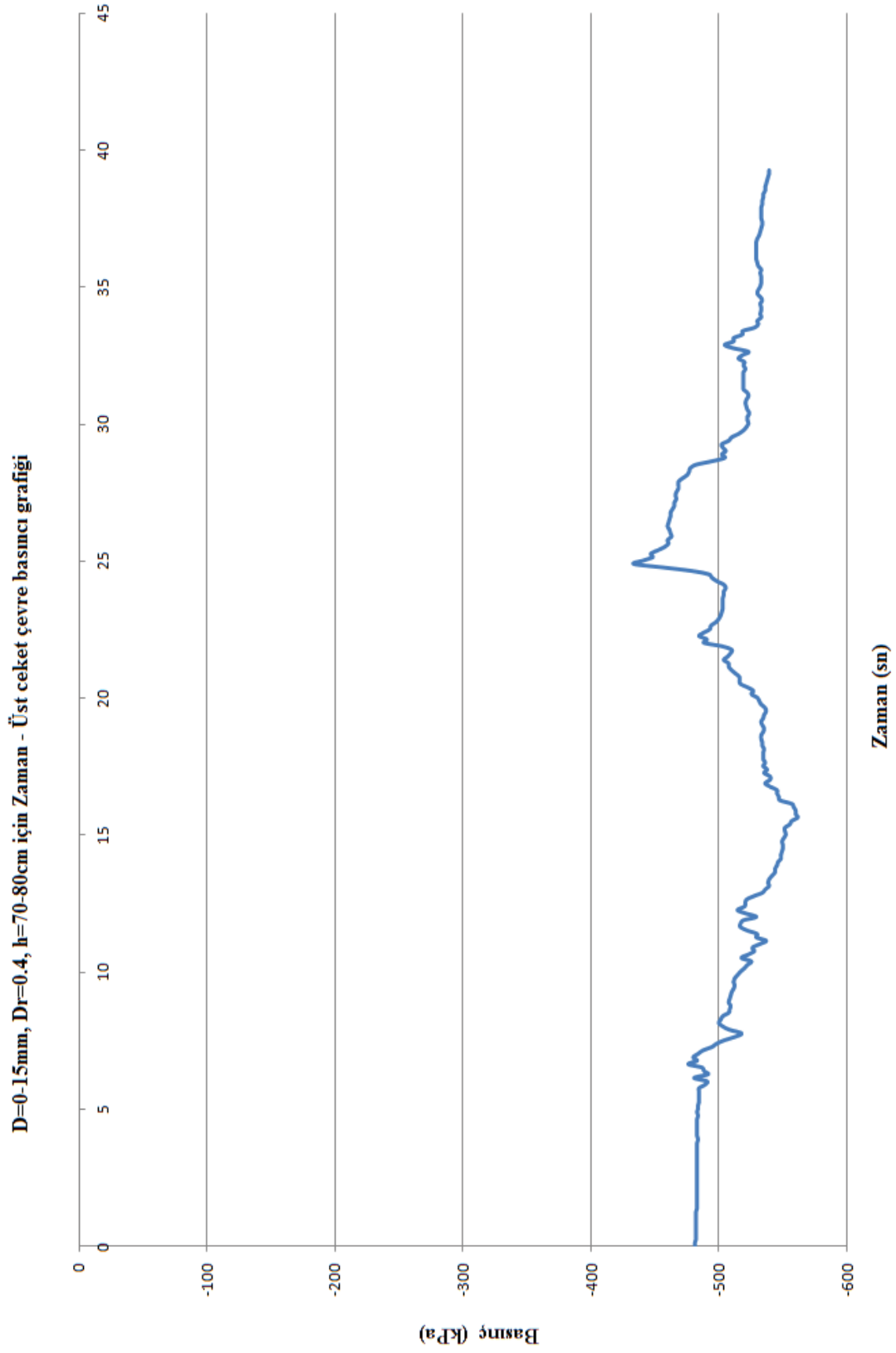
D=0-15mm, Dr=0.4, h=70-80cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği



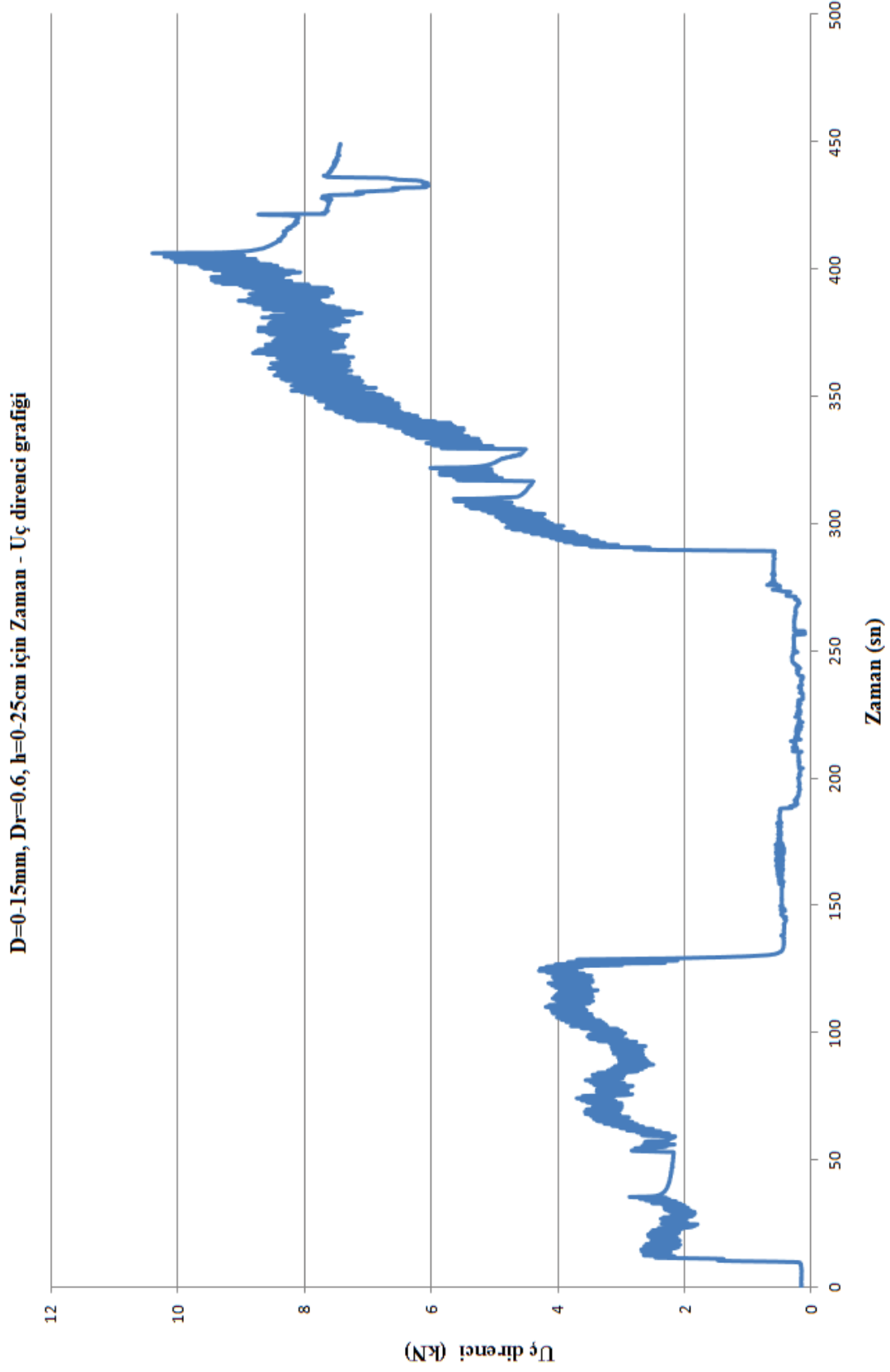
Ek C47

D=0-15mm, $D_r=0.4$, $h=70-80$ cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği

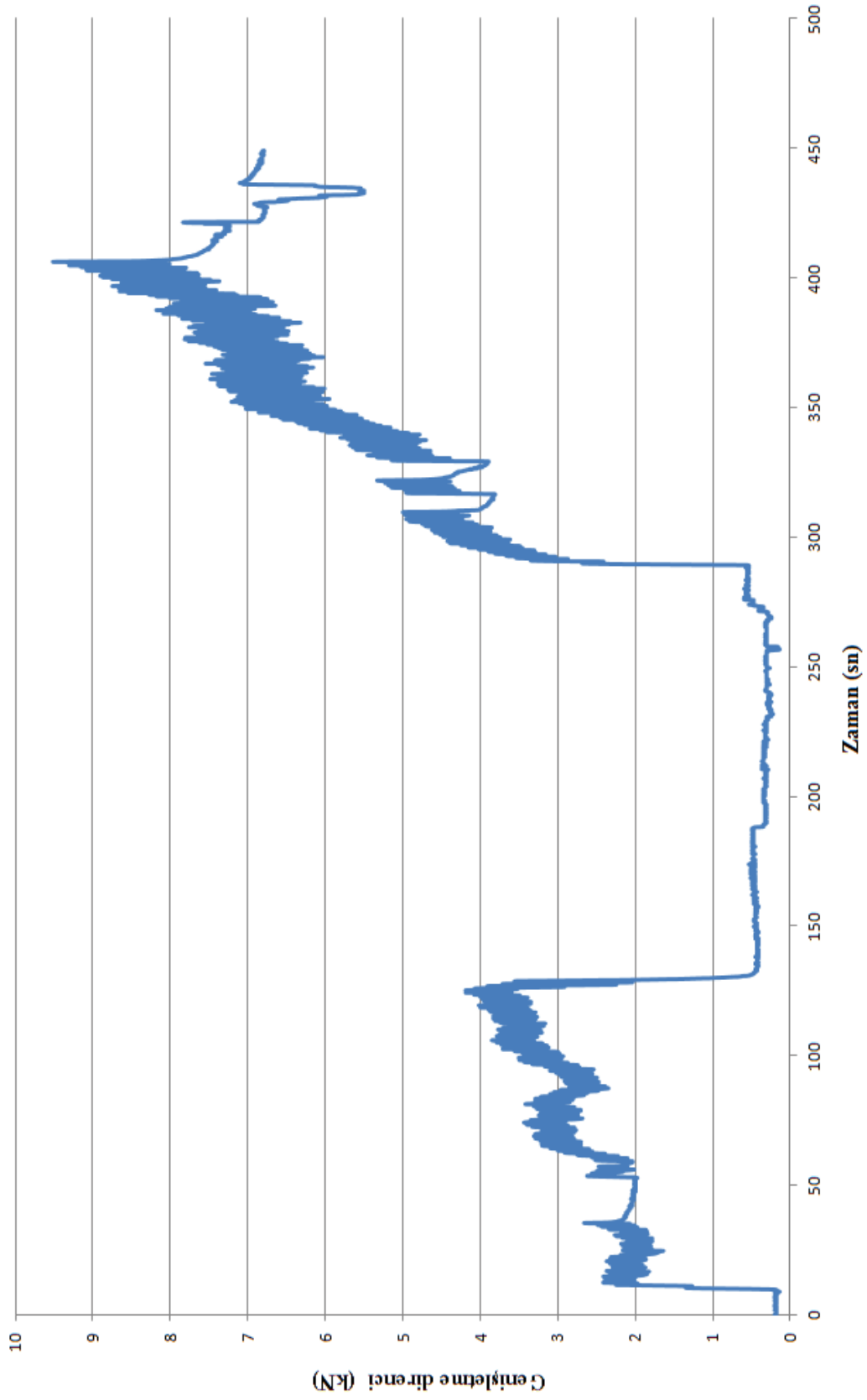
Ek C48



Ek C49

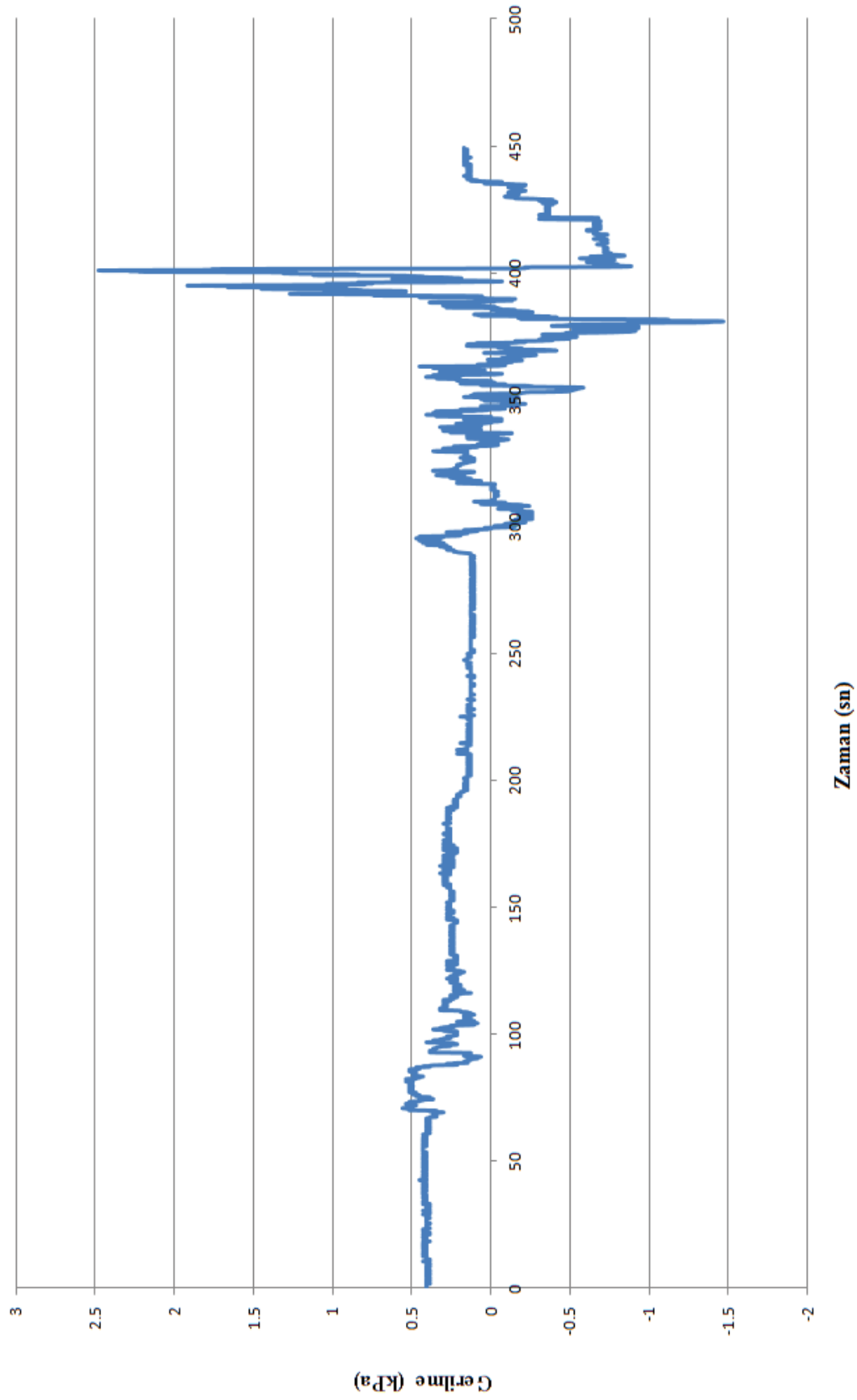


Ek C50

D=0-15mm, $D_r=0.6$, $h=0-25\text{cm}$ için Zaman - Genişletme direnci grafiği

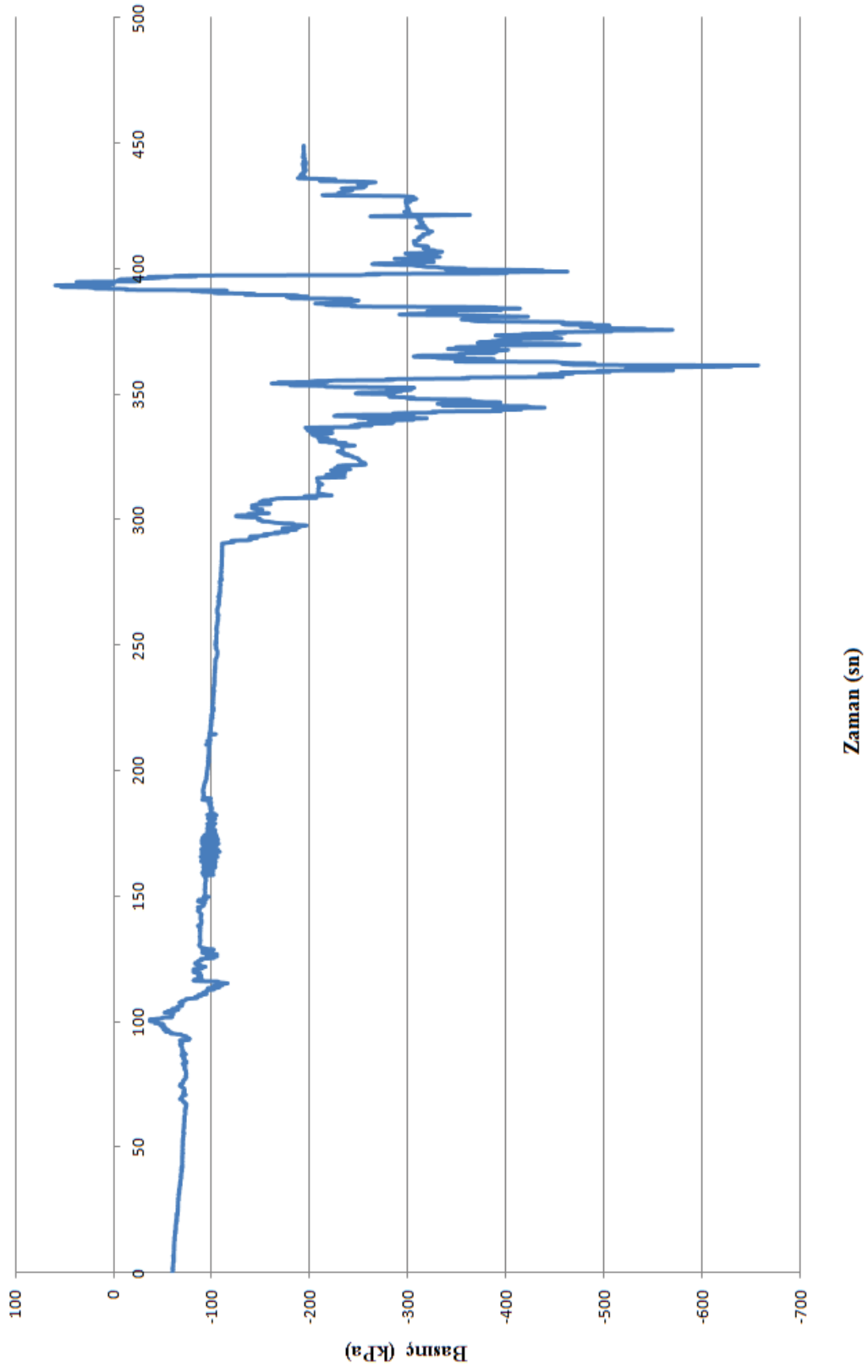
Ek C51

D=0-15mm, Dr=0.6, h=0-25cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

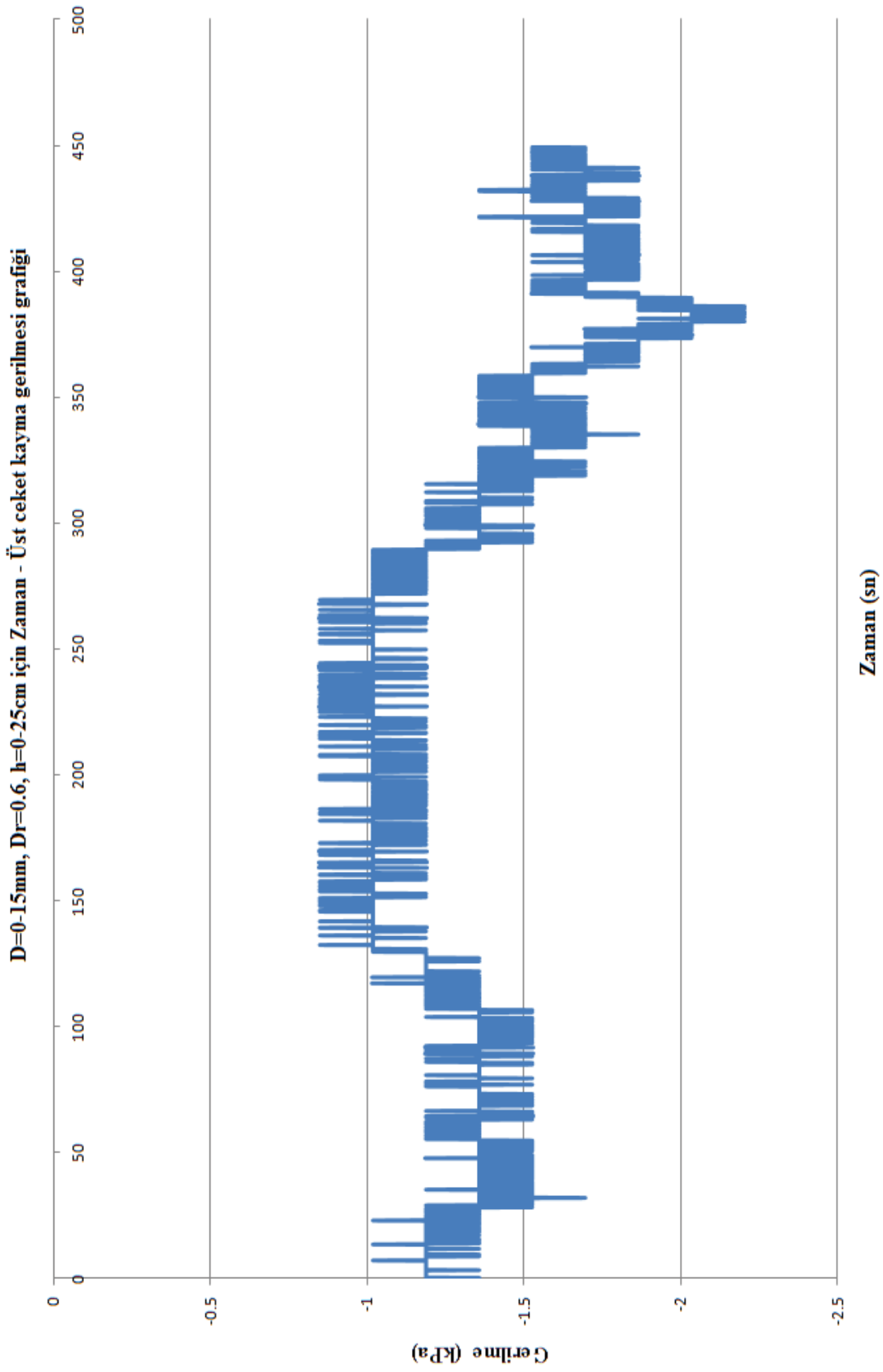


Ek C52

D=0-15mm, Dr=0.6, h=0-25cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

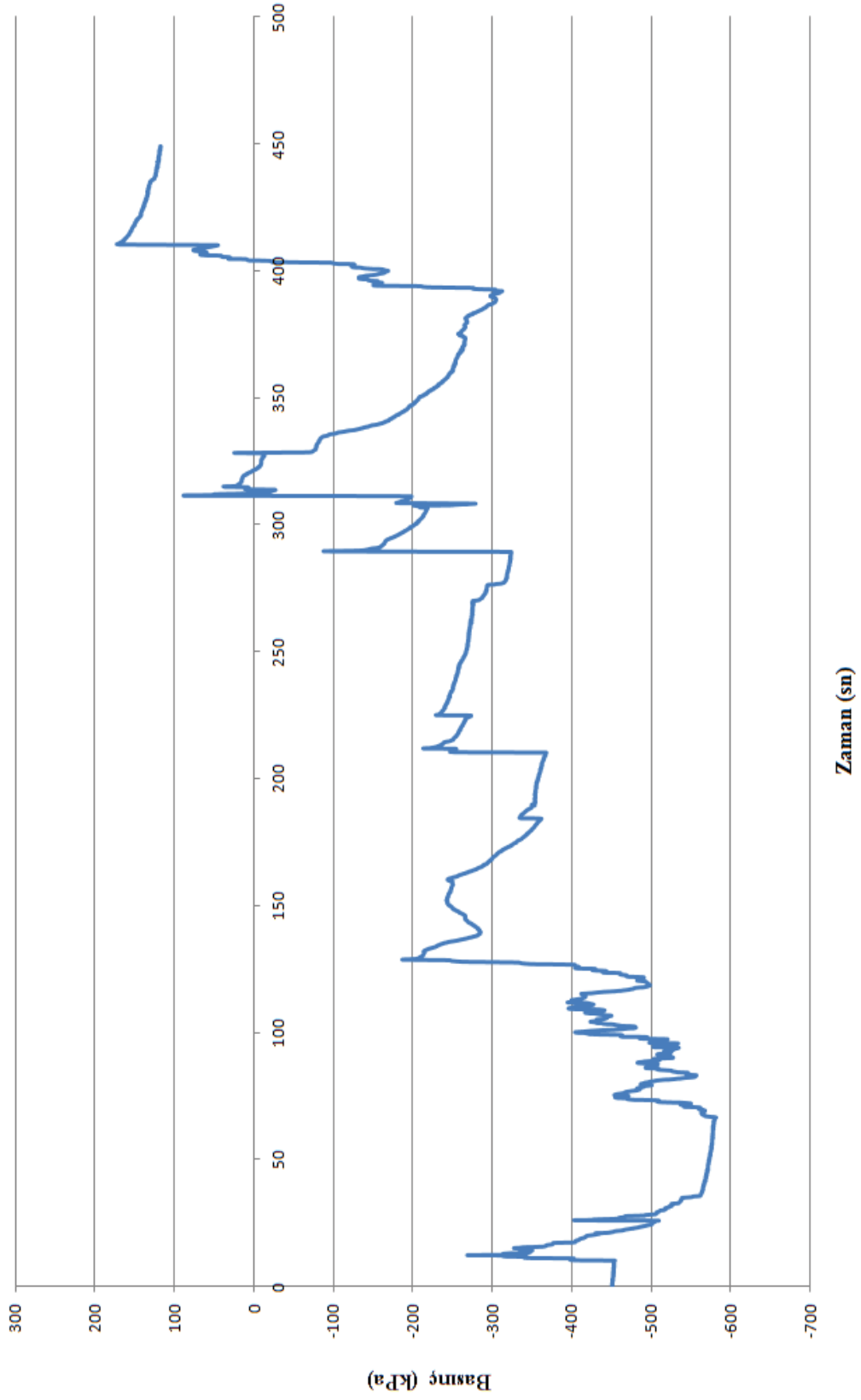


Ek C53

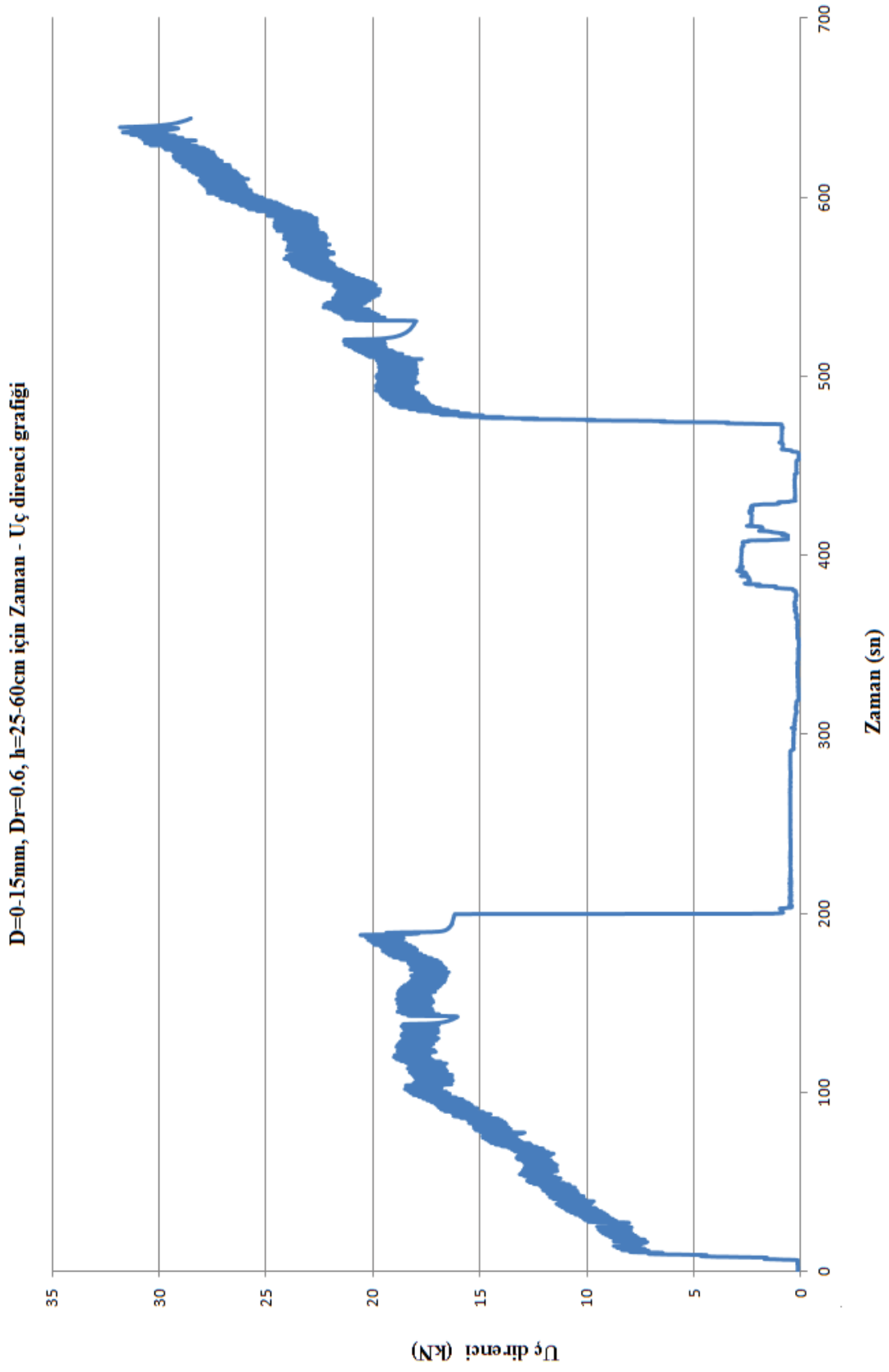


Ek C54

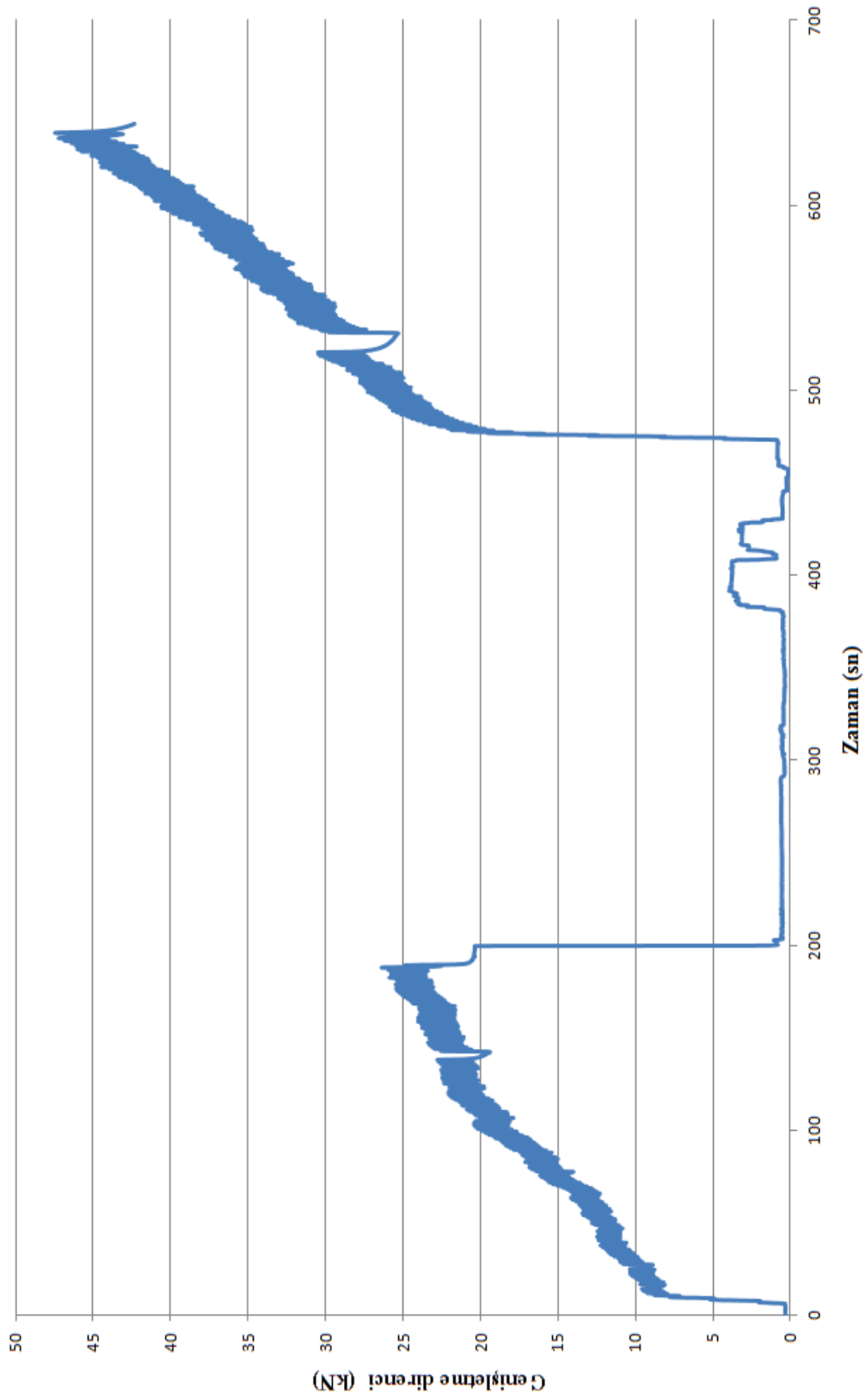
D=0-15mm, Dr=0.6, h=0-25cm için Zaman - Üst ceket çevre basıncı grafiği



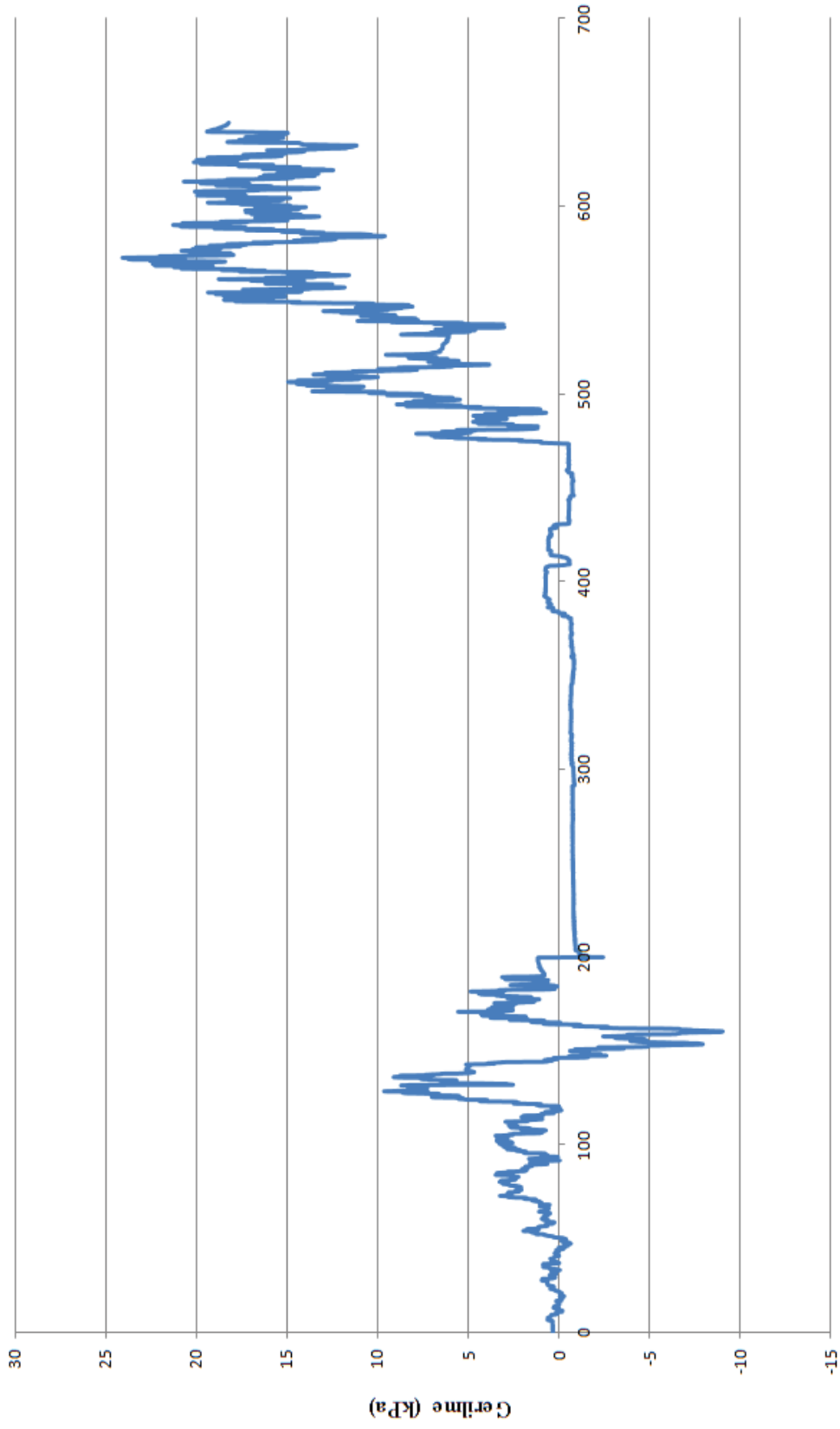
Ek C55



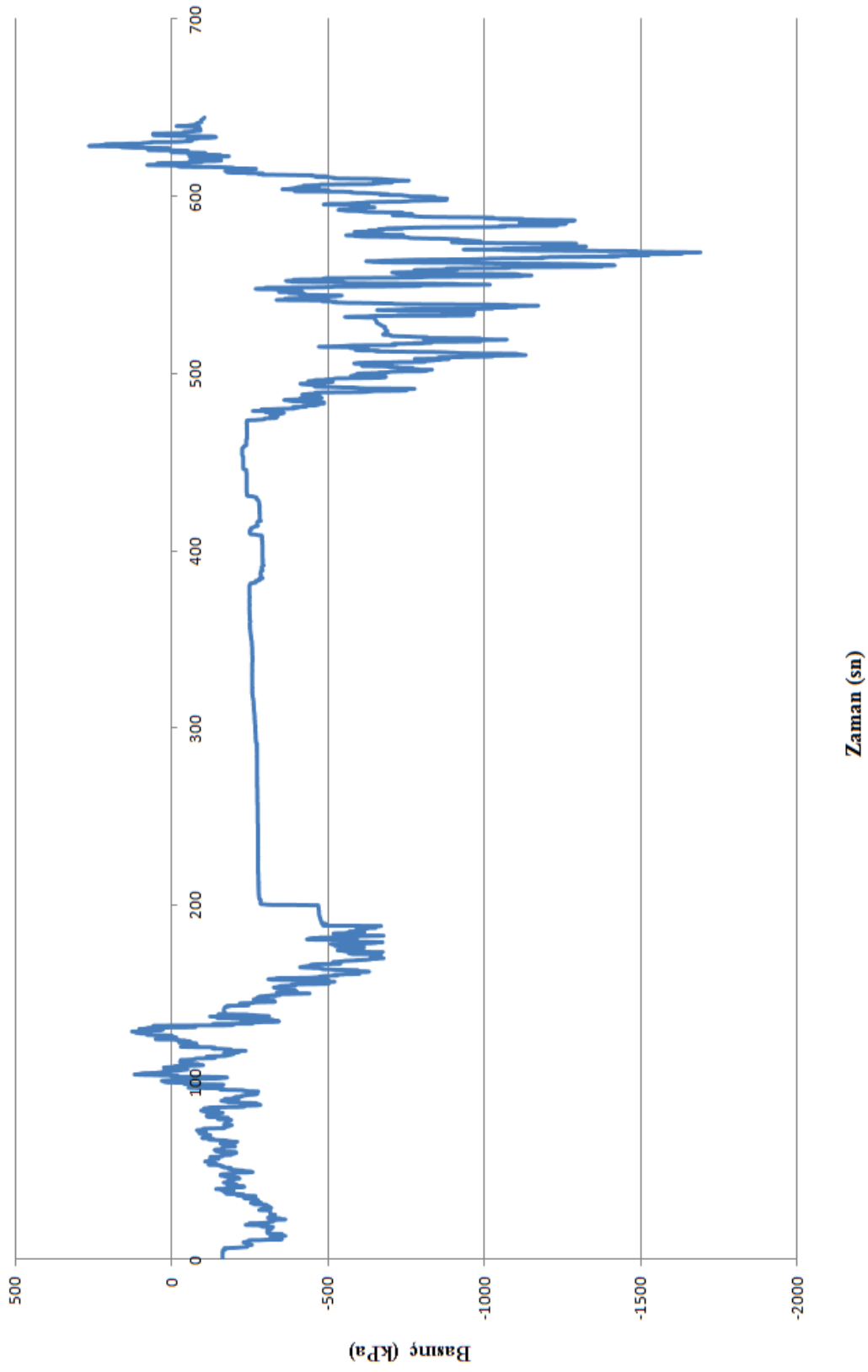
Ek C56

D=0-15mm, $D_r=0.6$, $h=25-60$ cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği

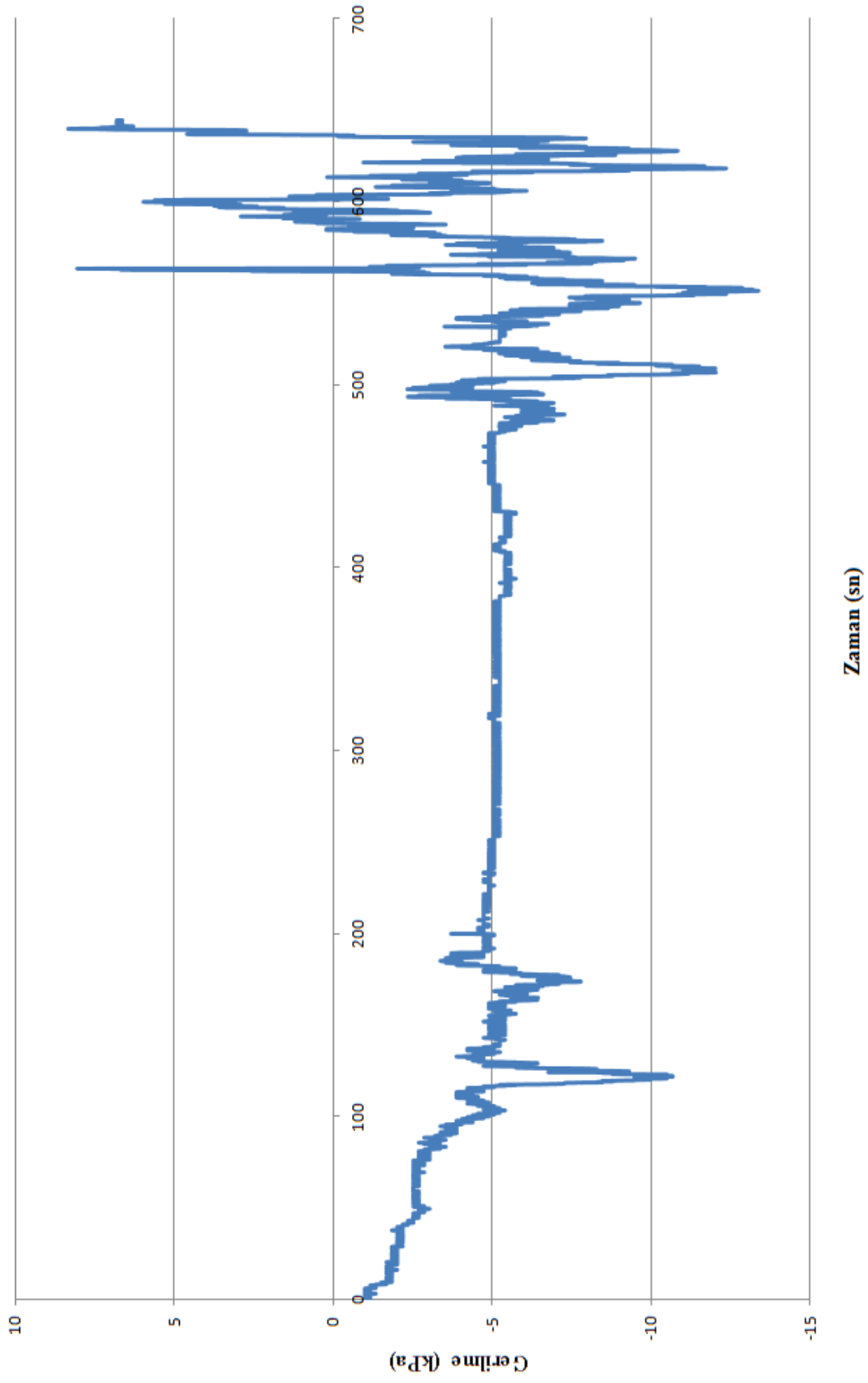
Ek C57

D=0-15mm, $D_r=0.6$, $h=25-60\text{cm}$ için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği**Zaman (sn)**

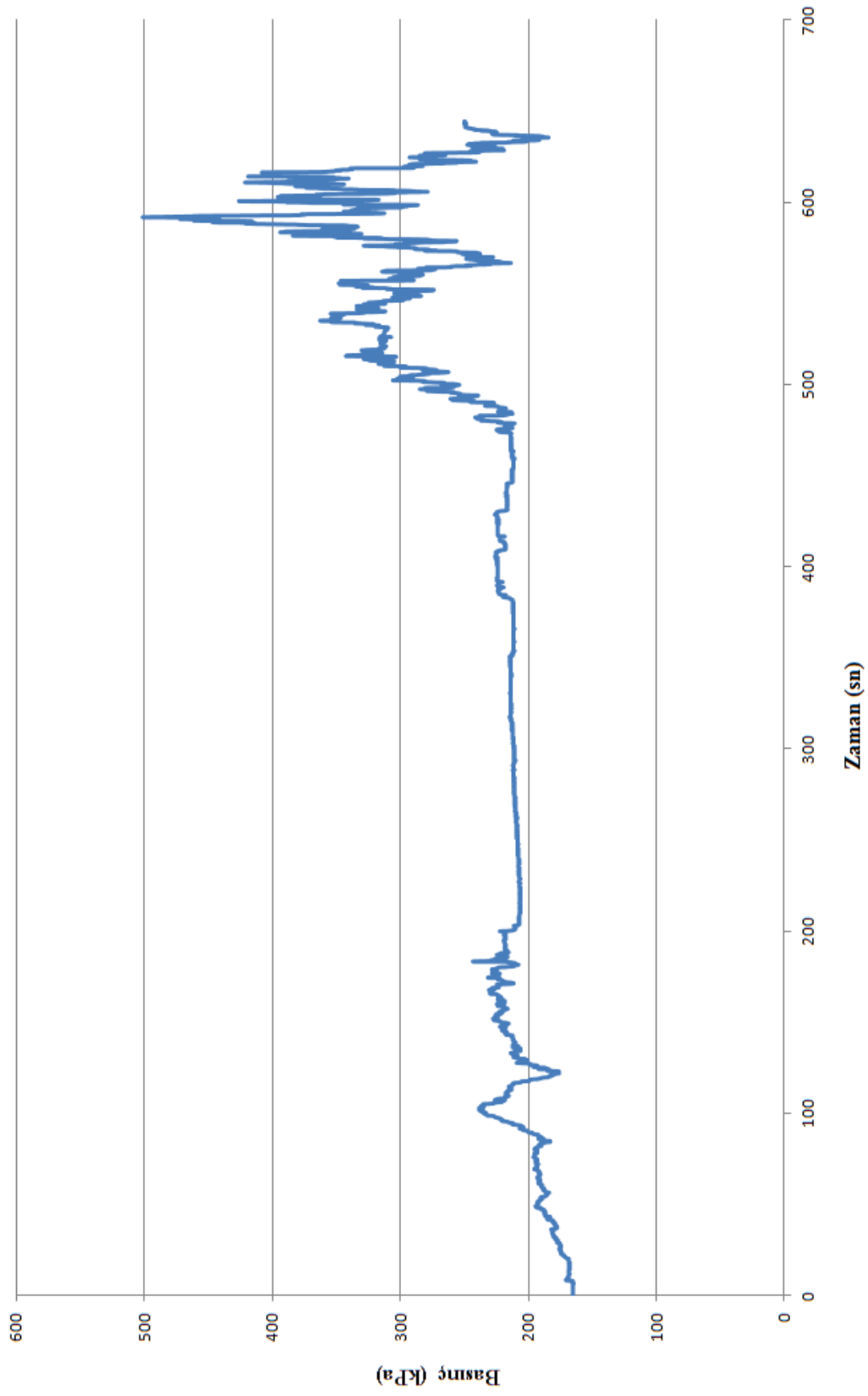
Ek C58

D=0-15mm, $D_f=0.6$, h=25-60cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

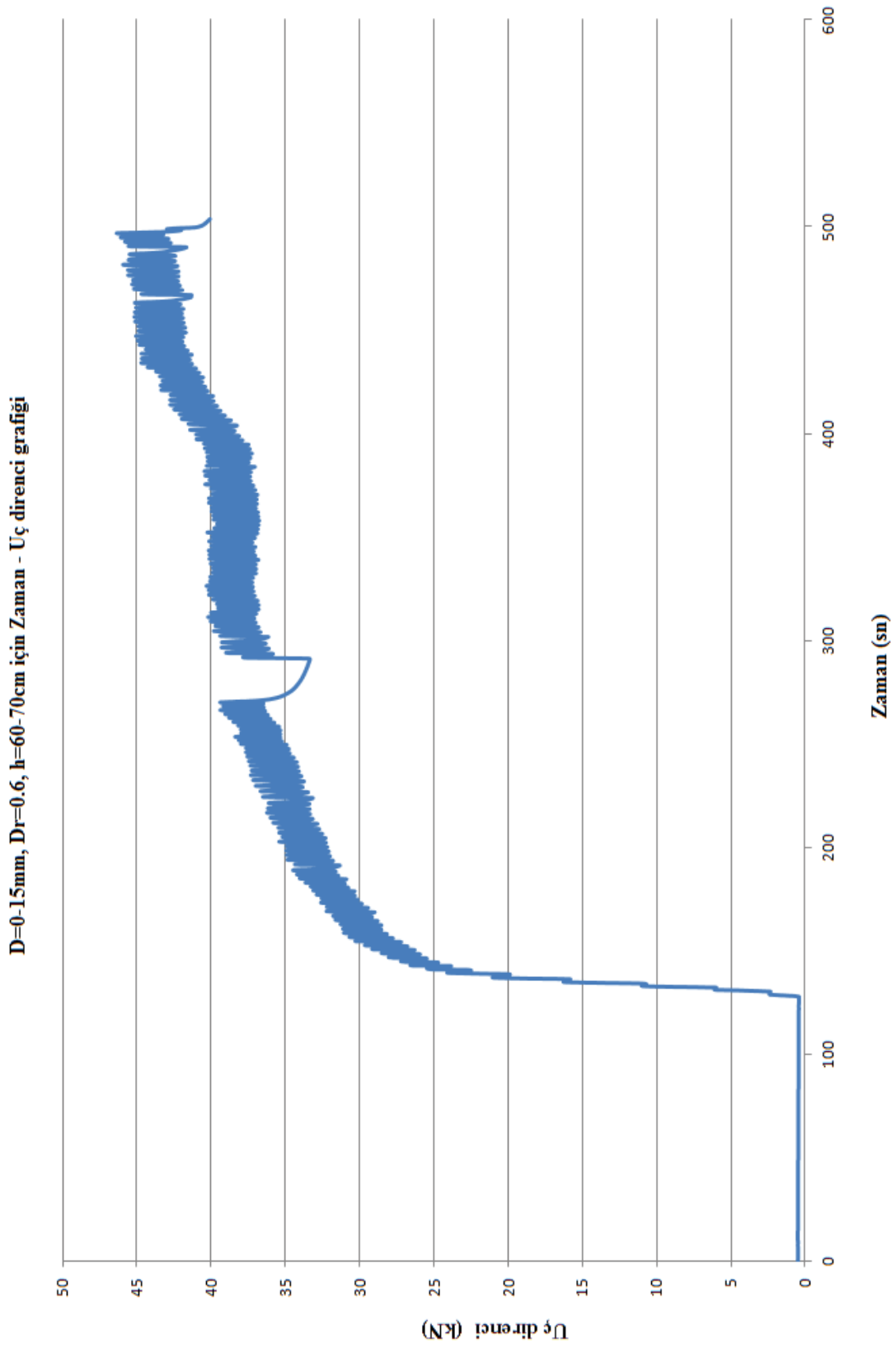
Ek C59

D=0-15mm, $D_r=0.6$, h=25-60cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği

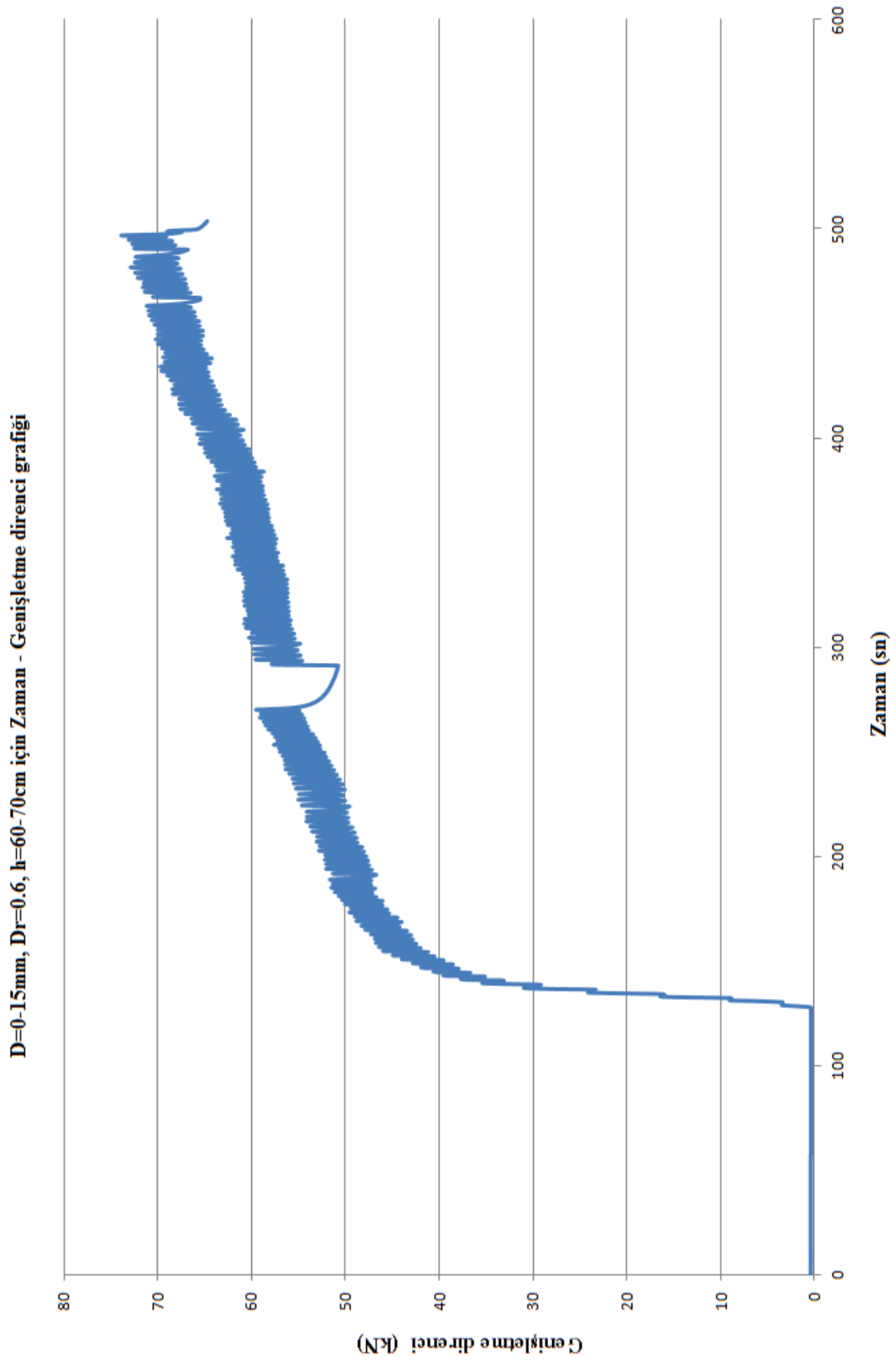
Ek C60

D=0-15mm, $D_r=0.6$, h=25-60cm için Zaman - Üst ceket çevre basıncı grafiği

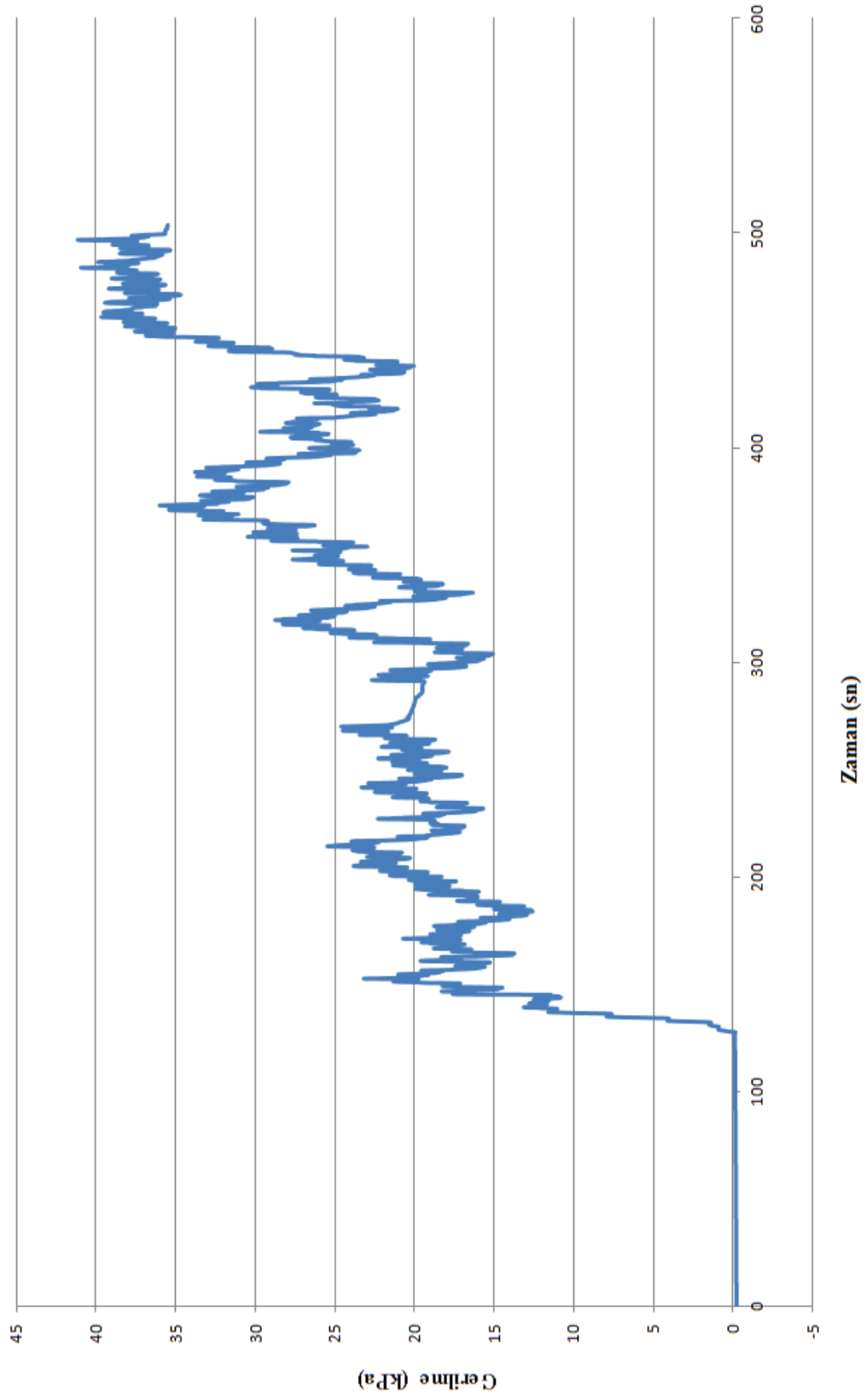
Ek C61



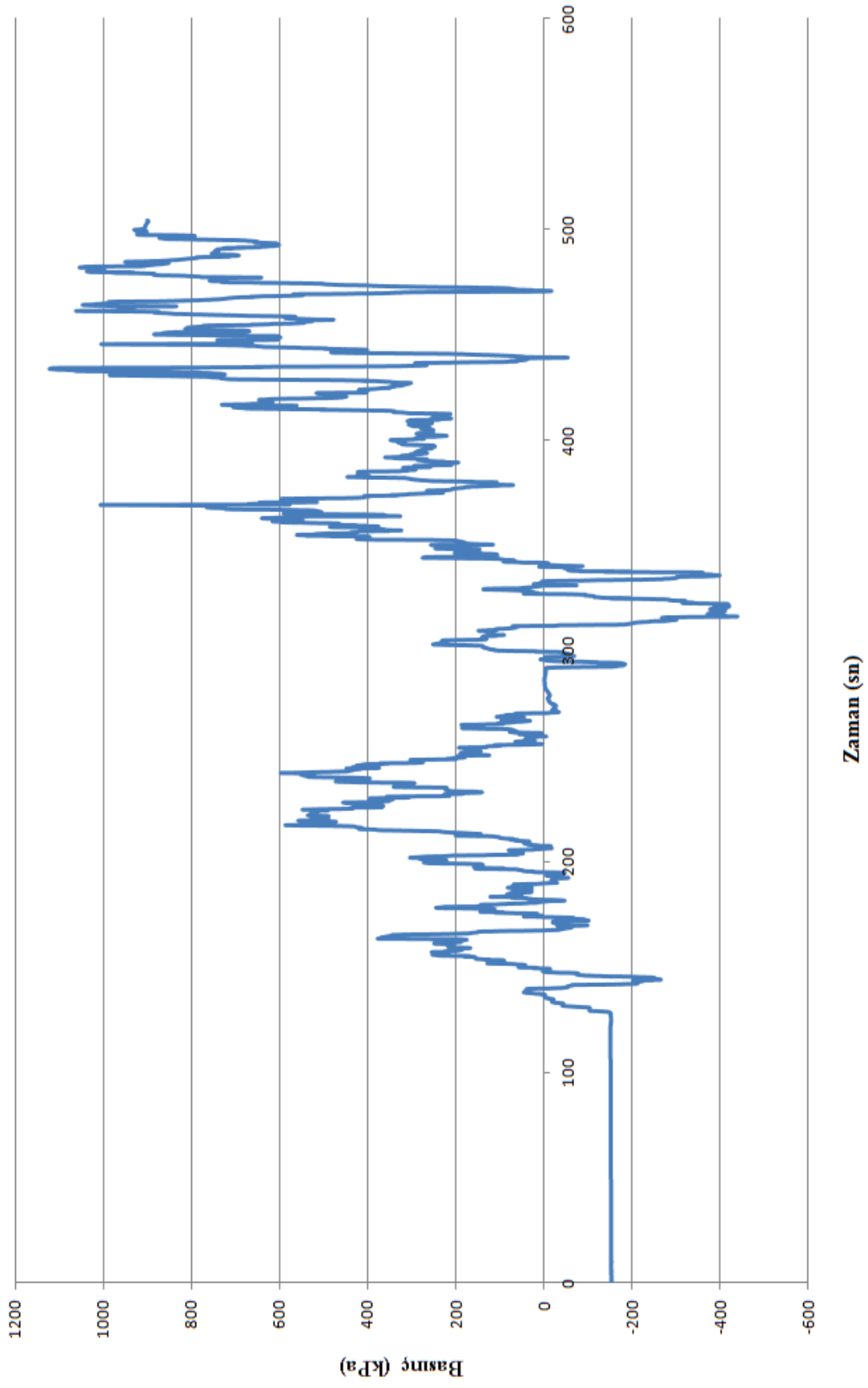
Ek C62



Ek C63

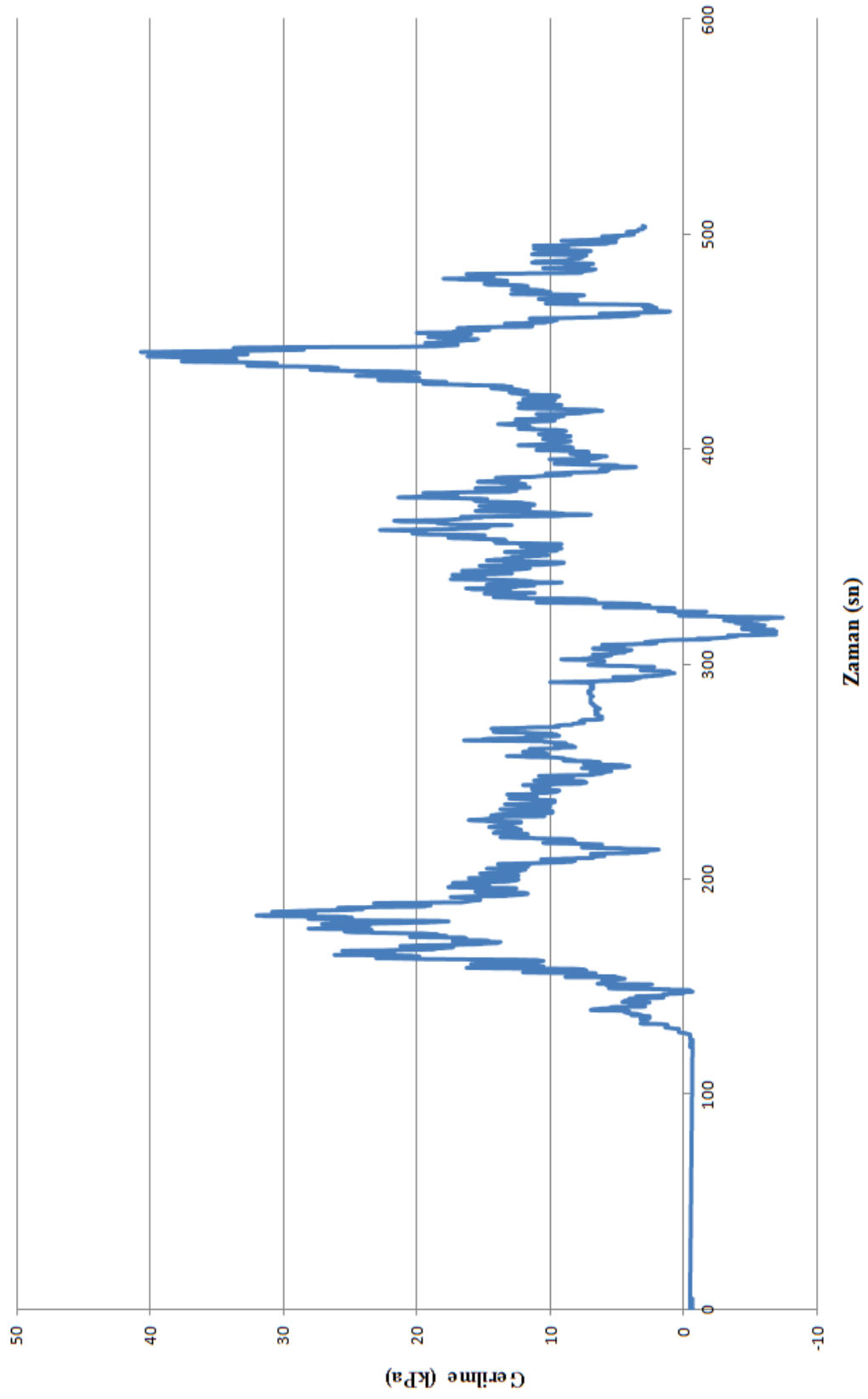
D=0-15mm, $D_r=0.6$, h=60-70cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

Ek C64

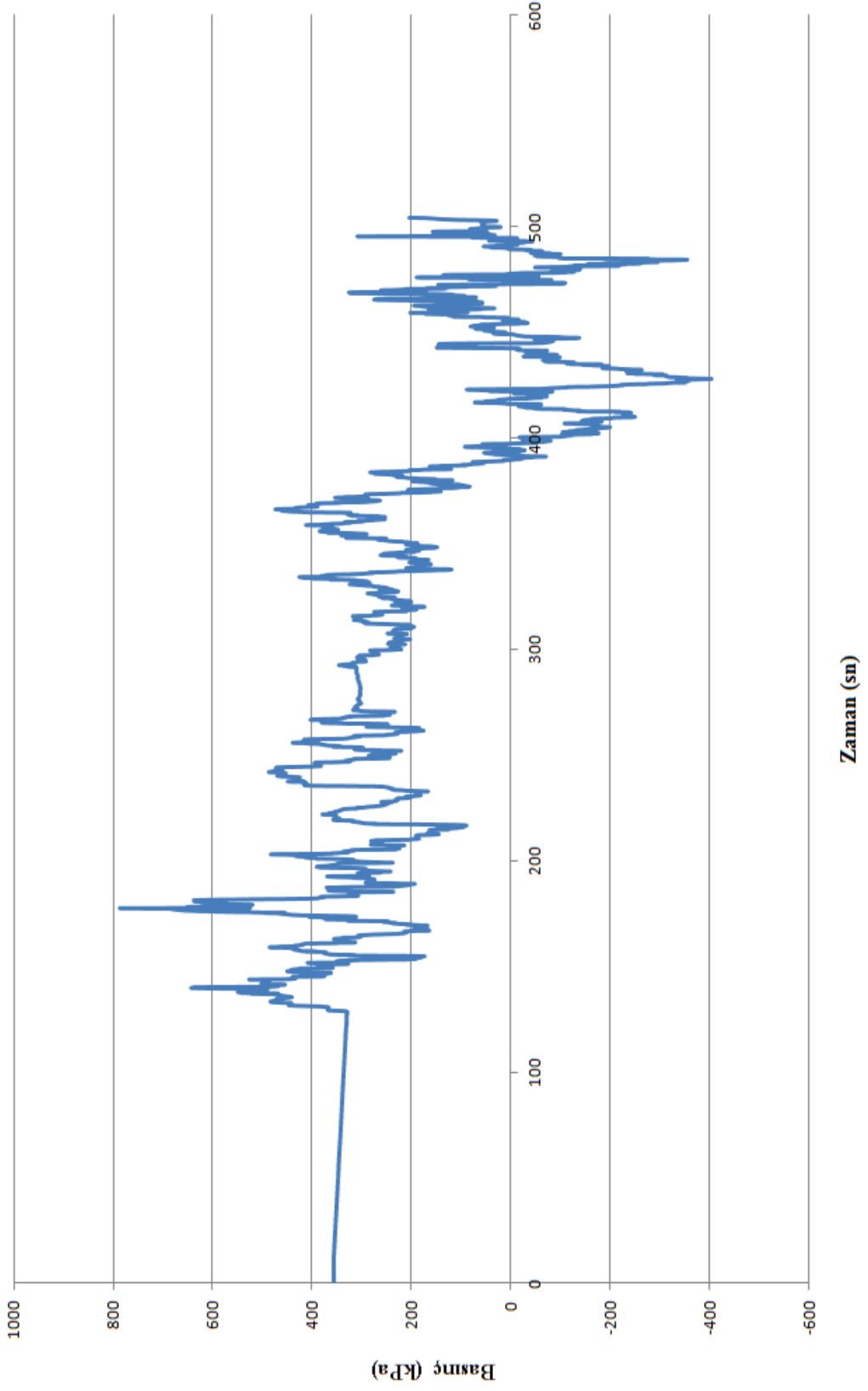
D=0-15mm, Dr=0.6, h=60-70cm için Zaman - Alt çeket çevre basıncı grafiği

Ek C65

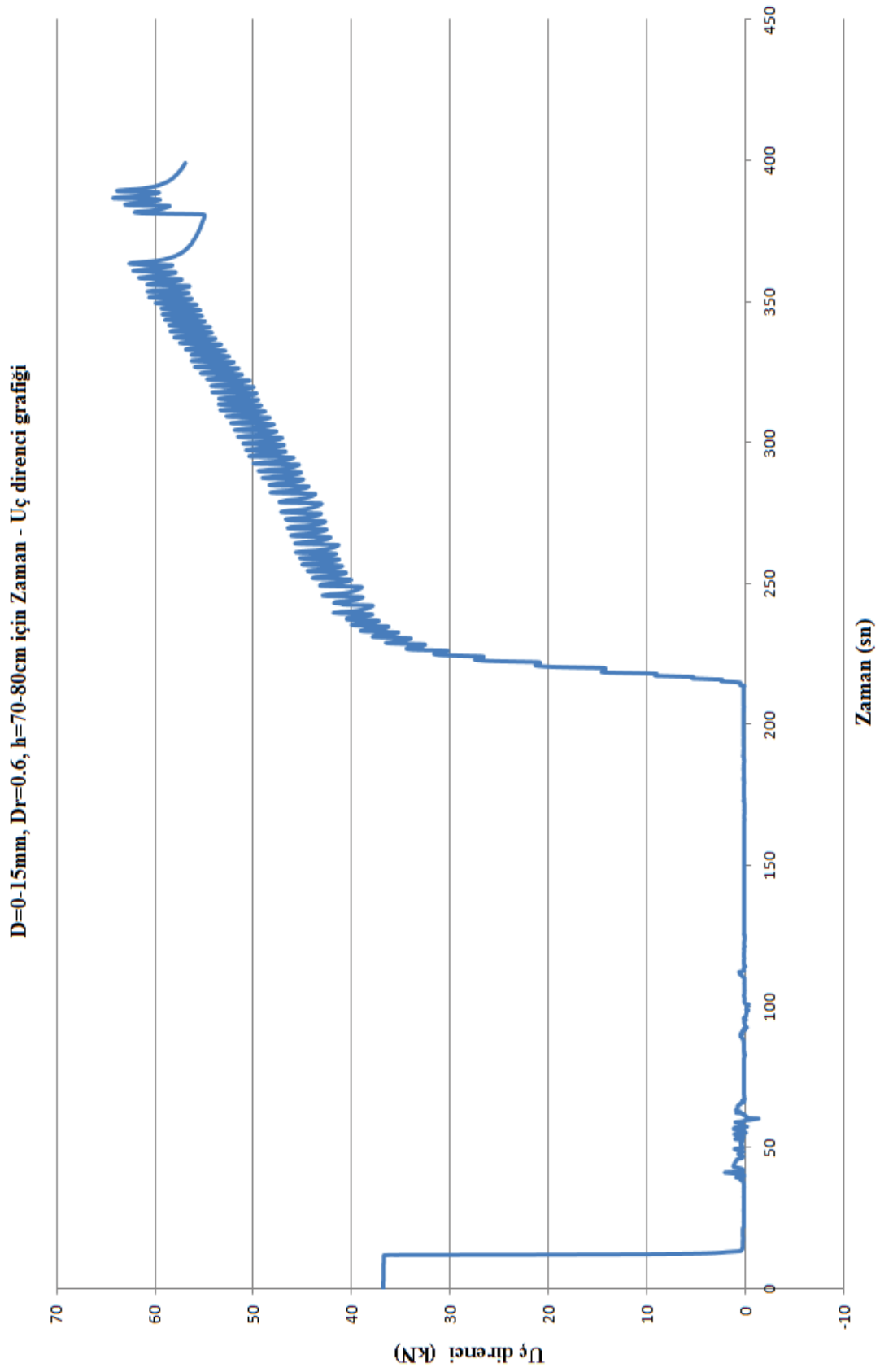
D=0-15mm, Dr=0.6, h=60-70cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği



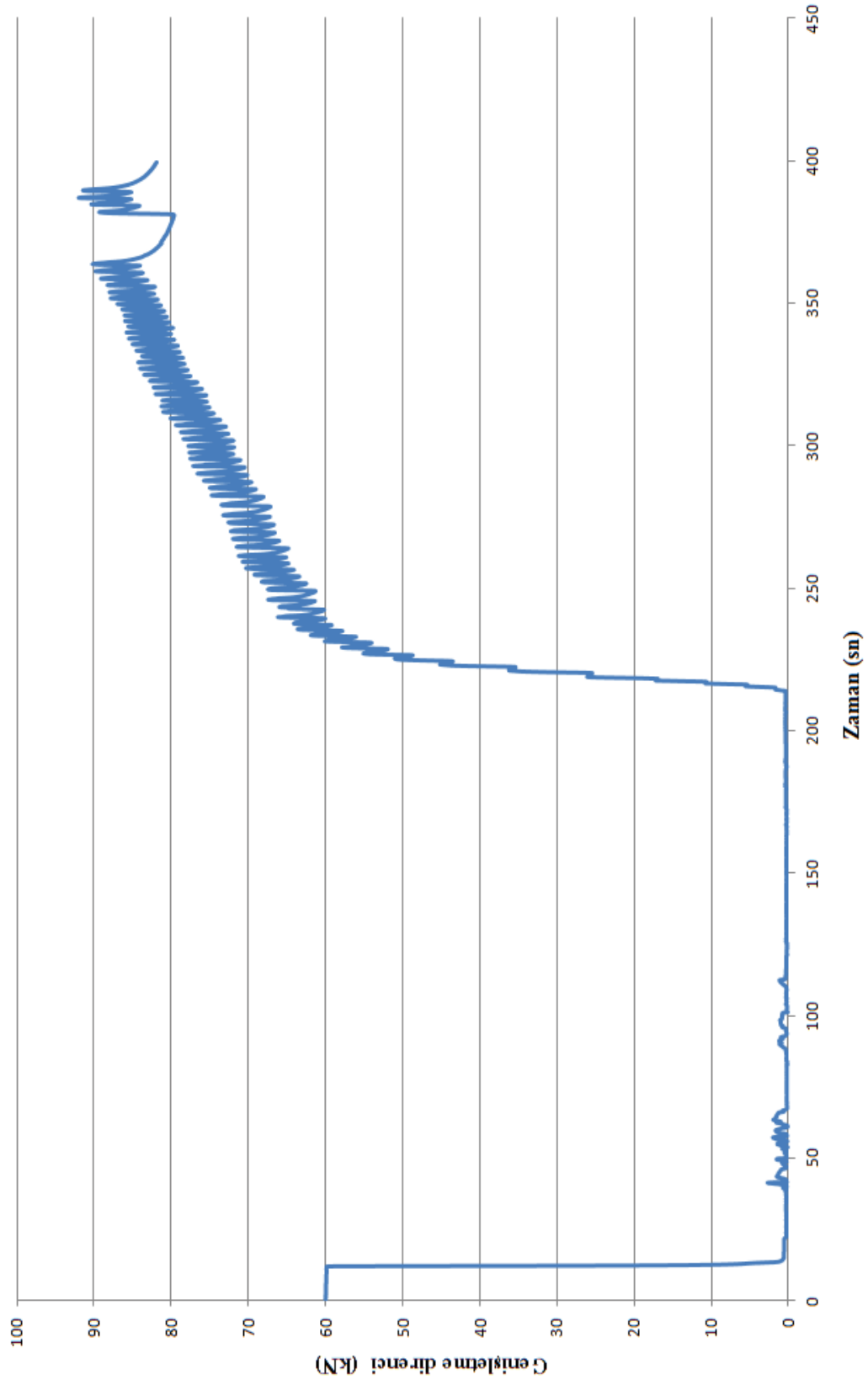
D=0-15mm, Dr=0.6, h=60-70cm için Zaman - Üst ceket çevre basıncı grafiği



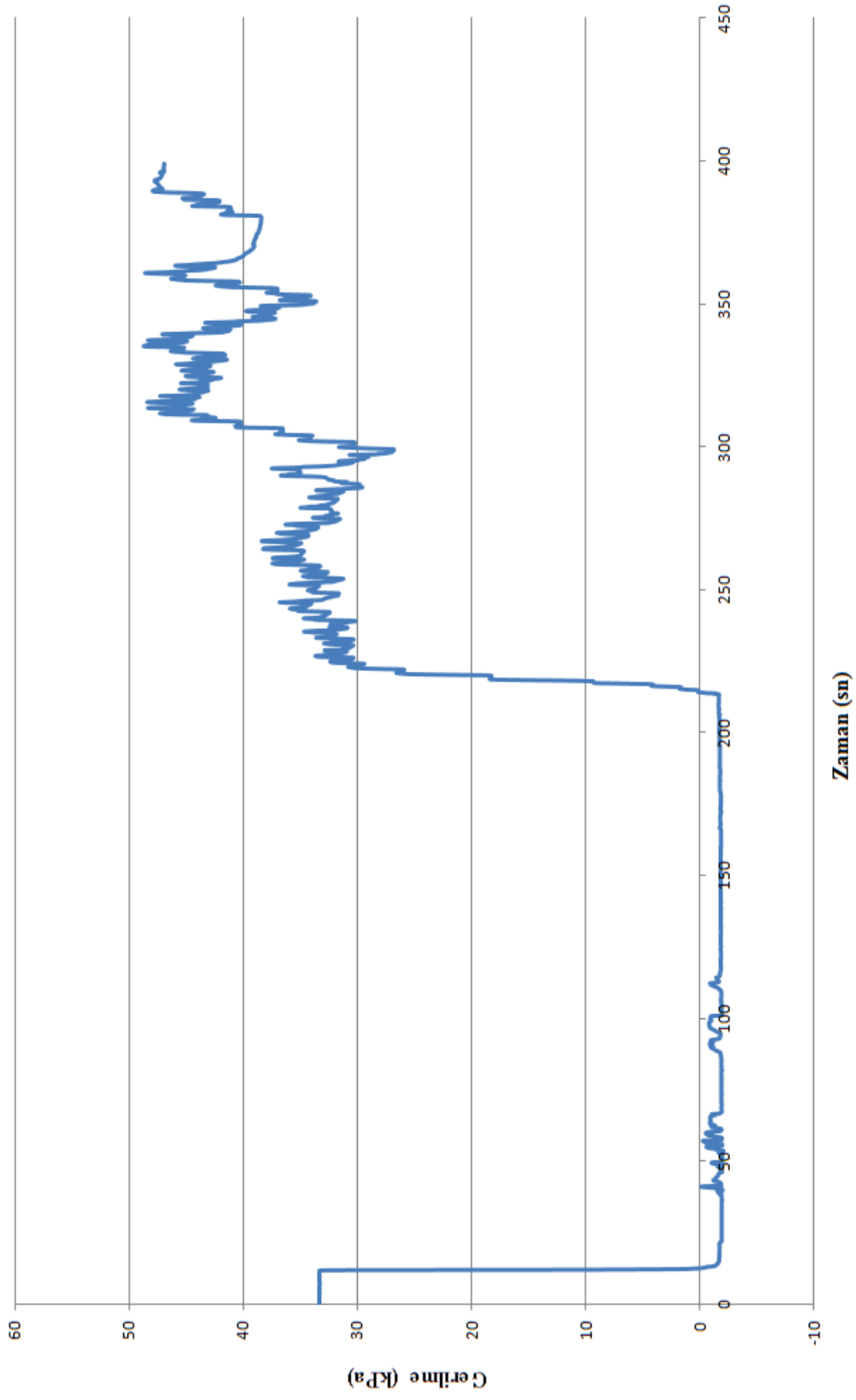
Ek C67



Ek C68

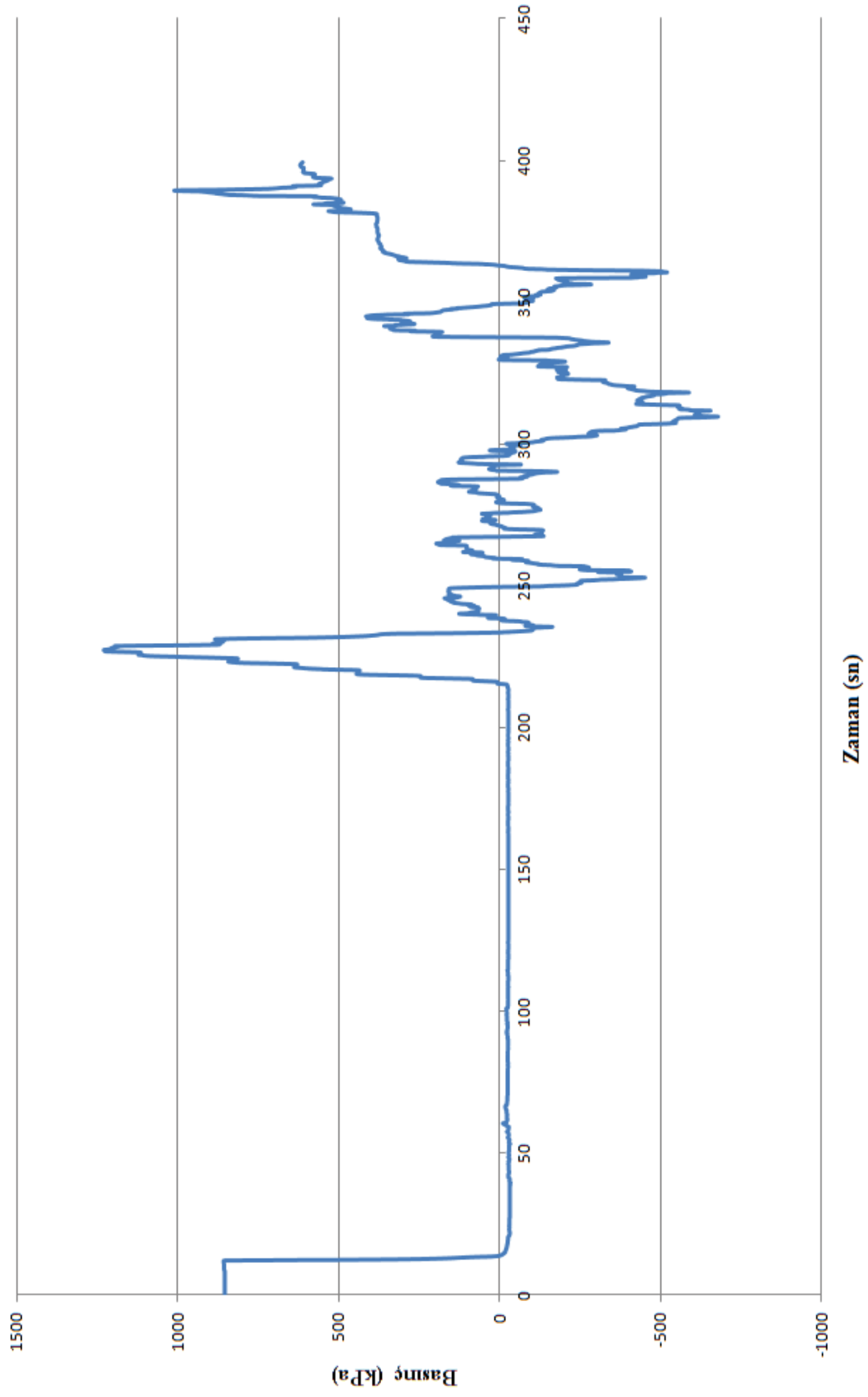
D=0-15mm, $D_r=0.6$, $h=70-80$ cm için Zaman - Genişletme direnci grafiği

Ek C69

D=0-15mm, Dr=0.6, h=70-80cm için Zaman - Alt ceket kayma gerilmesi grafiği

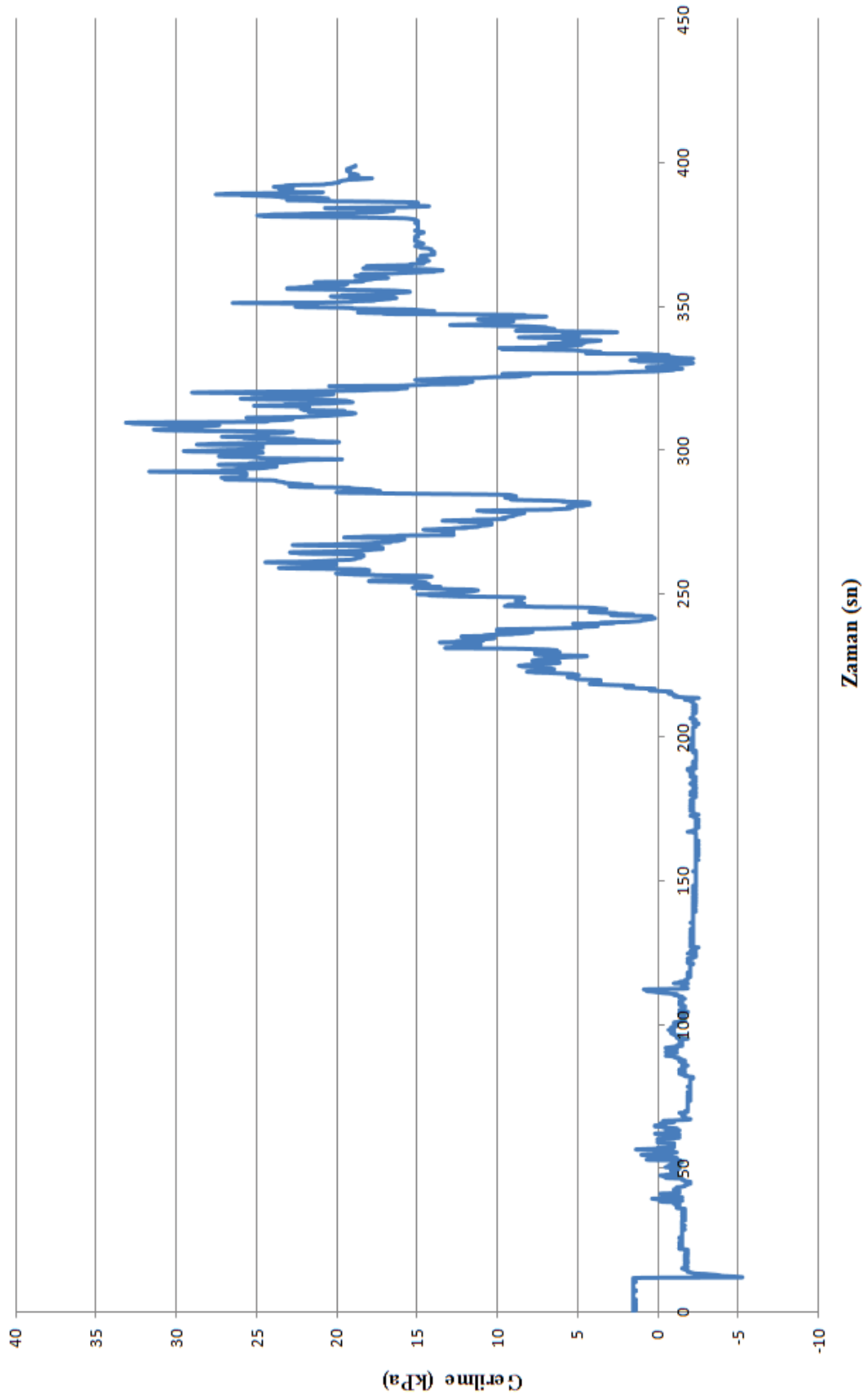
Ek C70

D=0-15mm, Dr=0.6, h=70-80cm için Zaman - Alt ceket çevre basıncı grafiği

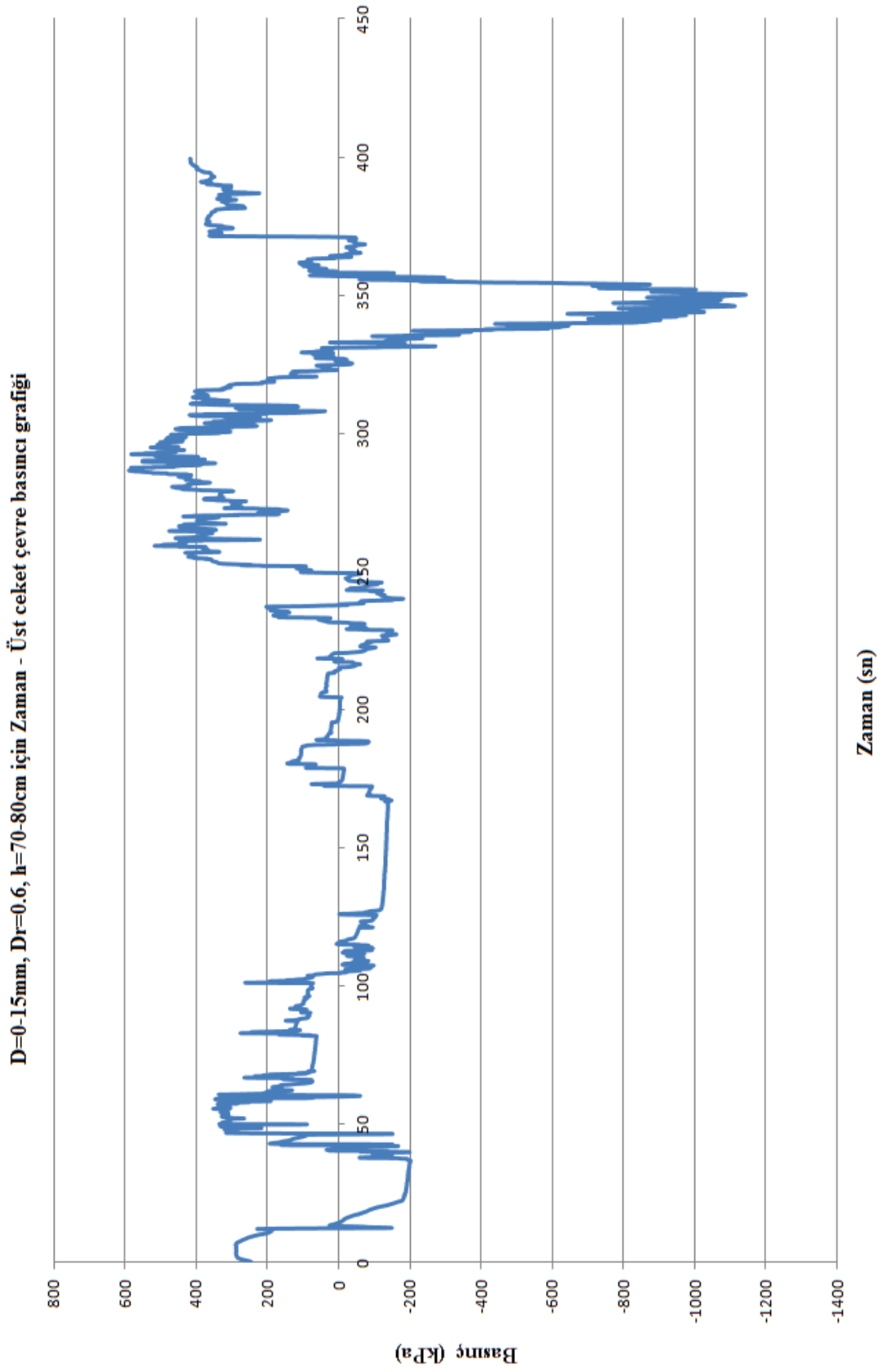


Ek C71

D=0-15mm, Dr=0.6, h=70-80cm için Zaman - Üst ceket kayma gerilmesi grafiği



Ek C72



ÖZGEÇMİŞ

Osman KARA, 11.09.1970 de Kahramanmaraş'ta doğdu. İlk eğitimini Almanya'da ve orta eğitimini Kahramanmaraş'ta tamamladı. 1988 yılında Kahramanmaraş Lisesi Fen Bölümünden mezun oldu. 1989 yılında başladığı KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümünü 1993 yılında bitirdi. 1997 yılında Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı ve 1998 yılında araştırma görevlisi olarak Fen Bilimleri Enstitüsüne atandı. 1999 yılında Öğretim Görevlisi olarak Kahramanmaraş Meslek Yüksek Okuluna atandı ve 2000 yılında yüksek lisansı tamamladı. 2003-2011 yılları arasında Bayındırlık ve İskan Bakanlığına bağlı çeşitli İl Müdürlüklerinde kontrol, proje ve laboratuvar mühendisi olarak çalıştı. 2004 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. Şu anda Kayseri Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğünde Yapı Denetimi Şube Müdürü olarak çalışmaktadır.