

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

**SONLU ELEMANLAR METODU İLE NR/SBR TİPİ
ELASTOMER ESASLI MALZEMELERİN DAVRANIŞ
MODELLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Deniz SOYEL

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ahmet DEMİRER

Haziran 2008

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

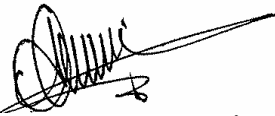
**SONLU ELEMANLAR METODU İLE NR/SBR TİPİ
ELASTOMER ESASLI MALZEMELERİN DAVRANIŞ
MODELLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Deniz SOYEL

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE EĞİTİMİ

Bu tez 16 / 06 /2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



Yrd.Doç. Dr. Ahmet DEMİRER
Jüri Başkanı



Yrd. Doç. Dr. Mesut DURAT
Üye



Yrd. Doç. Dr. Muhammet CERİT
Üye

ÖNSÖZ

Kauçuk malzemeler, günümüzde başta lastik endüstrisi olmak üzere, taşıtlarda binalarda, ayakkabı, taşıyıcı bant, hortum imalatında ve sağlık sektöründe kullanılan önemli mühendislik malzemeleridir. Kauçuk türü malzemelerin mekanik davranışlarının modellenmesi, katkı maddeleri ve üretim yöntemlerine bağlı olarak fiziksel özelliklerindeki çeşitlilik, mekanik davranış modelinin doğruluğunu test etmek için birden fazla çeşitli deneyler yapılması, kauçuğun viskoelastik bir malzeme olması gerçekçi modelin kurulmasında önemli bir sorun oluşturmaktadır.

Sonlu eleman yöntemi özellikle son yıllarda çok büyük gelişme göstermiştir. Zor ve karmaşık olarak bilinen problemler bu yöntemle daha kolay çözümler hale gelmiştir.

Bu çalışmada NR/SBR malzemesine değişik oranlarda cam küre, mika tozu ve wollastonit dolgu malzemeleri ilave edilerek elastomer karışımlar oluşturulmuştur. Oluşturulan kompozit malzemeler çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Elde edilen verilerle sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapan ABAQUS 6.7.1 yazılım programı kullanılarak, malzeme davranış modelleri belirlenmiştir.

Çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli danışman hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet Demirel'e ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Ergün Nart'a, deney çalışmalarım bana yardımcı olan Federal Elektrik Yatırım ve Ticaret A.Ş.'nin Sıcak Pres Proses Kontrol Görevlisi Bedri Ferah'a, Tezimize yapmış olduğu maddi destekten dolayı SAÜ Bilimsel Araştırma Projesi Komisyonuna ayrıca çalışmalarım süresince manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ..... | vii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | x |
| TABLolar LİSTESİ..... | xv |
| ÖZET..... | xxi |
| SUMMARY..... | xxii |

BÖLÜM 1.

| | |
|------------|---|
| GİRİŞ..... | 1 |
|------------|---|

BÖLÜM 2.

| | |
|--|----|
| KAUÇUKLAR-ELASTOMERLER VE ÖZELLİKLERİ | 10 |
| 2.1. Kauçuk ve Tarihçesi..... | 10 |
| 2.1.1. Kauçuğun tarihçesi..... | 11 |
| 2.2. Kauçuklar ve Elastomerler..... | 13 |
| 2.2.1. Kauçuk türleri..... | 16 |
| 2.2.1.1. Doğal kauçuk (NR)..... | 16 |
| 2.2.1.2. Stiren Butadien kauçuk (SBR)..... | 17 |
| 2.2.1.3. Nitril kauçuk (NBR) | 19 |
| 2.2.1.4. Termoplastik Elastomerler (TPE) | 22 |
| 2.2.1.5. Diğer kauçuk türleri | 24 |
| 2.3. Türk Kauçuk İşleme Sanayi | 24 |
| 2.4. Kauçuklara Katılan Katkı Maddeleri | 26 |
| 2.4.1. Plastikleştiriciler | 26 |
| 2.4.2. Antioksidantlar | 27 |

| | |
|---|----|
| 2.4.3. UV stabilizerleri | 27 |
| 2.4.4. Renklendiriciler | 27 |
| 2.4.5. Antistatik önleyiciler | 28 |
| 2.4.6. Dolgu ve güçlendirici maddeler | 29 |
| 2.4.7. Kaydırıcılar | 30 |
| 2.4.8. İşleme (proses) kolaylaştırıcılar | 31 |
| 2.4.9. Köpük yapıcılar | 31 |
| 2.5. Kauçuklarda Kullanılan Bazı Dolgu Maddeleri..... | 31 |
| 2.5.1. Cam küre (Quartz) | 33 |
| 2.5.2. Mika tozu (Mica) | 34 |
| 2.5.3. Wollastonit | 35 |
| 2.5.4. Karbon siyahı | 35 |
| 2.5.5. Diğerleri | 37 |

BÖLÜM 3.

| | |
|--|----|
| NR/SBR TİPİ ELASTOMER ESASLI MALZEMELERE UYGULANAN ÇEKME DENEYİ YÖNTEMİ | 38 |
| 3.1. Çekme Deneyi..... | 38 |
| 3.1.1. Çekme deneyi ile ilgili hesaplar | 41 |
| 3.1.2. Çekmede kalıcı deformasyon | 42 |
| 3.1.3. Çekmede kopma mukavemeti | 43 |

BÖLÜM 4.

| | |
|---|----|
| ELASTOMERLERİN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİYLE DAVRANIŞ MODELLERİ | 45 |
| 4.1. Kauçuk Esaslı Malzemelerinin Hiperelastik Davranışı | 45 |
| 4.1.1. Sıkıştırılabilirlik | 45 |
| 4.2. İzotropik Varsayım | 48 |
| 4.3. Birim Şekil Değiştirme Potansiyel Enerjileri | 48 |
| 4.4. Hiperelastik Malzemeleri Değerlendirme | 49 |
| 4.4.1. Arruda-Boyce formu | 49 |
| 4.4.2. Marlow formu | 50 |
| 4.4.3. Mooney-Rivlin formu | 51 |

| | |
|---|----|
| 4.4.4. Neo-Hookean formu | 52 |
| 4.4.5. Ogden formu | 53 |
| 4.4.6. Polynomial (Polinom) formu | 54 |
| 4.4.7. Reduced polynomial (Azaltılmış Polinom) formu | 56 |
| 4.4.8. Van der Waals formu | 57 |
| 4.4.9. Yeoh formu | 58 |
| 4.5. Isıl Genleşme (Thermal expansion) | 59 |
| 4.6. Hiperelastik Malzeme Davranışının Tanımlaması | 60 |
| 4.7. Viskoelastik ve Histeretik Malzemeler | 61 |
| 4.8. Sıkıştırılabilirliğin Açıklaması | 61 |
| 4.9. Malzeme Katsayılarını Doğrudan Belirtme | 62 |
| 4.10. Malzeme Katsayılarını Ayarlamak İçin Test Verisinin Kullanımı. | 62 |
| 4.11. Marlow Modelini Belirtme | 64 |
| 4.12. Deneysel Testler | 66 |
| 4.12.1. Tek eksenli testler | 68 |
| 4.12.2. Eş iki eksenli testler | 69 |
| 4.12.3. Düzlemsel testler | 70 |
| 4.12.4. Hacimsel testler | 72 |
| 4.12.5. Eşdeğer deneysel testler | 73 |
| 4.13. Test Verisi Yumuşatma | 74 |
| 4.14. Deneysel Veriye Karşı Malzeme Davranış Model Tahmini | 75 |
| 4.15. Hiperelastik Malzeme Dengesi | 76 |
| 4.16. Uygun Test Verisinin Dengesi Ve Doğruluğunu Geliştirmek | 78 |
| 4.17. Elemanlar | 81 |
| 4.18. Analiz Programının Standart Bölümünde Hybrid'e Karşı Saf Yer Değiştirme Formülasyonu | 81 |
| 4.19. Analiz Programının Standard Bölümünde Birbirine Zıt Mod Elemanlar | 82 |

BÖLÜM 5.

| | |
|-------------------------------------|----|
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR | 83 |
| 5.1. NR/SBR Karışım Malzemesi | 83 |
| 5.2. Çekme Deneyinin Yapılışı | 85 |

| | |
|---|-----|
| 5.3. Çekme Deneyi Sonucu Hesaplanan Değerler | 87 |
| 5.4. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Davranışın Modellenmesi | 88 |
| 5.4.1. Abaqus'te çekme numunesinin modellenmesi | 90 |
| 5.4.2. Abaqus evaluate material malzeme form seçimi..... | 93 |
| 5.4.3. Abaqus evaluate material sonuçları | 95 |
| 5.4.4. Abaqus'te analiz | 149 |
| | |
| BÖLÜM 6. | |
| DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA | 154 |
| 6.1. CK 250 Malzemelerinin Deney Sonuçları | 154 |
| 6.2. CK 500 Malzemelerinin Deney Sonuçları | 155 |
| 6.3. CK 750 Malzemelerinin Deney Sonuçları | 156 |
| 6.4. CK 1000 Malzemelerinin Deney Sonuçları | 157 |
| 6.5. MT 250 Malzemelerinin Deney Sonuçları | 159 |
| 6.6. MT 500 Malzemelerinin Deney Sonuçları | 160 |
| 6.7. MT 750 Malzemelerinin Deney Sonuçları | 161 |
| 6.8. MT 1000 Malzemelerinin Deney Sonuçları | 162 |
| 6.9. W 250 Malzemelerinin Deney Sonuçları | 163 |
| 6.10. W 500 Malzemelerinin Deney Sonuçları | 164 |
| 6.11. W 750 Malzemelerinin Deney Sonuçları | 165 |
| 6.12. W 1000 Malzemelerinin Deney Sonuçları | 166 |
| | |
| BÖLÜM 7. | |
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 169 |
| 7.1. Sonuçlar | 169 |
| 7.2. Öneriler | 170 |
| | |
| KAYNAKLAR | 172 |
| ÖZGEÇMİŞ | 175 |

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|-------|--|
| ACM | : Poliakrilik kauçuk |
| AU | : Poliester üretan kauçuğu |
| ACN | : Akrilo nitril |
| A_1 | : Uzama sonunda oluşan kesit alanı (mm^2) |
| A_0 | : İlk kesit alanı (mm^2) |
| BB | : Butil benzil pitalat |
| BR | : Butadien kauçuğu |
| C | : Sıcaklığa bağlı malzeme parametresi |
| CK | : Cam küre |
| CM | : Klor polietilen kauçuk |
| CO | : Epiklorhidrin homopolimeri |
| COPEs | : Kopolier – eter elastomerler |
| CR | : Kloropren kauçuk |
| CSM | : Klorsulfonlanmış polietilen kauçuk |
| CTP | : Cam elyaf takviyeli polyester |
| D | : Sıcaklığa bağlı malzeme parametresi |
| DBP | : Dibutilpithalat (plastikleştirici) |
| DCP | : Dikaprilpithalat (plastikleştirici) |
| DEG | : Dietilenglikol (plastikleştirici) |
| DIBP | : Di-butilpithalat (plastikleştirici) |
| DIDA | : Di-desiladipet (plastikleştirici) |
| DIDP | : Di-desilpitalat (plastikleştirici) |
| DIPT | : Di-tridesilpitalat (plastikleştirici) |
| DOA | : Di-2-etilheksiladipet (plastikleştirici) |
| DOİP | : Di-2-etilheksil-i-pitalat (plastikleştirici) |

| | |
|------------------------|---|
| DOP, DOS | : Di-2-etilheksilpatalat-sebakat (plastikleştirici) |
| DOZ | : Di-2-etilheksilazelet (plastikleştirici) |
| e | : Nominal birim şekil değiştirme |
| EACM | : Etilen-akrilat kauçuğu |
| ECO | : Epiklorhidrin kopolimeri |
| ELO | : Epoksidized linsedoyil (plastikleştirici) |
| EPM | : Etilen propilen kopolimeri |
| EPDM | : Etilen-propilen-dien terpolimeri |
| EU | : Polieter üretan kauçuğu |
| EVM | : Vinilasetat etilen kauçuğu |
| F | : Yük (Kuvvet) (N) |
| FKM | : Karbonlanmış floro kauçuk |
| HAF N330 | : Karbon siyahı çeşidi |
| HNBR | : Hidrojen akronitril bütadien kauçuk |
| IR | : Sentetik izopren kauçuğu |
| IIR | : Butil (izobuten-izopren) kauçuk |
| ISAF N220 | : Karbon siyahı çeşidi |
| \bar{I}_1, \bar{I}_2 | : Birinci ve ikinci deviatorik birim şekil değiştirme sabitleri |
| J | : Toplam hacim oranı |
| J^{th} | : Isıl hacim oranı |
| J^{el} | : Elastik hacim oranı |
| K_0 | : Hacimsel basınç katsayısı |
| L_1 | : Çekmede numunenin son boyu |
| L_s | : Çekmede işaretli kısmın boyu |
| L_0 | : Çekmede numunenin ilk boyu |
| MFQ | : Florosilikon kauçuğu |
| MPa | : Mega paskal |
| MPVQ | : Metil-fenil-vinil silikon kauçuk |
| MQ | : Metil silikonlar |
| Q,PVMQ | : Silikon kauçuklar |
| MT | : Mika tozu |
| MVQ | : Metil-vinil silikon kauçuk |
| N | : Bir malzeme parametresi |

| | |
|----------------|--|
| NBR | : Nitril (akrilonitril butadien) kauçuk |
| NR | : Doğal Kauçuk |
| PE | : Polietilen |
| PMQ | : Fenil metil silikonlar |
| PP | : Polipropilen |
| PS | : Polisitren |
| SBCs | : Stirenik blok kopolimerler |
| SBR | : Stiren butadien kauçuk |
| SBS | : Stiren butadien stiren kopolimeri |
| T | : Polisülfür kauçuğu |
| TCF | : Trisiresilfosfat |
| T _g | : Camsı geçiş sıcaklığı |
| TH | : Thiryum |
| TİOTM | : Tri-Oktiltrimelliatet |
| TOF | : Tri-2-etilheksilfosfat |
| TOTM | : Tri-2-etilheksiltrimelliatet |
| TPE, TPEs | : Termoplastik elastomerler |
| TPF | : Tripenilfosfat |
| TPOEs | : Termoplastik poliolefin elastomerler |
| TPUs | : Termoplastik poliüretanlar |
| U | : Birim Şekil değiştirme potansiyel enerjisi |
| VMQ | : Metil vinil siloksanlar |
| W | : Wollastonit |
| β | : Sabit karışım parametresi |
| μ_0 | : Ön kayma katsayısı |
| μ | : Ön kayma modülü |
| α_1 | : Sıcaklığa bağlı malzeme parametresi |
| λ_i | : Uzamalar |
| σ_g | : Gerçek gerilim direnci |
| ϵ | : Gerçek uzama |
| Δ | : Katsayılar determinantı |
| ν | : Poisson oranı |
| σ | : Gerilim direnci |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | | |
|-------------|---|----|
| Şekil 1.1. | Türkiye’de 1998 Yılında Kauçuk Türlerinin Toplam Kauçuk Tüketimi İçindeki Payları | 1 |
| Şekil 2.1. | Lateks (kauçuk sütü) nün kauçuk ağacından elde edilmesi | 10 |
| Şekil 2.2. | Polimerlerin çapraz bağ yoğunluğu | 14 |
| Şekil 2.3. | Polimerlerin elastiklik modülünün sıcaklığa göre değişimi | 15 |
| Şekil 2.4. | Doğal kauçuğun yapısı | 16 |
| Şekil 2.5. | SBR nin yapısı | 18 |
| Şekil 2.6. | NBR nin yapısı | 19 |
| Şekil 2.7. | NBR nin polimerizasyon reaksiyonu | 21 |
| Şekil 2.8. | Termoplastik elastomerler | 22 |
| Şekil 2.9. | Termoplastik Elastomerlerin Faz Yapısı | 23 |
| Şekil 2.10. | Dolgu maddeleri şekilleri | 32 |
| Şekil 2.11. | Cam küre | 33 |
| Şekil 2.12. | Mika | 34 |
| Şekil 2.13. | Wollastonit | 35 |
| Şekil 3.1. | Çekme cihazı | 39 |
| Şekil 3.2. | Basit çekme deneyi genel prensibi | 39 |
| Şekil 3.3. | Standart papyon deney numunesi | 40 |
| Şekil 4.1. | Test verisiyle Marlow modelin sonuçları..... | 65 |
| Şekil 4.2. | Deformasyon modlarının şematik resimleri | 67 |
| Şekil 4.3. | Hidrostatik gerilmenin üst üste koyulması (süper pozisyon) aracılığıyla eşdeğer deformasyon modları | 74 |
| Şekil 5.1. | TS 1398-2 Standart papyon deney numunesi | 86 |
| Şekil 5.2. | Testometric micro 350 PCX çekme test cihazı ve bilgisayar donanımı ve çekilmiş TS 1398-2 standart test numuneleri | 86 |
| Şekil 5.3. | Çekme metal ağızlar | 87 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Şekil 5.4. | Abaqus'ün ana penceresinin bileşenleri | 90 |
| Şekil 5.5. | Yeni veri tabanı oluşturma | 90 |
| Şekil 5.6. | Parça oluşturma | 91 |
| Şekil 5.7. | Numunenin 2 boyutlu çizimi | 91 |
| Şekil 5.8. | Numunenin 3 boyutlu modeli | 92 |
| Şekil 5.9. | Malzeme tanımlama | 93 |
| Şekil 5.10. | Malzeme özelliklerini girme | 94 |
| Şekil 5.11. | Malzeme form seçimi testi | 94 |
| Şekil 5.12. | Meksika şapkası – top kıyaslaması | 95 |
| Şekil 5.13. | Denge tipleri | 95 |
| Şekil 5.14. | CK 250 için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği | 96 |
| Şekil 5.15. | CK 250 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması | 99 |
| Şekil 5.16. | CK 500 için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği | 100 |
| Şekil 5.17. | CK 500 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması | 104 |
| Şekil 5.18. | CK 750 için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği | 105 |
| Şekil 5.19. | CK 750 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması | 108 |
| Şekil 5.20. | CK 1000 için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği | 109 |
| Şekil 5.21. | CK 1000 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması | 113 |
| Şekil 5.22. | MT 250 malzemesi için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği | 114 |
| Şekil 5.23. | MT 250 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması | 117 |
| Şekil 5.24. | MT 500 malzemesi için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği | 118 |
| Şekil 5.25. | MT 500 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması | 122 |
| Şekil 5.26. | MT 750 malzemesi için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği | 123 |
| Şekil 5.27. | MT 750 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin | |

| | | |
|-------------|--|-----|
| | karşılaştırılması | 126 |
| Şekil 5.28. | MT 1000 malzemesi için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği | 127 |
| Şekil 5.29. | MT 1000 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması | 131 |
| Şekil 5.30. | W 250 malzemesi için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği | 132 |
| Şekil 5.31. | W 250 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması | 135 |
| Şekil 5.32. | W 500 malzemesi için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği | 136 |
| Şekil 5.33. | W 500 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması | 140 |
| Şekil 5.34. | W 750 malzemesi için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği | 141 |
| Şekil 5.35. | W 750 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması | 144 |
| Şekil 5.36. | W 1000 malzemesi için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği | 145 |
| Şekil 5.37. | W 1000 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması | 149 |
| Şekil 5.38. | Numunenin kesit özelliklerinin tanımlanması | 150 |
| Şekil 5.39. | Tanımlanmış kesit ve malzeme özelliklerinin numuneye atanması | 150 |
| Şekil 5.40. | Numunenin montaj sayfasına çağırılması | 151 |
| Şekil 5.41. | Numuneye çözüm tanımlama | 151 |
| Şekil 5.42. | Numuneye sınır koşulu atama | 151 |
| Şekil 5.43. | Numunenin mesh tanımlamalarının yapılması | 152 |
| Şekil 5.44. | Numunenin meshlenmesi | 152 |
| Şekil 5.45. | Analiz penceresi | 153 |
| Şekil 5.46. | Analiz sonucu ve simülasyon | 153 |
| Şekil 6.1. | CK 250 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin karşılaştırılması | 154 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Şekil 6.2. | CK 250 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması | 155 |
| Şekil 6.3. | CK 500 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme- birim şekil değiştirme grafiğinin karşılaştırılması | 155 |
| Şekil 6.4. | CK 500 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması | 156 |
| Şekil 6.5. | CK 750 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin karşılaştırılması | 156 |
| Şekil 6.6. | CK 750 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması | 157 |
| Şekil 6.7. | CK 1000 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin karşılaştırılması | 157 |
| Şekil 6.8. | CK 1000 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması | 158 |
| Şekil 6.9. | MT 250 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin karşılaştırılması | 159 |
| Şekil 6.10. | MT 250 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması | 159 |
| Şekil 6.11. | MT 500 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin karşılaştırılması | 160 |
| Şekil 6.12. | MT 500 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük - Uzama grafiğinin karşılaştırılması | 160 |
| Şekil 6.13. | MT 750 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin karşılaştırılması | 161 |
| Şekil 6.14. | MT 750 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması | 161 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Şekil 6.15. | MT 1000 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin karşılaştırılması | 162 |
| Şekil 6.16. | MT 1000 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması | 162 |
| Şekil 6.17. | W 250 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin karşılaştırılması | 163 |
| Şekil 6.18. | W 250 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması | 164 |
| Şekil 6.19. | W 500 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin karşılaştırılması | 164 |
| Şekil 6.20. | W 500 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması | 165 |
| Şekil 6.21. | W 750 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin karşılaştırılması | 165 |
| Şekil 6.22. | W 750 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması | 166 |
| Şekil 6.23. | W 1000 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin karşılaştırılması | 166 |
| Şekil 6.24. | W 1000 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması | 167 |

TABLolar LİSTESİ

| | | |
|------------|---|----|
| Tablo 1.1. | Dünya kauçuk üretimi | 2 |
| Tablo 2.1. | Kauçuk türlerinin isimleri ve kısaltmaları | 16 |
| Tablo 2.2. | SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin mekanik ve termal özelliklerinin karşılaştırılması | 25 |
| Tablo 2.3. | Türkiye’de Kauçuk Tüketim Projeksiyonu (1000 Ton) (2006 yılı) | 25 |
| Tablo 2.4. | Türkiye’de Kullanım Alanına Göre Kauçuk Tüketimi (1991) ... | 28 |
| Tablo 2.5. | Fırın, kanal ve ısı siyahlarının element bileşimi | 36 |
| Tablo 3.1. | SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin mekanik özellikleri | 41 |
| Tablo 4.1. | Katsayılar | 46 |
| Tablo 5.1. | Deneylerde kullanılan ekipmanların teknik özellikleri | 83 |
| Tablo 5.2. | Deneylerde kullanılan dolguların teknik özellikleri ve ticari isimleri | 84 |
| Tablo 5.3. | Formülasyonlardaki kauçuk ve dolgu maddesi oranları | 85 |
| Tablo 5.4. | CK 250 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar | 96 |
| Tablo 5.5. | CK 250 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar | 97 |
| Tablo 5.6. | CK 250 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar | 97 |
| Tablo 5.7. | CK 250 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar | 98 |
| Tablo 5.8. | CK 250 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar | 98 |
| Tablo 5.9. | CK 250 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar | 99 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tablo 5.10. | CK 500 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar | 101 |
| Tablo 5.11. | CK 500 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar | 101 |
| Tablo 5.12. | CK 500 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar | 102 |
| Tablo 5.13. | CK 500 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar | 102 |
| Tablo 5.14. | CK 500 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar | 103 |
| Tablo 5.15. | CK 500 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar | 103 |
| Tablo 5.16. | CK 750 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar | 105 |
| Tablo 5.17. | CK 750 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar | 106 |
| Tablo 5.18. | CK 750 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar | 106 |
| Tablo 5.19. | CK 750 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar | 107 |
| Tablo 5.20. | CK 750 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar | 107 |
| Tablo 5.21. | CK 750 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar | 108 |
| Tablo 5.22. | CK 1000 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar | 110 |
| Tablo 5.23. | CK 1000 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar | 110 |
| Tablo 5.24. | CK 1000 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar | 111 |
| Tablo 5.25. | CK 1000 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar | 111 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tablo 5.26. | CK 1000 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar | 112 |
| Tablo 5.27. | CK 1000 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar | 112 |
| Tablo 5.28. | MT 250 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar | 114 |
| Tablo 5.29. | MT 250 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar | 115 |
| Tablo 5.30. | MT 250 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar | 115 |
| Tablo 5.31. | MT 250 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar | 116 |
| Tablo 5.32. | MT 250 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar | 116 |
| Tablo 5.33. | MT 250 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar | 117 |
| Tablo 5.34. | MT 500 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar | 119 |
| Tablo 5.35. | MT 500 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar | 119 |
| Tablo 5.36. | MT 500 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen | 120 |
| Tablo 5.37. | MT 500 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar | 120 |
| Tablo 5.38. | MT 500 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar | 121 |
| Tablo 5.39. | MT 500 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar | 121 |
| Tablo 5.40. | MT 750 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar | 123 |
| Tablo 5.41. | MT 750 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar | 124 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tablo 5.42. | MT 750 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar | 124 |
| Tablo 5.43. | MT 750 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar | 125 |
| Tablo 5.44. | MT 750 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar | 125 |
| Tablo 5.45. | MT 750 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar | 126 |
| Tablo 5.46. | MT 1000 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar | 128 |
| Tablo 5.47. | MT 1000 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar | 128 |
| Tablo 5.48. | MT 1000 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar | 129 |
| Tablo 5.49. | MT 1000 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar | 129 |
| Tablo 5.50. | MT 1000 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar | 129 |
| Tablo 5.51. | MT 1000 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar | 130 |
| Tablo 5.52. | W 250 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar | 132 |
| Tablo 5.53. | W 250 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar | 133 |
| Tablo 5.54. | W 250 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar | 133 |
| Tablo 5.55. | W 250 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar | 134 |
| Tablo 5.56. | W 250 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar | 134 |
| Tablo 5.57. | W 250 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar | 135 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tablo 5.58. | W 500 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar | 137 |
| Tablo 5.59. | W 500 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar | 137 |
| Tablo 5.60. | W 500 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar | 138 |
| Tablo 5.61. | W 500 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar | 138 |
| Tablo 5.62. | W 500 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar | 139 |
| Tablo 5.63. | W 500 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar | 139 |
| Tablo 5.64. | W 750 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar | 141 |
| Tablo 5.65. | W 750 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar | 142 |
| Tablo 5.66. | W 750 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar | 142 |
| Tablo 5.67. | W 750 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar | 143 |
| Tablo 5.68. | W 750 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar | 143 |
| Tablo 5.69. | W 750 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar | 144 |
| Tablo 5.70. | W 1000 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar | 145 |
| Tablo 5.71. | W 1000 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar | 146 |
| Tablo 5.72. | W 1000 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar | 147 |
| Tablo 5.73. | W 1000 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar | 147 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tablo 5.74. | W 1000 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar | 147 |
| Tablo 5.75. | W 1000 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar | 148 |

ÖZET

Anahtar kelimeler: NR, SBR, Wollastonit, Cam küre, Mika tozu, Elastomer, Kauçuk, Sonlu elemanlar metodu, Abaqus, Malzeme karakterizasyonu.

Kauçuk malzemeler, endüstride her geçen gün kullanım alanları çoğalan mühendislik malzemeleridir. Sonlu elemanlar yöntemi gibi bilgisayar destekli tasarıma yönelik sayısal yöntemler günümüzde mühendislik uygulamalarının vazgeçilmez araçlarından. Bu yöntemlerin yapının davranışını modellemedeki başarıları, diğer etkenler yanında, modele girilen verilerin gerçeği ne ölçüde doğru bir şekilde yansıttıklarına bağlıdır. Bu sebeple kauçuk türü malzemelerin mekanik davranışı deneysel olarak belirlenerek matematiksel modeli kurulmalı ve bu matematiksel model içerisindeki veriler doğru olarak belirlenmelidir. Kauçuk türü malzemelerin mekanik davranışlarının modellenmesinde, katkı maddeleri ve üretim yöntemlerine bağlı olarak fiziksel özelliklerindeki çeşitlilik yanında, inelastik özellikler sergilemeleri, kauçuk türü malzemelerin mekanik davranışını modellemek yada doğruluğunu test etmek için birden fazla çeşitli deneyler yapılması, kauçuğun bazı mekanik özelliklerinin zamanla değişmesi yani viskoelastik bir malzeme olması gerçeği modelin kurulmasında sorun kaynağıdır.

Bu çalışmadaki en önemli amaç, az sayıda deneysel veri ile (daha az enerji, maliyet ve zaman) gerçeği bir modelin kurulmasıdır. Ayrıca sonuçlanmış doktora çalışmasında ayakkabı tabanlarında kullanılmış bu malzemelerin, farklı alanlarda kullanılabilmesi için malzeme karakteristiğinin belirlenmesidir. Çalışmada, içinde dolgu malzemesi olarak değişik miktarlarda (250g.-500g.-750g.-1000g.) cam küre, mika tozu, wollastonit kullanılan NR/SBR malzemelerinin, sonlu eleman yönteminin söz konusu olan özellikleri dikkate alınarak bu yöntemle çözüm yapan Abaqus 6.7.1 yazılım programının kullanılmasıyla, malzeme davranış modelleri belirlenmiştir.

Deneysel çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, NR/SBR malzemesinden kesilen papyon şeklindeki çekme numunelerinin çekme deneyleri yapılmıştır. Deney sonucunda elde edilen veriler ile sonlu elemanlar programında malzemenin tanımlanması için gerekli olan değerler hesaplanmıştır. Abaqus programında çekme numuneleri birebir modellenerek, çekme deneyinden elde edilen veriler doğrultusunda tanımlanan malzeme modele atanmış, Abaqus'ün malzeme değerlendirme kısmında malzeme özellikleri test edilerek uygun malzeme modeli olarak Marlow seçilmiştir. Model seçiminden sonra numune analiz edilmiş, elde edilen test ve analiz verileri grafiklere dönüştürülüp sonuçlar kısmında karşılaştırılmıştır. Sonuçta, Cam küre (CK) dolgulu malzemelerde analiz sonucunda hata paylarının yaklaşık % 0,25 – 0,5, Mika tozu (MT) için yaklaşık % 0,01 – 0,5, Wollastonit (W) için ise yaklaşık %0,2 – 0,44 arasında olduğu tespit edilmiştir.

DETERMINATION OF MATERIAL MODELS OF NR/SBR BASED ELASTOMERS USING FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

Keywords: NR, SBR, Wollastonit, Glass spheres, Mica Powder, Elastomers, Rubbers, Finite Element Method, Abaqus CAE, Material Characterization

Rubbers are important engineering materials being used in industries for a long time. Their usage is increasing more and more in everyday. Similarly, Numerical methods such as Finite Element Method is inevitable tool being used in Computer Aided Design and Manufacturing.

The main aim of this research is to establish a realistic FE model with uniaxial data and determine the characteristic of special elastomer materials used in a PhD. Dissertation and to show that these materials can be used in different application areas.

In this research, material behavior of NR/SBR materials with different filler materials (in the amount of 250g, 500g, 750g, 1000g) such as glass sphere, mica powder, wollastonite was determined by using Abaqus 6.7.1.

The experimental work was performed in two stages. In the first stage, test parts were made of NR/SBR materials were produced and all uniaxial tension tests were conducted properly. Data from experimental results were transferred to Abaqus CAE. All mathematical models were tested in Abaqus to determine the appropriate one. As a result, Mooney-Rivlin form was found to be the ideal mathematical material model with related coefficients.

Finally, experimental and FE results were compared and it is found that there are %0,25-0,5 error for the elastomer material with glass sphere fillers, %0,01-0,5 error with mica powder fillers, 0,2-0,44 for wollastonit fillers.

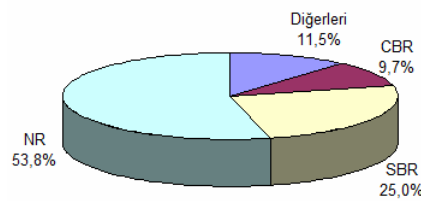
BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elastomerler, oda sıcaklığında gerilme uygulandığında ilk boyunun en az iki katı uzayabilen ve bu gerilme kalktığında hızla ilk boyutuna dönebilen, elastisite modülleri çok düşük polimer malzemelerdir ve çapraz bağlanabilen kauçuk malzemelerden elde edilirler. Bu malzemelerin elastikliği, uzun molekül zincirlerinin kendi içlerinde ve birbirlerine göre hareket etmelerinden kaynaklanır. Elastomer molekülleri seyrek çapraz bağlı oldukları için, kuvvet uygulandığında birbirlerinden kayarak uzaklaşmazlar.

Elastomerler günümüzde başta lastik endüstrisi olmak üzere, taşıtlarda, binalarda, ayakkabı, taşıyıcı bant, hortum imalatında, sağlık, uzay ve havacılık sektöründe kullanılmaktadır [1].

Bugün ileri endüstri ülkelerinde sentetik kauçuk yapımı gittikçe artmakla birlikte doğal kauçuk hala ön planda gelmektedir [2].

Kauçuklar ülkemizde de otomotiv, ambalaj, makine imalatı gibi bir çok endüstri kolunda kullanılmaktadır. Kauçuk türlerinin ülkemizdeki tüketimi ise Şekil 1.1.'de gösterilmektedir. Dünya kauçuk üretimi oranının yüzde payları ve ton olarak ülkelerdeki dağılımı ise Tablo 1.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Türkiye'de 1998 Yılında Kauçuk Türlerinin Toplam Kauçuk Tüketimi İçindeki Payları [3]

Tablo 1.1. Dünya kauçuk üretimi [2]

| Ülke İsmi | Ton | % |
|---|-----------|-------|
| Batı Malezya | 1.279.200 | 42,86 |
| Endonezya | 844.800 | 28,37 |
| Tayland | 337.200 | 11,24 |
| Seylan | 140.400 | 4,72 |
| Hindistan | 109.200 | 3,79 |
| Liberya | 64.100 | 2,16 |
| Nijerya | 51.000 | 1,72 |
| Doğu Malezya | 46.200 | 1,56 |
| Zaire | 40.000 | 1,35 |
| Brezilya | 25.800 | 0,86 |
| Güney Vietnam | 19.900 | 0,68 |
| Kamerun | 12.800 | 0,43 |
| Kamboçya | 6.000 | 0,22 |
| Sayısı 1 milyara yaklaşan kauçuk ağaçları yeryüzünde toplam 4,5 – 5 milyon hektarlık bir alanı kaplamaktadır. | | |

Doğal kauçuğun maliyetinin yüksek olması üreticileri kauçuğun suni olarak elde edilmesine itmiştir. Bununla beraber kauçuğa farklı katkı ve dolgu malzemeleri ilave edilmesi maliyet ve teknik özellikleri açısından olumlu sonuçlar vermiştir [4].

Kauçuklarda maliyeti düşürmek ve mekanik özellikleri iyileştirmek gibi çeşitli amaçlar doğrultusunda çeşitli dolgu maddeleri kullanılmaktadır. Bunlar maliyeti düşürmek amaçlı, alüminyum silikatlar, kalsiyum karbonat, silika, baryum sülfat vb , mekanik özellikleri iyileştirmek amaçlı, cam küre, mika tozu, wollastonit ve karbon siyahı gibi dolgu maddeleridir.

Elastomerlerin gerek birbirleriyle ve gerekse farklı dolgu ve katkılarla karışımı sonucunda oluşan yeni malzeme türleri kullanım alanlarına göre bazı testlerden geçirilmektedir. Bu testlerin teknik olarak araştırmalarda kullanılması maksadıyla simülasyon tekniklerinden yararlanılmaktadır.

Karmaşık tasarım problemlerinin çözümünde kullanılan en yaygın simülasyon tekniklerinden biri “Sonlu Elemanlar Analizi”dir. Teknolojinin hızlı ilerlemesi günlük hayatta karşılaştığımız problemlerin çözümünü daha zor ve karmaşık hale getirmektedir. Bilgisayarlar ise karşılaşılan bu zorlukları ve problemin çözümünü kolaylaştıran birer analiz aracı haline gelmişlerdir. Bunun bir sonucu olarak problemin karmaşıklığına dokunmadan veya problemin fiziğinde çok küçük kabuller ile yaklaşık sayısal çözümler üretmek mümkün olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ise problemin geometrisini, malzeme özelliklerini ve yükleme durumunu sonlu elemanlar paket programına veri olarak girilerek problemin simülasyonunun gerçekleştirildiği bir sayısal analiz yöntemidir. Bu analizlerin doğruluğu büyük ölçüde sonlu elemanlar paket programına girilen geometrik ve malzeme özellikleri ve yükleme durumunun gerçekliliğine bağlı olmaktadır.

Metalik malzemelerin dizayn uygulamaları pek çok sayıda sonlu elemanlar paket programlar yardımıyla rahatlıkla gerçekleştirilebilmektedir. Fakat kauçuk türü malzemeler için aynı şeyi söylemek mümkün değildir. Bunun yerine şekil değiştirme enerji fonksiyonu yardımı ile bünye denklemi elde edilmeye çalışılmıştır. Bunun için birçok araştırmacı farklı şekil değiştirme enerji fonksiyonu önermiştir.

Kauçuk mekaniği üzerine çalışma yapan araştırmacılar matematiksel formda şekil değiştirme enerji fonksiyonlarını elde ettikten sonra bu fonksiyon içerisinde yer alan malzeme sabitlerini deneysel olarak elde etmeye çalışmışlardır. Bunun için birçok deney, standart olmayan çekme hızında ve numune boyutunda gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler arasında tek eksenli çekme, tek eksenli basma, iki eksenli çekme, eş-iki eksenli çekme, sade kayma şekil değişimi, basit kayma deneyleri örnek olarak verilebilir. Özellikle bunlardan tek eksenli çekme, iki eksenli çekme, eş-iki eksenli çekme ve sade kayma şekil değişimi deneyleri malzeme sabitlerinin belirlenmesinde sıkça kullanılan deneylerdir [4].

Sonlu eleman yöntemi özellikle son yıllarda çok büyük bir gelişme kaydetmiştir. Bu yöntemde gerçek bir problem daha basit bir problem şeklinde modellenip çözüldüğünden yaklaşık çözüm bulunmaktadır. Esas itibarıyla basit olan bu maksatlı ve güçlü yöntem, bilim adamlarına ve mühendislere tamamen yeni bir alan açmıştır.

Bilgisayar teknolojisinin hızla gelişmesiyle de çok yakın geçmişte zor ve karmaşık olarak bilinen problemler bu yöntemle daha kolay çözümler hale gelmiştir [5].

Bu çalışmada, sonlu eleman yönteminin söz konusu olan özellikleri dikkate alınarak sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapan ABAQUS 6.7.1 yazılım programı kullanılmıştır. Çekme deneyleri ve elastomer malzemeler üzerindeki yapılmış olan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Yapılmış örnek çalışmalar;

Malac [6], karbon siyahı (N220, N330, N550) katkılı ve katkısız vulkanize edilmiş SBR malzemelerini 150°C sıcaklıkta, mekanik eksensometre ile çekme testine tabi tutmuştur. Çok küçük şekil değiştirmelerde, çekmedeki gerilme-uzama ilişkisinin umulduğu gibi doğrusal olduğuna dikkat çekmiştir. Bunun sebebinin, orjinin dikkate alınmaması, sıfır noktasındaki kesişmede kuvvet ve uzama süreleri arasındaki ön süre gecikmesinin, mekanik eksensometreden elde edilen ön birim şekil değiştirme değişim katsayılarını etkilemesi olduğunu belirtmiştir. Eksensometrelerin yüksek şekil değiştirmeler için uygun olduğunu, çok küçük şekil değiştirmeler için, mekanik eksensometreden elde edilen veriden alınan ön şekil değiştirme değerlerine oranla daha düşük değişim katsayılarına sahip sütunlar arası başlık pozisyonunun kullanılması gerektiğini tespit etmiştir.

Smitthipong ve arkadaşları [7], elektron ışınlaması yöntemiyle, farklı dozlardan NR, IR, HNBR kauçukları, yapıştırıcı ve çapraz bağlı olmayan self yapıştırıcıları çekme testine tabi tutarak ortalama molar kütle ve çapraz bağlar arasında genel ilişkiler kurmuşlardır. Bu kauçukları birkaç teknikte karakterize edip, elektron ışınlama yöntemiyle çapraz bağlama yoğunluğunun, peroksit çapraz bağ ajanı ile elde edilenden daha düşük olduğunu, yapıştırıcı Gg ve Self-yapıştırıcı Gs kauçuk enerjileri arasındaki farkları ve her iki enerjinin de arttığını belirtmiştir.

Bergström ve arkadaşları [8], katkılı elastomerlerin zamana bağlı modelinin oluşturulmasının karışık olduğunu, katkısız bir polimer davranışının genişletilip, dolgu malzemelerinin etkilerinin hesaplanabileceğini ifade etmiştir. Kurulan model,

katkısız elastomerlerde yapılan deneysel bir gözlemdir. Bunun için kloropen ve doğal kauçuk serileri ve dolgu maddesi olarak da karbon siyahını kullanmıştır. Malzeme davranışının zamana bağlılığının aslında çeşitli etkiler tarafından yönetildiğini, bu çeşitli etkilerin, gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin genişletilmesi vasıtasıyla modellenebilirliğini, deneysel veri ile önerilen modelin karşılaştırılması sonucu, bu basit yaklaşımın toplamda en az %25 ve üzeri hacimdeki dolgulu malzeme davranışının, istenilen öngörü için yeterli olduğunu ifade etmiştir.

Karadereligil [9], malzemelerin mekanik özelliklerini, çekme deneyinin yapılışını, Türk Standartları'nda çekme deneyinin tarifini, çekilecek numunenin standart ölçülerini, formüllerini ve hesaplarını, deney şartlarını ve çekme cihazlarını incelemiş ve bir çekme deney cihazının tasarımını ve imalatını gerçekleştirmiştir.

Mısırlıoğlu [10], değişik oranlarda (%9~33) E sınıfı cam elyaf içeren CTP (Cam Elyaf Takviyeli Polyester) numunelerini, çekme, eğme, darbe ve sertlik deneylerine tabi tutmuştur. Elde edilen değerler neticesinde, cam elyaf miktarındaki artışla beraber kompozit malzeme (CTP) nin darbe, çekme, sertlik, eğilme, akma mukavemetinin arttığını ve bunun aksine sünekliliğinin azaldığını belirtmiştir.

Adıgüzel [11], Sakarya ilinde bulunan sanayi kuruluşlarından Türkiye Ziraat Donatım Kurumu Traktör fabrikası, Federal Elektrik ve SAÜ Mühendislik Fakültesi'ndeki çekme, basma, cihazlarını incelemiştir. Tespit edilen makine elemanlarının çekme ve basma gerilmelerini hesaplayıp uygun malzeme seçimini yapmıştır. Talaşlı imalat aşamasından sonra ısıtılma işlemi geçilmiş ve kapasitesi 7,5 ton olan bir laboratuvar çekme cihazı imalatını gerçekleştirmiştir.

Özgirgin [12], sürekli elyaf sarım teknolojisi ile üretilen cam elyaf takviyeli plastik kompozitlerin kısa ve uzun dönemli performanslarını incelemiştir. Fiziksel ölçüm ve mekanik deneyler sonucunda, kompozit malzemenin aksenal çekme mukavemetini birinci derecede etkileyen kompozit yapıya giren cam kırığı ve boruda pişme sonrası oluşan sertlik değeri olduğunu, ideal süreç pik sıcaklık aralığının 105~115°C arasında değiştiğini, optimum reçine tüketimi sağlayan viskozite değerlerinin 185~225 cps arasında olduğunu, sürekli elyaf sarım süreci ile CTP boru üretimi

esnasında ağırlıkça (cam elyaf kırığı) chop/kum oranının yaklaşık 0,55 olacak şekilde besleme yapılması gerektiğini, boru et kalınlıklarının kullanılan hammadde miktarı ile ilişkili olduğunu ve hammadde ağırlıkça ortalama değerlerinin chop için %10-12, kum için %18-20, (cam elyaf ipi) hoop için %18-20 ve reçine için %30-33 civarında olduğunu, rijidlik mukavemetine etki eden hammaddelerin önem sırasına göre dizilişinin (cam elyaf ipi) hoop, kum ve (cam elyaf kırığı) chop şeklinde olduğunu bulmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen veriler dikkate alınarak hazırlanan numuneleri uzun dönemli performans inceleme deneylerine tabi tutmuş ve en büyük dairesellikten sapma deneyinde 7036 saat sonucunda herhangi bir hasar oluşumuna rastlamamış, uzun dönemli spesifik çember rijitliği deneyinde 6500 saat sonucunda çok düşük yüzdelerde başlangıç rijitliğinden sapma gözlemlemiş, uzun süreli hasar basıncı testinde %60 civarında daha yüksek bir performans tespit etmiş, 5760 saat uzun dönem güneş ışığı altında bırakılan numunelerde mekanik performansta bir değişim olmadığını ifade etmiştir.

Vahapoğlu [13], SBR, NBR ve NR kauçuk numunelerin inelastik özelliklerinden şekil değiştirme hızı, Mullins etkileri, histerezis, kalıcı deformasyon ve gerilme gevşemesi davranışını incelemiştir. Yapılan deneyler sonucunda, SBR, NBR ve NR malzemelerinde gerilme-uzama oranının şekil değiştirme hızına bağımlı olduğunu, malzemeye sabit deformasyon altında, ön deformasyon prosedürü uygulanmaması durumunda, artan şekil değiştirme hızında mühendislik gerilmesinin arttığını, bu malzemelerde meydana gelen gerilme yumuşamasının malzemeye uygulanan maksimum deformasyon miktarına bağlı olduğunu, ön deformasyon prosedür deneylerinde SBR ve NR kauçuk malzemelerinin hem yükleme hem boşaltmadaki gerilme-uzama oranı verileri şekil değiştirme hızından bağımsız olduğunu ve NR kauçuk malzemesinin yüklemdeki gerilme-uzama oranı verileri şekil değiştirme hızına bağımlıyken boşaltmadaki gerilme-uzama oranı verilerinin şekil değiştirme hızından bağımsız olduğunu bildirmiştir.

Vahapoğlu [4], kauçuk türü malzemelerin malzeme sabitlerini eş-iki eksenli çekme deneyi ile belirlenmesi çalışmasında, kauçuk türü malzemelerin davranışlarını karakterize eden malzeme sabitlerinin elde edilerek sonlu elemanlar paket programında veri olarak girilmesi amaçlamıştır. Yapılan bu çalışmada şekil değiştirme enerji

fonksiyonunun şekil değiştirme invariyanlarına bağlı olduğu; Neo-Hookean, Signiorini, Mooney-Rivlin, Üç Terimli Mooney-Rivlin, birinci Dereceden İnavariant, Üçüncü Dereceden Deformasyon ve Yeoh malzeme modellerine ait malzeme sabitlerini laboratuarda imal edilen eş-iki eksenli çekme deney düzeneği ile belirlemiştir. Karbon siyahı katkı maddesi katılmış ve vulkanize edilmiş üç farklı numune için sırasıyla $\lambda=2$, $\lambda =1,4$ ve $\lambda =1,8$ değerine kadar deneyler yapmıştır. Deneyler sonunda Neo-Hookean malzeme modeli hariç diğer malzeme modellerinin deneysel sonuçları üç numune için de çalışan aralıkta iyi bir şekilde gerçekleştikleri gözlemlenmiştir. Sonuçta, numunenin vulkanizasyon derecesi ve karbon siyahı katkı maddesinin katılıp katılmaması maksimum uzama oranını etkilediğini, yedi farklı şekil değiştirme enerji fonksiyonunun incelendiği bu çalışmada, hepsinin de iyileştirme katsayılarının (R2) yüksek çıkması küçük şekil değiştirme bölgesinde ($A>2$) hepsinin de malzemeyi iyi bir şekilde karakterize edebildiklerini ifade etmiştir.

Karataş [1], elastomer numunelerin hem sabit yük altında hem de dinamik yük altındaki davranışlarını ve bu davranışları etkileyen faktörleri deneysel olarak incelemiştir. Yapılan deneyler sonunda, elastomer malzemelerin statik ve dinamik özelliklerine en büyük etkenin elastomerin tipi ve formülasyonu ve dolgu maddelerinin tipi ve büyüklüğü olduğunu, çapraz bağ yoğunluğu ile elastomerlerin kopma dayanımı, histerisis, rijitlik, yırtılma dayanımı gibi mekanik özelliklerinin değiştirilebildiğini, belli bir kuvvette malzemenin şekil değiştirme miktarının azaldığını, ön yük değerinin artması ile dinamik rijitlik değerlerinin de arttığını, ayrıca ön yükten bağımsız olarak, frekansın artması ile malzemenin dinamik rijitlik değerinin azaldığını, sönümlenmenin ifadesi olan T_g 5'in (kayıp faktörünün), artan ön yük değerlerinde düşüş gösterdiğini ifade etmiştir.

Mevlat [14], değişik miktarlarda karbon siyahı ve mika dolgularıyla takviye edilmiş doğal kauçuk kompozitlerini, hareketli mikroskop, üniversal çekme testi ve DMTA dinamik mekanik termal test aletleriyle incelemiştir. Kompozit içindeki mika miktarının artırıldığında şişme değerlerinde bir düşme olduğunu, özellikle %25 mika dolgusundan sonra çekme kuvvetinde bir düşme görülse de uzama değerinde dikkat çekici gelişme olduğunu, dinamik mekanik sonuçların gösterdiği gibi, karbon

siyahının belli oranlarda mika ile değiştirilmesinin kompozitin sönümleme kapasitesini başarıyla artırdığını belirtmiştir.

İslamoğlu [5], ısı ışıınımı problemlerini çözmek için sonlu elemanlarla çözüm yapan ANSYS yazılım programı kullanmış ve ele alınan problemlerin sonlu eleman modelini oluşturmuş, gerekli olan sınır şartlarını (sıcaklık, ısı akısı) uygulayarak ısı akışı ve sıcaklık dağılımını hesaplamıştır. Sonuçları analitik çözümle elde edilen değerlerle karşılaştırmış, hata payının % 0,4 ' ten az olduğunu saptamıştır. Elde edilen sonuçlar ışıınım problemlerinin nümerik çözümünde ANSYS yazılım programı kullanılmasının uygun olduğunu göstermiştir.

Çıra [15], 0,1 mm çaplı telde %0,1, diğer 0,71 mm çaplı telde ise %5,2 hata veren Zwick çekme deney cihazının bu hatasını araştırmıştır. Çalışmasında Zwick çekme deney cihazı ve elektrik iletkeni amaçlı yuvarlak tavlı bakır tel kullanmıştır. Öncelikle standartları incelemiş, numune hazırlamada dikkat edilecek noktaları belirlemiş, deney esnasında dikkat edilecek noktaları saptamış, uygun çene ağzı malzemeleri, çene basıncı ve çene açıklığını belirlemiştir. 50-150 mm/min. arasındaki Zwick çekme deney makina hızı uygulanmış, en uygun deney hızını 50 mm/min, en uygun Lo mesafesini $Lo=254$ mm olduğunu ifade etmiştir.

Akçakale [16], NR/SBR tipi elastomer esaslı ayakkabı taban malzemelerinin mekaniksel özelliklerine bazı dolgu maddelerinin etkilerini incelemiştir. Çalışmada dolgu malzemesi olarak cam küre, cam elyafı, mika tozu, salpa tozu ve wollastonit kullanmıştır. Bu dolgu malzemelerinin mekaniksel özelliklere etkileri ve maliyet analizini yapmıştır. Yoğunluk, sertlik, aşınma, kopma dayanımı, yüzde uzama, bükülebilme ve yırtılma deneylerini endüstriyel ortam şartlarında gerçekleştirmiştir. Çalışmaların sonucunda Klasik formülü, farklı dolgular kullandığı (mika tozu, wollastonit, cam küre, cam elyaf, salpa tozu), Formül A ve Formül B ile ve birbirleriyle karşılaştırmıştır. Elastomer esaslı taban malzemeleri için mekanik değerler ve maliyet analizine göre cam küre ve wollastonit dolgu maddelerinin % 5,17 - % 9,4 oranlarında kullanılmasının uygun olacağını ve wollastonit, mika tozu ve cam kürenin NR/SBR kauçuk tip elastomerlerde karbon siyahı ile birlikte yarı aktif dolgu malzemesi olarak kullanılabilir malzemeler olduğunu ifade etmiştir.

Yapmış olduğumuz çalışmada, farklı alanlarda kullanılabilir olan NR/SBR tipi elastomer esaslı malzeme kullanılmıştır. Kullanım sıcaklık aralığı -50°C ile $+100^{\circ}\text{C}$ arasında olan bu malzeme, otomobil lastiği üretimi, ayakkabı tabanı, mekanik parçalar, hortum, konveyör bant ve yer döşemesi imalatında kullanılmaktadır.

Akçakale'nin üretmiş olduğu (Formül B) kompozit malzemelerden test numuneleri alınarak çekme deneyleri yapılmış ve sonlu elemanlar yardımıyla malzeme karakteristiği oluşturulmaya çalışılmıştır.

Sekiz bölümden oluşan bu çalışmanın birinci bölümünde kauçuklar hakkında genel bilgiler verilerek bu alanda yapılmış olan akademik çalışmalardan bahsedilmiştir. İkinci bölümde ise genel olarak kauçuk çeşitleri, Türk kauçuk işleme sanayi, kauçuklara katılan katkı ve dolgu malzemeleri ve çalışmada kullanılan NR/SBR malzemesi hakkında bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde NR/SBR tipi elastomer esaslı malzemelere uygulanan çekme deneyinden ve bu malzemenin çekme özelliklerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ise elastomerlerin sonlu elemanlar yöntemiyle davranış modelleri, kauçuk esaslı malzemelerinin hiperelastik davranışı ve Abaqus analiz programındaki potansiyel enerji formları ele alınmıştır.

Beşinci bölümde yapılan deneysel çalışmalar, test cihazları ve sonlu elemanlar yöntemiyle davranışın modellenmesi anlatılmıştır. Altıncı bölümde ise yapılan mekanik deneyden elde edilen test verileri ve analizden elde edilen analiz verilerinin sonuçları grafikler halinde karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar hakkında tartışma ve benzer diğer çalışmalara atıflar yapılmıştır.

Yedinci bölümde, mekanik deneyden ve analizlerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve bu çalışmalarla ilgili önerilere yer verilmiştir.

BÖLÜM 2. KAUCUKLAR-ELASTOMERLER VE ÖZELLİKLERİ

2.1. Kauçuk ve Tarihçesi



Şekil 2.1. Lateks (kauçuk sütü) nün kauçuk ağacından elde edilmesi

Konuşma dilinde 'lastik' diye adlandırılan şey, ham maddesi tropikal ağaçlardan elde edilen bitkisel bir üründür. Bu ağaçlardan Brezilya kauçuk ağacı "Hevea brasiliensis" adı verilen bir çeşidi ticari önem taşır. Brezilya'nın Amazon bölgesi ormanlarına has bir bitki olan bu ağaç, sonraları Uzak Doğu'ya da götürülmüş, iklim şartları aynı olan bu bölgelerde de kolaylıkla üretilmiştir. 20 - 30 m. boyunda, yuvarlak gövdeli, yaprakları tepesinde kümelenmiş Brezilya kauçuk ağacı, humusu bol yaş topraklarda yetişir.

Kauçuğun elde edilmesine, ilk olarak Brezilya'da başlanmıştır. 19'uncu yüzyıl başlarında yıllık üretim yaklaşık 30 ton kadardı. Bugün ise sentetik yollarla elde

edilen 1 milyon ton suni kauçuk dışında Dünya doğal kauçuk üretimi yılda 3 milyon tonu bulmaktadır.

Yüzyıla yakın bir süreden beri kauçuk üretimi, teknik ve endüstri alanındaki gelişmelerle birlikte yürümüş, bunların ilerlemesine yeni bir hamle vermiştir. Esnekliği, aşınmaya dayanıklılığı, su geçirmezliği kauçuğu, modern endüstrinin özellikle mekanik ulaştırma tekniğinin en gözde maddelerinden biri durumuna getirmiştir.

2.1.1. Kauçuğun tarihçesi

1493'de Amerika'ya yaptığı ikinci yolculuk sırasında Kristof Kolomb, Haiti Adası'nda yerlilerin acayip bir topla oynadıklarını görür. Bu öyle bir toptur ki yere vurdukça zıplıyordur.

1521'de Meksika'nın İspanyol egemenliği altında bulunduğu yıllarda bazı İspanyol gezginleri, yerlilerin elastik bir madde kullanmakta olduklarını görürler. Avrupa'da da bunlara ait çeşitli söylentiler dolaşmaya başlar. Yerlilerin renk renk tüyleri, bir bitkiden çıkardıkları süte benzeyen beyazımsı maddeyle vücutlarına yapıştırdıkları, böylece büyücü kılığına büründükleri söylenir. İçine ayaklarını batırıp çıkardıkları bu süt gibi maddenin kuruduktan sonra çarığa benzer bir çeşit ayakkabı biçimini aldığı da söylenmektedir.

1735'te Charles de la Condamine adında bir Fransız, hiçbir Avrupalı'nın karşılaşmadığı bu acayip bitkilerin esrarını çözmek üzere Amazon ormanlarına doğru yola çıkmıştır. Yerliler ağaca "göz yaşı" anlamına gelen "heve" yahut "cao ochu" adını vermektedirler.

Serüvenle dolu bir yolculuktan sonra de la Condamine, bu esrarengiz ağacı bulmuştur. Kabuğunu keserek çıkardığı sütü (lateks = kauçuk) kurutup bazı modeller yapmış ve Fransa'ya yollamıştır. O çağın bilim adamları bu acayip cevheri inceleyip çözümlemeye koyulmuştur.

1763'te birkaç Fransız kimyacı, cevheri trebentin yağı ve etere batırıp eritmeyi başarmışlardır. Bu yıllarda lateksin, lastik adı altında, mürekkep lekelerini kağıt üzerinden çıkarmak için silgi olarak kullanılmaya başlandığı görülmüştür.

1793'te Peal adında bir İngiliz, kauçuğu trebentin içinde eriterek su geçirmez bir madde yaparak patentini almıştır.

1823'te Charles Macintosh adında İskoçyalı bir kimyacı, su geçirmez maddelerin yapım metodunu geliştirmiş ve lastik eşya yapmak üzere ilk fabrikayı kurmuştur. Bugün hala İngiltere'de 'mackintosh' adıyla anılan su geçirmez pardösüler (muşamba) yapılmaktadır. Bu ilk lastik eşyanın bazı kusurları ortaya çıkmış: sıcak havaya dayanamayıp eriyor ve çabuk eskiyordur. Soğuk havalarda ise sertleşip esnekliğini kaybediyordur.

1839'da Charles Goodyear adındaki Amerikalının bir rastlantı sonucu bulduğu sistem, lastik sanayisinde devrim yaratmıştır. Goodyear, lateksi ısıtıp kükürtle işleyerek daha elastiki ve dayanıklı bir duruma getirmiş ve böylece kauçuğa hava şartlarından etkilenmez bir nitelik kazandırmıştır. Bu işleme 'vulkanize etmek' denir. Kükürtleme işlemi, kauçuğun kullanım alanını genişlettiği gibi fiyatlarını da artırmıştır ve yıllık üretim 30 tondan birdenbire 350 tona yükselmiştir.

1873'te İngiltere hükümeti, iklim yönünden Amazon ormanlarına benzerlik gösteren sömürgelerinde kauçuk ağaçları yetiştirmeyi düşünmüş ve Farris adında biri, bu ağaçların tekeli bırakmak istemeyen Brezilya Hükümeti gümrüğünden sıyrılarak 2000 kadar Brezilya kauçuk ağacı tohumunu İngiltere'ye kaçırmıştır. Ama Kalküta'ya getirilen tohumlardan ancak bir düzinesi tuttuğu gibi bunlardan sürgün veren altı tanesi de kurumuştur. Bir süre sonra Henry Wickham adında bir İngiliz, Brezilya'dan 70.000 tohum kaçırmış, Seylan'a götürülen bu tohumlardan 2.000 tanesi iklime alışıarak gelişmiştir.

1885'te Afrika'da yetişen, Lastik ağacı (*Ficus elastica*) adlı bir ağaçtan da kauçuk elde edilmiş ve böylece yıllık üretim 4.000 tona ulaşmıştır.

1907'de hiç kimsenin haberi olmaksızın Seylan'da gizli gizli yetiştirilen Brezilya kauçuk ağaçlarının tohumları Malaya'ya aktarılmıştır. H. N. Ridley adındaki İngiliz botanikçisinin çalışmalarıyla elde edilen başarı sonucu yılda 6.000 tonluk kauçuk, Dünya pazarlarına sürülmüştür. Bu, kolay ve çabuk kazançlar sağlayan Brezilyalı ve Afrikalı kauçuk tüccarlarının sonu olmuştur. Hollandalıların Endonezya, Amerikalıların Liberya ve Brezilya, Fransızların Çin Hindistan'ın da kurdukları kauçuk ağacı çiftlikleriyle Dünya kauçuk üretiminde uluslararası bir yarış başlamıştır.

Motorlu kara araçlarının hızla gelişmesi lastik tekerlek piyasasını iyice canlandırmıştır. Kauçuk üretimi başlı başına bir tarım durumunu almış ve daha yüksek verimli ağaç yetiştirimi ve tohumların ıslahı yoluna gidilmiştir. Gerek çiftliklerin işletimi, gerek lateksin toplanmasında daha ekonomik metotlar ortaya konulmuştur.

Bugün ileri endüstri ülkelerinde sentetik kauçuk yapımı gittikçe artmakla birlikte Brezilya kauçuk ağaçlarından çıkarılan doğal kauçuk hala ön planda gelmektedir. Dünya kauçuk üretimi oranının yüzde payları ve ton olarak ülkelerdeki dağılımı ise Tablo 1.1. de gösterilmektedir. [2]

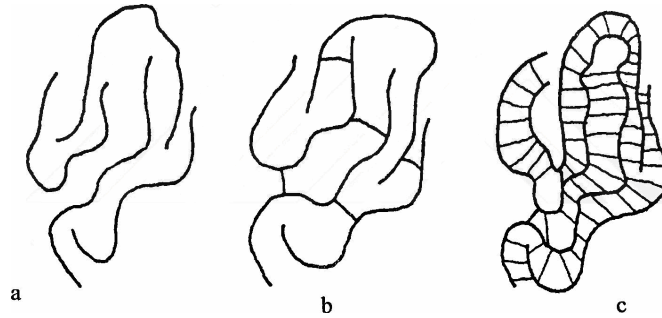
2.2. Kauçuklar ve Elastomerler

Plastikler, termoplastikler, termosetler ve elastomerler olmak üzere üç grupta toplanır. Elastomerler, oda sıcaklığında yumuşak kalan polimerlerdir [17].

Elastomerler, oda sıcaklığında gerilim uygulandığında ilk boyutunun en az iki katı uzayabilen, bu gerilim kalktığında hızla ilk boyutuna dönebilen, elastisite modülleri çok düşük, seyrek çapraz bağlı polimer malzemelerdir. Elastomerler, kauçukların çapraz bağlanması sonucu elde edilirler. Kauçuklardan farklı olarak, yüksek sıcaklıklarda dahi plastik şekil değişimi göstermezler. Kauçuklar karmaşık halde duran molekül zincirlerinin uzatılabilir özellikleri nedeniyle, oda sıcaklığında önemli

bir kauçuk elastikliğine sahiptirler. Ancak sıcaklık arttıkça, malzemenin akışkanlığı artar ve giderek termoplastik davranış gösterirler.

Elastomerler, çapraz bağ yoğunluğu bakımından, plastomerler ve duromerler arasında yer alır [1].



Şekil 2.2. Polimerlerin çapraz bağ yoğunluğu [1]

- a) Plastomerler (termoplastikler): çapraz bağ yok
- b) Elastomerler: seyrek çapraz bağlı
- c) Duromerler (sert kauçuk, termosetler): sık çapraz bağlı

Bazı polimerler yapısal özellikleri gereği yüksek elastikiyet gösterebilmektedir. Doğal kauçuk bunlardan birisidir ve insanların yararlandığı ilk elastikiyeti yüksek polimerdir. Dünya elastomer tüketimindeki payı % 30 düzeyindedir.

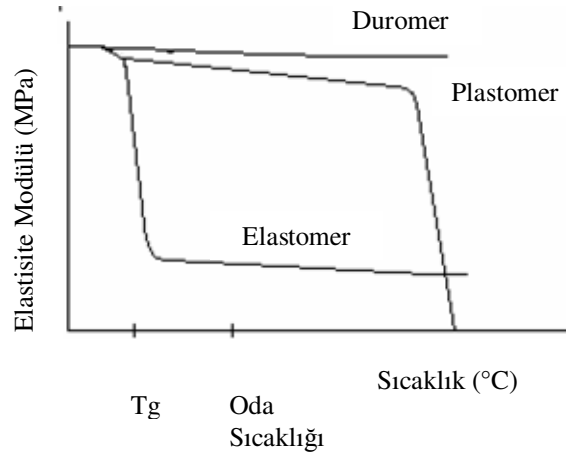
Elastomerlerin tüketildiği en önemli alan, araç iç ve dış lastiklerinin yapımıdır ve %85 bu alanda tüketilir. Kauçuklardan ayrıca; ayakkabı, terlik, profil, teknik parçalar, conta, keçe, hortum, taşıyıcı bant vb. çok farklı ürünler yapılır.

Kauçuksal davranış gösterebilen polimerler aşağıda sıralanan temel özellikleri taşırlar;

- 1) Camsı geçiş sıcaklığı üzerinde bulunma
- 2) Ana zincir üzerindeki bağlar etrafında dönme kolaylığı (esnek zincirler)
- 3) Kolay kristallenmeme

- 4) Yüksek gerilimlerde plastik deformasyona dayanım (az oranda çapraz bağ karşılar) [18].

Elastomer malzemeler, Şekil 2.3.'te görüldüğü gibi, camsı geçiş bölgesinden sonra elastisite modülleri büyük oranda düşüş gösterir ve parçalanma sıcaklığına kadar sıcaklığa bağlı olmadan sabit kalır. Elastomerlerin elastisite modülleri, camsı geçiş sıcaklığından düşük sıcaklıklarda 10^3 MPa civarında iken, camsı geçiş sıcaklığından büyük sıcaklıklarda 0,1-10 MPa arasında değişmektedir. Kristal yapı katı malzemeler elastisite modülü değeri $10^3 \sim 10^6$ MPa arasındadır.



Şekil 2.3. Polimerlerin elastiklik modülünün sıcaklığa göre değişimi [1]

Elastomerler ısıl genleşme katsayısının eksi olmasından dolayı, çekme uygulandığında ısı yayarlar, gevşetildince ısıyı absorbe ederler. Sabit yük altında çekilmiş elastomerin ısıtılınca boyu kısalır, soğutulunca uzar [1].

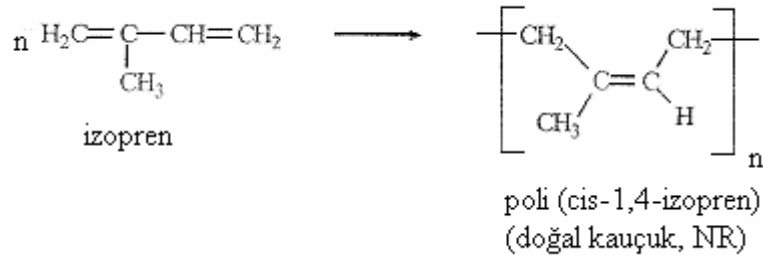
Kauçuklar, amorf yapı, sıkıştırılmaz, lineer olmayan davranış gösteren, deformasyon ile birlikte iç enerjisi değişmeyen, deformasyon sırasında toplam gerilmesi, entropi değişiminden meydana gelen, termodinamik açıdan entropik olan, çekilme esnasında ısınan, sabit yük altında ısıtılınca kısalan soğutulunca uzayan, büyük elastik şekil değişimi (%600) meydana gelen, karmaşık hasar söz konusu olan, çekme ve basma durumlarındaki mekanik davranışları farklı olan, oda sıcaklığında inelastik davranış gösteren (sünme, gerilme gevşemesi, histerezis, mullins etkileri, kalıcı deformasyon) viskoelastik bir malzemedir [13].

2.2.1. Kauçuk türleri

Tablo 2.1. Kauçuk türlerinin isimleri ve kısaltmaları [1]

| | | | |
|-------------|----------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| NR | Doğal Kauçuk | CSM | Klorsulfonlanmış Polietilen Kauçuk |
| SBR | Stiren Butadien Kauçuk | EVM | Vinilasetat Etilen Kauçuk |
| NBR | Nitril Butadien Kauçuk | CO | Epiklorhidrin Homopolimer |
| TPE | Termoplastik Elastomerler | ECO | Epiklorhidrin Kopolimer |
| BR | Butadien Kauçuk | AU | Poliester Üretan Kauçuk |
| IR | Sentetik izopren Kauçuk | EU | Polieter Üretan Kauçuk |
| IIR | Butil (İzobuten-İzopren) Kauçuk | T | Polisülfür Kauçuk |
| EPM | Etilen Propilen Kopolimer | Q | Silikon Kauçuk |
| EPDM | Etilen-Propilen-Dien Terpolimer | MVQ | Metil-Vinil Silikon Kauçuk |
| SBS | Stiren Butadien Stiren Kopolimer | MPVQ | Metil-Fenil-Vinil Silikon Kauçuk |
| CR | Kloropren Kauçuk | MFQ | Florosilikon Kauçuk |
| ACM | Poliakrilik Kauçuk | FKM | Karbonlanmış Floro Kauçuk |
| EACM | Etilen-Akrilat Kauçuk | HNBR | Hidrojen Akrononitril Bütadien Kauçuk |
| CM | Klor Polietilen Kauçuk | | |

2.2.1.1. Doğal kauçuk (NR)



Şekil 2.4. Doğal kauçuğun yapısı [18]

Ticari amaçlı doğal kauçuğun üretiminin çoğu Hevea Brasiliensis ağacından elde edilmektedir. Bu türün yetişme sahası tropikal bölgelerin bol yağış alan yerleridir. Dünya üretiminin çoğu Asya kıtasından sağlanmaktadır.

Kullanma sıcaklığı aralığı -60°C ile $+100^{\circ}\text{C}$ ' dir. Ortam dayanımı yönünden SBR ile benzer özellikler gösterir. Yüksek esneklik ve yüksek mekanik özellikler gerektiren yerlerde kullanılır.

Doğal kauçuğun monomeri olan izoprenden çıkılarak sentetik yolla elde edilmesi kuramsal olarak, Şekil 2.4'teki tepkimeyle gösterilebilir.

Özellikleri ;

- 1) Yüksek derecede kopma mukavemeti
- 2) Yüksek çığ dirilik (çığ hamur mukavemeti)
- 3) Yüksek yırtılma mukavemeti
- 4) Yüksek aşınma direnci
- 5) Düşük sıcaklık direnci
- 6) İyi dinamik özellikler
- 7) Yüksek elastikiyet
- 8) Düşük kalıcı deformasyon değerleri ve yayılma

Doğal kauçuğun 2/3'ü otomobil lastiği üretiminde, kalan kısmı mekanik parçalar, ayakkabı tabanı (özellikle yüksek kalitede spor ayakkabıları), hortum, konveyör bant, yer döşemesi, sünger ve yapıştırıcı imalatında kullanılmaktadır [2,19, 20].

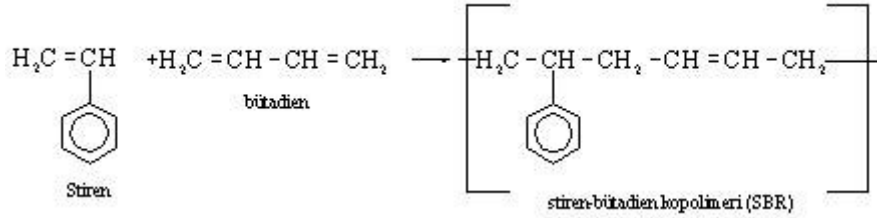
Doğal kauçuğun camsı geçiş sıcaklığının (T_g) -75°C civarında olması , düşük sıcaklık özelliklerinin çok iyi olmasını sağlamaktadır [1].

2.2.1.2. Stiren butadien kauçuk (SBR)

SBR, stiren ve bütadienin rastgele kopolimeridir ve üretimi en fazla yapılan sentetik kauçuktur (Şekil 2.5).

SBR'nin sertliği, kopolimer zincirlerindeki stiren miktarına yakından bağlıdır. Kopolimerdeki stiren/bütadien oranı ayarlanarak farklı özelliklerde SBR hazırlanabilir. Stiren miktarı arttıkça polimerin sertliği artar, camsı geçiş sıcaklığı

yükselir, çekme direnci iyileşir, aşınma direnci ise azalır. Araç lastiklerinin yola değen kısımlarında kullanılan SBR yumuşaktır ve içerisinde yaklaşık kütlece %25 dolayında stiren bulunur.



Şekil 2.5. SBR nin yapısı [18]

Taşıyıcı bant, paspas, ayakkabı tabanı ve topuğu, spor eşyaları, sakız, sünger, yapıştırıcı, hortum, yer döşemesi yapımı, kablo kılıflama, ambalajlama SBR' nin diğer kullanım yerleridir [18].

Kullanma sıcaklığı aralığı -50° C ile +100° C'dir. Dünyada en çok kullanılan sentetik kauçuk türüdür. 75 / 25 oranında Bütadien / Stiren karışımlarının doğal kauçuğa benzer yapıda kopolimer oluşturduğu 1920'li yıllarda bulunmuştur. Sanayide en çok otomobil lastiği üretiminde kullanılmakla beraber, kablo ve elektrik malzemeleri, fren ve debriyaj balataları, şeffaf bantlar ve yapıştırıcılar, konveyör bant, elektrik malzemeleri, dinamik parçaların imalatı (V- Kayışı) ve ayakkabı tabanı imalatında kullanılmaktadır.

Birçok uygulamada doğal kauçuğun yerine kullanılmaktadır. SBR kauçuktan yapılan karışımlar, doğal kauçuğa göre daha kolay olur ve daha kısa zamanda gerçekleşir. Kolay ekstrude edilebilir. Elastik davranışları doğal kauçuk kadar iyi olmasa da aşınma, yaşlanma ve ısıya dayanım özellikleri doğal kauçuktan üstündür. Polar olmayan sıvılara, çözücülere, seyrek asit ve bazlara dayanıklı olup yakıt ve yağlara dayanıksızdır. Sanayide en çok otomobil lastiği üretiminde kullanılır. Dinamik yorulma direnci yetersiz olduğundan pnömatik uygulamalarda ısınmaya sebebiyet verir. Kastor esaslı hidrolik sıvılarda çalışabilir.

Özellikleri ;

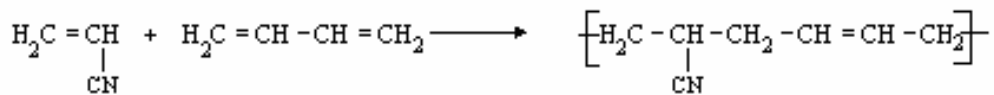
- 1) Stiren oranı arttıkça sertliği, butadien oranı arttıkça esnekliği artar
- 2) Elastikiyeti ve aşınma direnci oldukça iyidir
- 3) Kastor esaslı hidrolik sıvılarda çalışabilir
- 4) Glikol esaslı fren yağlarına, bazlara ve alkole karşı direnci iyidir

Kullanım alanları ;

- a) 1500 serisi Sırt kauçuğu ve türlü teknik malzeme
- b) 1502 serisi Açık renkli teknik malzemeler
- c) 1507 serisi Ekstrüzyon ve kalenderleme için iyi akış özelliği istenen karışımlar
- d) 1509 serisi Kablo ve elektrik malzemeleri
- e) 1573 serisi Fren ve debriyaj balataları , şeffaf bantlar ve yapıştırıcılar
- f) 1707 serisi Açık renkli ve şeffaf malzemelerin kalıplı ve ekstrüzyonlu imalatı
- g) 1712 serisi Sırt kauçuğu , konfeyör bant ve koyu teknik parçalar
- h) 1808 serisi Sırt kauçuğu ve elektrik malzemeleri
- i) 1848 serisi dinamik parçaların imalatı (V- Kayışı) [2,19,20].

2.2.1.3. Nitril kauçuk (NBR)

Nitril kauçuğu, akrilonitril ve bütadienin kopolimeridir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. NBR nin yapısı [18]

Polimer akrilonitril birimlerindeki polar nitril gruplarından dolayı yağlara ve çözücülere karşı dirençlidir. Kauçuk içerisindeki akrilonitril oranı ayarlanarak çok farklı amaçlarla kullanılabilen elastomerler hazırlanabilir. Otomobil endüstrisinde yakıt ve yağ hortumları, conta yapımında, sıvı sızdırmazlığı ile ilgili yerlerde

kullanılır. Endüstride hidrolik yağ hortumları, taşıyıcı bantlar, yazıcı ruloları, conta türü malzemeler yapılır.

Nitril gruplarının sayısı arttıkça NBR nin yağ ve çözücülere karşı direnci, aşınma direnci, diğer polimerlerle karışma özelliği, gaz geçirgenliği artar, aynı zamanda kopma dayanımı ve camsı geçiş sıcaklığı yükselir [18].

Standart Nitril karışımı - 30°C' den +105°C' ye kadar kullanılmak üzere önerilir. Aralıklı çalışmalarda +120°C'ye kadar kullanılabilir [19,20].

Mooney vizkozitesi arttıkça, kopma direnci artar. Yakıtlarda sınırlı miktarda şişme gösterir ve şişmiş durumdayken bile iyi fiziksel özelliklerini korur. Sanayi yağları ve çeşitli greslere karşı dayanıklıdır. Kullanılan bazı katkı maddeleriyle ozona ve diğer açık hava etkilerine karşı daha dayanıklı hale gelebilir. Yüksek polaritesine rağmen, nitril vulkanizatlar üzerinde su genellikle hafifçe bir etki yapar [20].

Keçe uygulamalarının büyük bir kısmı için önerilen, yağ ve greslere dayanıklı, genel amaçlı malzemedir. Yakıtlar ve sanayi sıvıları için değişik karışımlar bulunur. Gilikol esaslı fren yağlarına ve EP katkılı yağlara direnci zayıftır. Fiyat/fonksiyon dengesi yönünden tercih edilir.

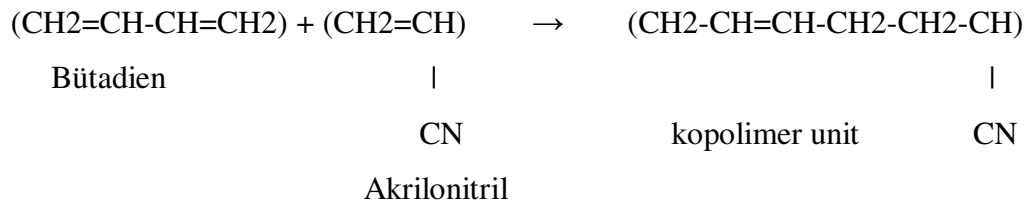
Conta üretimlerinde, mantar dolgulu nitril karışımları kullanılır. Bu malzemelerin dayanım özellikleri standart nitril gibidir. Mantarın varlığı ayrıca sıkışabilirlik (hacimsel küçülebilme) özelliği kazandırır. Mantarlı nitril, ancak statik uygulamalarda kullanım alanı bulur [2].

Akrilonitril ve bütadien'in polimerizasyonu ile üretilen, vulkanize edildiğinde yakıtlara, yağlara, yağlayıcı maddelere dayanıklı, yaşlanma, yorulma ve aşınmaya mukavim, gaz geçirgenliği düşük sentetik kauçuk grubu 'nitril kauçuk' olarak adlandırılır ve buna N, Nitrile Rubber (NR) ve NBR sembolleri ile ifade edilir. Nitril kauçuk ilk defa 1934'de Almanya'da I.G. Forbenindustrie firması tarafından üretilmiştir. 1939'da Amerika'da B.F. Goodrich firması NBR'yi fabrikasyon olarak üretmeye başlamış, daha sonra diğer üreticiler NBR üretimini gerçekleştirmişler.

Nitril kauçuğun özelliklerini ACN (Acrylo Nitrile) oranı etkiler. NBR’de, ACN oranı 5 temel grupta toplanır. % 20, 28, 33, 40, 50. Bunun dışında bir çok özel NBR’de geliştirilmiştir;

- a) Yağlı NBR
- b) Kroslink NBR
- c) Sıcak polimerize edilmiş NBR
- d) Toz halinde NBR
- e) Sıvı NBR gibi

Nitril kauçuk Butadien ve ACN monomerlerinin emülsiyon polimerizasyonu ile elde edilir. Polimerizasyon reaksiyonu Şekil 2.7’de görülmektedir.



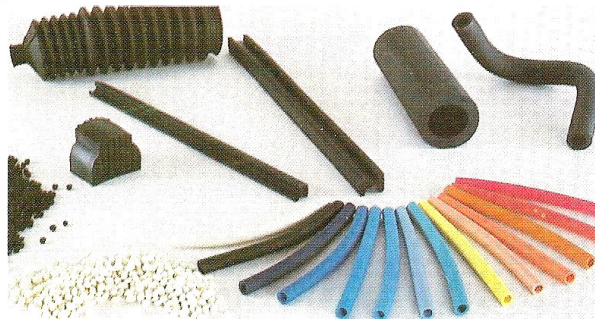
Şekil 2.7. NBR nin polimerizasyon reaksiyonu [21, 22]

NBR, fiyatının yüksekliği nedeni ile, iyi mekanik özellikleri yanında yağa, benzine, yaşlanmaya, ısıya ve aşınmaya dayanıklılığın istendiği uygulamalarda kullanılmaktadır. Tipik kullanım alanları;

- a) Contalar (O-ring, sızdırmazlık contası, ventil)
- b) Hortumlar (yağ, soğutucu hortumları, pnömatik ve hidrolik sistemler için yüksek basınç hortumları, süt, boya püskürtme hortumları)
- c) Mil ve silindirler
- d) Bağlama parçaları
- e) Taşıyıcı bantlar
- f) Kaplamalar
- g) Kablolar [21, 22].

2.2.1.4 Termoplastik elastomerler (TPE)

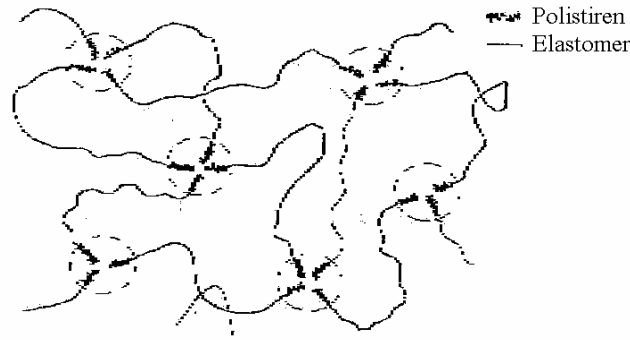
Termoplastik elastomer, elastomerik yapıya sahip fakat bir plastik gibi fiziksel değişim sonucu işlenebilen ve belirli bir şekil alabilen, kompleks molekül yapıya sahip polimerik sistemlerdir. Gerek plastik, gerekse kauçuk endüstrisinde kullanılan TPE'lerin ortak özelliği, yapılarında kimyasal olarak birbirlerine moleküler bazda bağlanmış birden fazla cins polimerin bulunmasıdır.



Şekil 2.8. Termoplastik elastomerler [23]

Yüksek elastik geri toplanma özelliği sergiler; vulkanize kauçuğa benzer görünüş ve his verirler. Kurutma gerektirmezler. Parlak doğal renk tonu, tutarlı renk konsantrasyonlarıyla parlak ve canlı renkler kazandırır. Isıl sert kauçuklara kıyasla, daha düşük özgül ağırlığı nedeniyle parça ağırlığını azaltır. Geniş servis sıcaklık menziline sahiptir (-60°C ile +135°C). Standart termoplastik ekipmanda işlenebilir. Önemli özellik kayıpları olmadan birkaç kez geri dönüştürülebilir. İnşaat tesisat, otomotiv, cihazlar (contalar, mühürler, tamponlar, merdaneler vs.), tüketici eşyaları (diş fırçası kıskaçları dolma kalem kovanları, tutamaklar vs.), elektrik, medikal (tıbbi) ve ince temas (musluk kaplamaları, dişli kaplamaları, portatif su hortumu) alanlarında kullanılır [24].

Termoplastik elastomerlerin tümü iki faz içeren sistemlerdir. Bu fazlardan biri sert polimer fazıdır. Diğer faz ise yumuşak kauçuksu polimerdir. İki fazlı yapı basitçe Şekil 2.9'daki gibi gösterilir.



Şekil 2.9 Termoplastik Elastomerlerin Faz Yapısı [25]

Termoplastik elastomerler (TPEs), kimyasal bileşimlerine göre beş grup altında toplanırlar;

- 1) Termoplastik poliüretanlar (TPUs) (Poliüretan blok kopolimerler)
- 2) Stirenik blok kopolimerler (SBCs) (Polistiren/elastomer blok kopolimerler)
- 3) Termoplastik poliolefin elastomerler (TPOEs)
- 4) Kopoliester – eter elastomerler (COPEs) (Poliester blok kopolimerler)
- 5) Termoplastik poliamid elastomerler (Poliamid blok kopolimerler)

Termoplastik elastomerler, elastomerik yapıya sahip fakat plastikler gibi değişimle işlenebilen ve şekil alabilen, karmaşık yapıda, polimerik malzemelerdir. Yapılarında, kimyasal olarak birbirlerine molekül bazda bağlanmış birden fazla cins polimer bulunmaktadır. Yapı, kauçukla kullanılan en az iki cins polimer ve bunların üçlü bloğundan oluşur. Bu bloklardan uçta bulunan iki tanesi daha kısa plastik, ortada bulunan ise daha uzun ve elastomeriktir. Stiren - Bütadien - Stiren cinsi bir termoplastik elastomerde bütadien elastomerik, stiren plastiktir. Yüksek ısıda polistiren erir; malzeme akıcı hale gelir ve kalıp içine aktığında, kalıbın şeklini alır. Soğutulduğunda, stiren tekrar sertleşir ve şekil kalıcı olur. Sonuçta pişme süresi sonucu hiçbir kimyasal değişim olmamakta, sadece fiziksel değişim olduğu için, süreç defalarca tekrarlanabilmekte ve kalıptan çıkan firede yeniden kullanılabilir.

Özellikleri;

Bir plastik gibi işlenebilen malzeme %550 uzama ve 15MPa üzeri kopma mukavemeti verebilmekte, 35 Shore A ile 45 Shore D arası sertlikte mamuller üretilebilmektedir. Yüksek ısı ve yağdaki performansları ile kalıcı deformasyon özellikleri termoplastik elastomerlerin yetersiz kaldığı özellikleridir.

Kullanım alanları; Mekanik parçalar, hortum ve kablo, ayakkabı tabanı, otomotiv parçaları, gıda ve tıbbi malzemeler [19].

TPU'nun enjeksiyon kalıplaması ile etkin bir biçimde işlenebilmesine olanak sağlayan iyi mekanik özellikleri vardır. TPU'nun esas avantajları aşınmaya karşı yüksek direnç, geniş bir sıcaklık aralığı esnekliği, yağlara, gres yağlarına ve birçok çözücüye karşı dirençtir [2].

2.2.1.5. Diğer kauçuk türleri

Yapılan yüksek lisans çalışmasında NR ve SBR kauçukları kullanıldı. Diğer kauçuk türleri , Butadien (BR), Sentetik izopren kauçuğu (IR), Butil (izobuten-izopren) kauçuk (IIR), Etilen propilen kauçukları (EPM, EPDM), Stiren butadien stiren kopolimeri (SBS), Kloropren kauçuk (CR), Poliakrilik kauçuk (ACM), Klorosulfonlanmış polietilen kauçuk (CSM), Epiklorhidrin kauçukları (CO, ECO), Poliüretan kauçukları (AU; EU), Polisülfür kauçuğu (T), Silikon kauçuğu (Q, MQ, VMQ, PVMQ), Karbonlanmış floro kauçuk (FKM), Hidrojen akronitril bütadien kauçuk (HNBR) dir.

2.3. Türk Kauçuk İşleme Sanayi

Türkiye’de yılda yaklaşık 170 bin ton değişik kauçuk türü işlenmektedir. Türkiye’de NR ve SBR kauçuk tüketiminin yıllara göre değişimi ve yıllık ortalama tüketim artış hızları Tablo 2.2’de gösterilmiştir. Polimer olmamakla birlikte, kauçuk ürünlerin üretiminin ayrılmaz bir parçası olması nedeniyle karbon siyahına da Tablo 2.2.’de yer verilmektedir. Türkiye’de kauçuğun başlıca tüketim alanları ise Tablo 2.3.’te

sunulmaktadır. Görüldüğü gibi yaklaşık %80'lik bir oranla, tekerlek lastiği üretimi ülkemiz lastik işleme sektöründe ilk sırayı almaktadır. Bu üretim oldukça gelişmiş olup büyük ölçekli birkaç firma tarafından gerçekleştirilmektedir. Geri kalan yaklaşık %20'lik kısım ise, çoğunluğu küçük ölçekli çok sayıda firma tarafından gerçekleştiren, hortumdan yer döşemesine, çeşitli contalardan biberon başlığı ve emziklere kadar çok değişik lastik ürün üretimini ilgilidir.

Tablo 2.2. Türkiye’de Kauçuk Tüketim Projeksiyonu (1000 Ton) (2006 yılı) [3]

| Yıl Kauçuk | 1989 | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | Ortalama Yıllık Tüketim Artış Hızı (%) |
|------------------|------|------|------|------|------|--|
| NR | 52 | 56 | 80 | 94 | 109 | 7,6 |
| SBR | 23 | 26 | 46 | 52 | 75 | 7,7 |
| Karbon Siyahı | 43 | 48 | 82 | 102 | 135 | 7,4 |

Tablo 2.3. Türkiye’de Kullanım Alanına Göre Kauçuk Tüketimi (1991) [3]

| Son Ürün | Doğal Kauçuk | Toplam Tüketim (1000 ton) | Toplamda % |
|--|---------------------------------|------------------------------|------------|
| Tekerlek Lastiği | Doğal Kauçuk | 50 | 77 |
| | SBR & CBR | 39 | |
| | Butil ve klorobutil | 4 | |
| | Toplam | 93 | |
| Kauçuktan Yapılmış Çeşitli Teknik Parçalar | EPDM | 3 | 12 |
| | Nitril | 2 | |
| | Kloropren | 1,5 | |
| | NR & SBR | 8 | |
| | Akrilik/Viton/Silikon vs. | 0,5 | |
| Toplam | 15 | | |
| Ayakkabı ve Ayakkabı Tabanı | SBR/CBR/NR EVA/Kloropren | 5 | 4 |
| | Toplam | 5 | |
| Halı, Tekstil ve Kağıt | Kauçuk Lateks | 5 | 4 |
| | Toplam | 5 | |
| Diğer Kauçuk Eşya | Çeşitli Kauçuklar | 2 | 2 |
| | Toplam | 2 | |
| Toplam Son Ürünler | Bütün Kauçuk Türleri | 121 | 100 |

Tekerlek lastiği dışındaki diğer kauçuk ürünlerinin üretimi, çoğu küçük ölçekli olan, yaklaşık 2000 kadar firma tarafından gerçekleştirilmektedir. Kauçuk işleme sektörünce üretilen ürünlerin büyük bir çoğunluğu ülke içinde tüketilmektedir. Otomobil lastiğinde doğrudan ihraç edilen, toplam üretimin %30'udur [3].

2.4. Kauçuklara Katılan Katkı Maddeleri

- | | |
|------------------------|---------------------------------|
| 1) Plastikleştiriciler | 6) Dolgu Malzemeleri |
| 2) Antioksidantlar | 7) Kaydırıcılar |
| 3) UV Stabilizerleri | 8) İşleme (proses) yardımcıları |
| 4) Renklendiriciler | 9) Köpük Yapıcılar |
| 5) Antistatikler | |

2.4.1. Plastikleştiriciler

Plastik reçinesiyle birlikte plastikleştiriciler kullanıldığı zaman, plastiğin işlenebilirliğinin, esnekliğinin ve kayma özelliklerinin iyileştiği görülür.

Plastikleştiriciler ısı ve basınçla şekillendirmede; Plastiğin akışını ve işlenebilirliği kolaylaştıran kırılmalığı azaltan, esnekliği artıran, yumuşaklığı artıran katkı maddeleridir.

Plastikleştiricilerin kullanılan kısaltılmış sembolleri ve kimyasal isimleri şunlardır; BB (Butyl benzyl phthalate), DBP (Dibutylphthalate), DCP (Dicaprylphthalate), DIBP (Di-i-Butylphthalate), DIDA (Di-i-Decyladipate), DIDP (Di-i-Decylphthalate), DINP (Di-i-Nonylphthalate), DIDA (Di-i-Octyladipate), DİOP (Di-i-Octylphthalate), DIPT (Di-i-Tridecylphthalate), DOA (Di-2-Ethylhexyladipate), DOİP (Di-2-Ethylhexyl-i-phthalate), DOPT (Di-2-Ethylhexylterephthalate), DOZ (Di-2-Ethylhexylazelate), DOP (Di-2-Ethylhexylphthalate), ELO (Ephoxidized Linseedoil), TCF (Tricrecylphosphate), TOF (Tri-2-Ethylhexylphosphate), TOTM (Tri-2-Ethylhexyltrimellitate), TPF (Triphenylphosphate), TİOTM (Tri-i-Octyltrimellitate), DOS (Di-2-Ethylhexylsebacate).

2.4.2. Antioksidantlar

Plastik maddeler işleme sırasında, depoda dururken, kullanılırken havanın oksijeninden, ışıktan, mekanik baskıdan ve kimyasal reaksiyonlardan dolayı bozulurlar ve sonuçta plastiğin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri değişir. Dış çevrenin plastik üzerindeki bu olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için plastiklere antioksidantlar katılır.

Antioksidantlar; ya doğrudan oksijeni bağlar ya da polimerlerle kararlı ürün meydana getirerek oksitlenmeyi önler. Granül üretimi esnasında ve enjeksiyonla kalıplamada kullanılır. Kullanım oranı % 0,1 – 2,5 arasında değişir.

En çok kullanılanlar, antioksidantlar, alkilenmiş fenol, bisfoneller, fenol kondansasyon ürünleri, polifenoller, aminlerdir.

2.4.3. UV stabilizerleri

Genellikle saf polimer malzemeler güneş ışını, ısı, hava etkisi ile özelliklerini yitirirler. Bu durumda, solarlar, renklerini kaybederler, kırılğan olurlar. Kullanım oranı %0,5 - 2 arasında değişir. En çok kullanılanlar, aril esterler, benzoosit esterleri ve benzotriazoldur.

2.4.4. Renklendiriciler

Plastiklerde, reçinenin yapısına ve kullanma amacına göre değişik renklendiriciler kullanılır (Tablo 2.4).

Kullanılan renklendiriciler;

- 1) Şekillendirmede bozulmamalı
- 2) Plastik özelliklerine uymalı
- 3) Renklendirici su ile çıkmamalı ve yıkanmalı

- 4) Zehirsiz olmalı
- 5) Plastik içinde homojen dağılmalı
- 6) Kullanım oranı boya madde özelliğine ve plastik maddeye göre değişir
- 7) Sıvı renklendiriciler % 0,5 – 1
- 8) Toz renklendiriciler % 0,1 – 0,25 arasında kullanılmalıdır.

Tablo 2.4. Plastiklerde, reçinenin yapısına ve kullanma amacına göre kullanılan değişik renklendiriciler [26]

| Renk | Kullanılan Kimyasal Maddeler |
|-----------|-------------------------------|
| Beyaz | Titandioksit, Zn oksit |
| Siyah | Karbon siyahı |
| Kırmızı | Demiroksit, Kadmium kırmızısı |
| Yeşil | Krom yeşili |
| Sarı | Titan sarısı |
| Mavi | Kobalt mavisi |
| Gümüş | İnce alüminyum tozu |
| Parlaklık | Mika, Kurşun karbonat |
| Diğerleri | Zn, Cu, bronz, pirinç tozları |

2.4.5. Antistatik önleyiciler

Plastiklerde birçok malzemelerde olduğu gibi elektrostatik yükler meydana gelir. Bu da yanmaya, yapışmaya ve patlamalara sebep olabilir. Bunları önlemek için antistatikler katılır. Ya doğrudan granüle ile ya da yüzeysel püskürtme yöntemi ile eklenir.

En çok kullanılan antistatik önleyiciler, etoksilatlanmış tersiyer aminler, gliserin esterlerdir. Kullanım oranları, PP, PE 'de etoksilatlanmış tersiyer aminler % 0,1 – 0,2 arasında, PS 'de etoksilatlanmış tersiyer aminler % 1 – 2 oranları arasında kullanılırlar.

2.4.6. Dolgu ve güçlendirici maddeler

Plastiklerin bazı uygulamalarında yüksek elastiklik modülü ve ısı direnç istenir. Güçlendirme maddeleri uzun yıllardır kullanılmaktadır. Polimere dahil edilen bir dolgu maddesi, polimerin özelliklerini iyileştirir veya fiyatını ayarlar. Ancak bazı sentetik polimerlerle dolgu maddesi kullanılması arzu edilmez. Bir polimerde değişik dolgu maddeleri kullanılabilir. Bu polimerlerden istenilen özelliğe, fiyat durumuna göre değişebilir. Örneğin cam yününün kullanılmasıyla polimerlerin elastiklik modülü, gerilme dayanımı çok yükselir ancak büzülme ve emme oranı düşer.

Dolgu maddelerini kimyasal ve fiziksel yapılarına ve karşılıklı etkileme özelliklerine göre üç kısımda sınıflandırabiliriz.

1) Kimyasal yapısına göre dolgu maddeleri

Silikatlar: Kil, talk, mika, asbest, feldispat

Oksitler : Kristal suyu içeren alüminyum oksit, alüminyum üç oksit

Karbonatlar: Kalsiyum Karbonat, çökelmiş toz kireç taşı, toz mermer

Sülfat : Baryum sülfat, kalsiyum sülfat

Hidroksitler: Kalsiyum hidroksit, magnezyum hidroksit

Metaller: Toz metaller, bakır, alüminyum, bronz

Çeşitli: Baryum ferrit, manyetit, molibdensülfür, cam

Odun özü maddeler: İşlenmiş odun özü, protein maddeleri, keratin

Selüloz maddeler: Odun tozu, kabuk tozları, elyaf (alfa selüloz)

2) Fiziksel yapısına göre dolgu maddeleri

Granül dolgu maddeleri: Mineral tozlar, tahta tozu, metal tozları, kağıt parçaları

Lifli dolgu maddeleri: Cam lifi, asbest lif, metal lif,

Levha dolgu maddeleri: Örme kağıt, cam kumaş, tekstil kumaşı

3) Karşılıklı etkileşime göre dolgu maddeleri

Aktif dolgu maddesi, reçine içinde %50 veya daha fazla oranda bulunan dolgu maddeleridir. Örnek olarak kauçuk içinde karbon siyahı verilebilir. Pasif dolgu maddesi ise reçine içinde %50'den daha az oranda bulunan dolgu maddeleridir.

2.4.7. Kaydırıcılar

Polimerlerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan baskı ve kuvvetleri azaltmak için ortama kaydırıcı olarak adlandırılan düşük molekül ağırlıklı maddeler katılır. Bu maddeler polimerin işlenme özelliklerini geliştirirler ve iyileştirirler. Kötü dengelenmiş kaydırıcı sistemler işleme ekipmanının yüzeyinde katıların birikmesine ve sonuçta ekipmanın devreden çıkarılıp temizlenmesine neden olurlar. Kaydırıcılar, temelde iç ve dış kaydırıcılar olmak üzere iki sınıftır.

İç kaydırıcılar polimerler ile daha iyi uyumluluk gösteren maddelerdir. Bunlar, polimerlerin içerisinde iyi çözünürler ve polimer molekülleri kuvvetleri zayıflatarak moleküller arası sürtünmeyi azaltırlar, polimerin akışkanlığını arttırırlar ve üretimin yükselmesini sağlarlar. İdeal bir iç kaydırıcı polimerlerin sadece işleme özelliklerini etkilemelidir. Ancak iç kaydırıcıların çoğu polimerlerin camsı geçiş sıcaklığı (Tg)'yi ve diğer bazı özelliklerini düşürürler. İç kaydırıcıların kullanılmasıyla plastik yüzeyine yazı yazılması ve yüzeyin boyanması sırasında bir sorunla karşılaşılmaz.

Dış kaydırıcılar, işleme sıcaklıklarındaki polimer bileşimleri ile uyumsuzluk gösteren (polimer içinde çözünmeyen veya homojen bir şekilde dağılmayan) maddelerdir. Dolayısıyla bu tür kaydırıcılar polimer bileşimleri ile işleme ekipmanlarının metal yüzeyleri arasında ara üz olarak davranırlar ve erimiş polimerin işleme ekipmanına yapışmasına engel olurlar. Polimerin işleme ekipmanı içindeki davranışı dış kaydırıcı içeriğine bağlıdır. Ayrıca bu maddeler jelleşme işlemi sırasında polimer partikülleri arasındaki sürtünmeyi azaltarak ısı birikimini geciktirir ve jelleşmeyi engellerler.

2.4.8. İşleme (proses) kolaylaştırıcılar

Stearik asit, vaks, mikrokristal vaks ve düşük molekül ağırlıklı polietilen vakslar ile yağ asitleri, yağ asitleri esterleri ve sabunları, akış performansının geliştirilmesinde, kauçuğun mile yapışmasının önlenmesinde, mamulün yüzey düzgünlüğünün sağlanmasında, kalıptan kolayca çıkartılmasında prosesi kolaylaştıran maddeler olarak kullanılmaktadır [26].

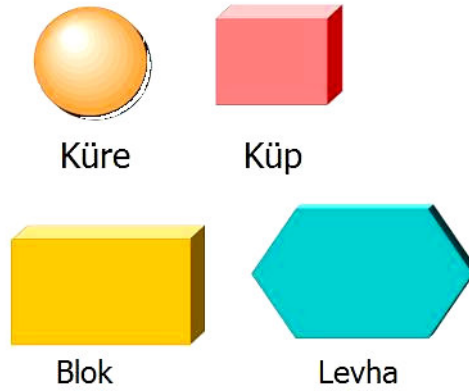
2.4.9. Köpük yapıcılar

Bu katkı maddeleri katı, sıvı, gaz halinde kimyasallardır. Polimere işleme sırasında katıldıklarında buharlaşarak sistemden ayrılma ve bozunma ile hücresel boşluklu yapı meydana getirirler. Kullanım oranları, enjeksiyon ve ekstrüzyonda % 0,1 – 1 ve basınçlı kalıplamada % 5 – 15 arasındadır. Başlıca köpük yapıcılar, pentan, hegzan, tri-klor-etilen ve metilen kloriddir.

2.5. Kauçuklarda Kullanılan Bazı Dolgu Maddeleri

Bazı dolgu maddeleri ile malzemeler harmanlandıklarında çok kullanışlı hale gelebilmektedirler. Eklenen dolgu miktarı ile orantılı olarak uzama azalır, sert silikatlar ilavesinde şok mukavemeti artar. Barit, talk ve kalsiyum karbonat ilavesinde kompresyon mukavemeti azalır, silikat, mika ve nefelinli siyenit ilavesi elektriksel özellikleri geliştirir, sert silikat ilavesi hem aşınma direncini hem de bozulmaya karşı mukavemetini artırır, talk ve kalsiyum karbonat ilavesi ise bunları düşürür.

Malzemenin parçacık geometrisi, dolgu maddelerinin seçiminde önem taşıyan faktörlerden biridir. Malzemeyle elastomer arasındaki temas yüzeyi ve buna bağlı olarak birçok mekanik özellikleri, parçacık şekline göre değişir. Şekil 2.10'da bazı parçacık şekilleri gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Dolgu maddeleri şekilleri

Parçacık geometrisi haricinde dolgu maddelerinde önem taşıyan faktörler; parçacık boyu ve dağılımı, dolgu oranı, kimyasal yapı, yüzey aktivitesi, ısıl özellikler, elektriksel özellikler, yoğunluk, sertlik, yüzey kaplaması ve maliyettir.

Deneylerde kullanılan malzemelerde kullanılan dolgu maddeleri kauçuk sanayisinde endüstriyel olarak kullanılmayan, boya, plastik, termoplastik ve seramik alanlarında bilinen ve kullanılan dolgu maddeleridir.

Dolgu maddeleri, genellikle inorganik maddelerdir. İnerj dolgu maddeleri katıldıkları malzemelerin miktarlarını artırarak fiyat düşürmek amacıyla kullanılmaktadırlar. Buna karşılık etkin dolgu maddeleri, plastiğe katıldıklarında bazı fiziksel ve mekanik özelliklerde iyileşme ve/veya gelişmeler sağlarlar. Bu nedenle etkin dolgu maddelerine “takviye edici (pekiştirici) katkıları” da denir. Bu tür katkıları malzemenin mekanik, elektriksel ve ısıl özelliklerini yükseltir, boyut kararlılığını sağlar, bazı hallerde de maliyetlerin düşürülmesine yardımcı olurlar [29].

Salt kauçuktan yapılmış, dolgu maddesi içermeyen ya da aktif dolgu maddeleri kullanılmadan vulkanize edilmiş kloropren kauçukların kopma ve yırtılma mukavemetleri benzer formülasyonlardaki SBR ve NBR kauçuklara göre yüksek, doğal kauçuğa göre düşük değerler vermektedir.

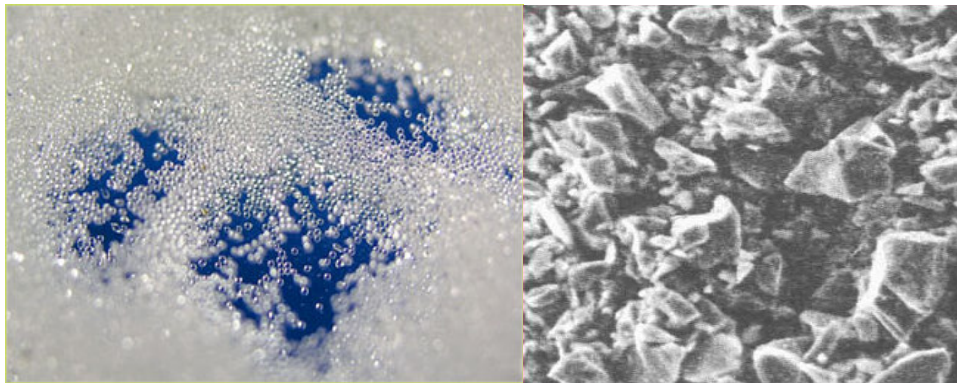
Kloropren kauçuklarda en yaygın dolgu maddesi olarak karbon siyahları kullanılmaktadır. ISAF N 220, HAF N330 kullanarak yüksek mukavemet ve aşınma değerleri elde edilir.

Silisyum dioksit ve kalsiyum silikatlarla yüksek kopma ve yırtılma mukavemeti sağlanabilir. Kaolen tipi dolgularla kısmi kopma ve yırtılma mukavemeti elde edilirken, kalsiyum karbonat tipi beyaz dolgularla ucuz karışımlar elde edilir.

Bunların dışında kimyasallara ve sulu asitlere dayanım için mistron vapour kalitesinde talk kırmızı kurşun (Pb_3O_4) ve çöktürülmüş silis asidi, aleve dayanıklılık için alüminyumtrioksit veya alüminyum hidroksit, düşük gaz geçirgenliği ve dielektriksel özellikler için mistron vapour kalitesinde talk dolgu maddesi kullanılmalıdır [26].

2.5.1. Cam küre (Quartz)

Cam küreler sert, kırılman ve küre biçimlidirler. Kırılmandırlar. Cam küre, SiO_2 (silisyum di oksit) çeşitlerine verilen bir isimdir.



Şekil 2.11. Cam küre [30]

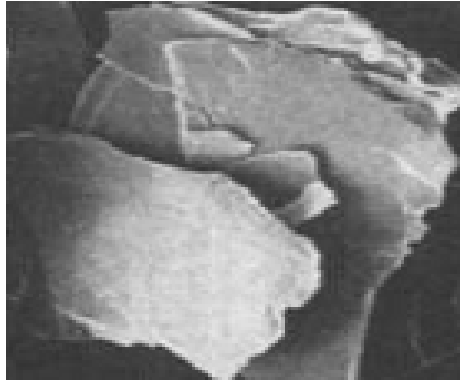
Daha çok, trafikte, karayolları işaretlerinde ve cam malzemelerin diğer malzemelerle hiçbir kimyasal reaksiyona girmemesi sebebiyle aşındırma, yüzey temizleme, parlatma, kalıp temizleme gibi pek çok dikkat gerektiren yüzey işleminde mükemmel şekilde kullanılmaktadırlar. Plastik malzemelerde, ekstrüzyon ve enjeksiyon

yöntemine uygun olmaları, aşınma direnci ve sertlik özellikleri nedeniyle dolgu maddesi olarak kullanılan cam küre Şekil 2.11’de gösterilmektedir.

Cam küreler sağlık ve çevre kirliliği açısından hiçbir tehlike arz etmezler. Silis kumunun neden olduğu silikona bağlı hastalıklar ile hiçbir şekilde bağlantılı değildir. Zehirleyici veya kanserojen etkileri yoktur [30].

2.5.2. Mika tozu (Mica)

Mika çok kolay dilimlenen yapraksı bir silikat grubudur. Lameller yapıya sahip bir mineraldir. 500°C nin üstünde dahi sıcaklıktan etkilenmez ve yapısı bozulmaz. En yaygın olan mineralleri beyaz mika ve siyah mikadır. Şekil 2.12’de görülmektedir [29,16].



Şekil 2.12. Mika [29]

Malzemeye mükemmel elektrik özelliği (yalıtkan) kazandırır. Ayrıca inci parlaltısı verir, yüksek dayanıklılık ve sağlamlık kazandırır, geniş bir sıcaklık aralığında değişmeden kalır. Ancak homojen olarak karışma sorunu vardır [29,41].

Mika, yalıtkanlık, saydamlık ve ince levhalara ayrılma özelliklerinden dolayı plastik-boya ve kağıt sanayinde, elektronik, yapı malzemeleri üretiminde, lastik ve duvar kağıdı imalatında ve sondajcılıkta kullanılmaktadır [31].

2.5.3. Wollastonit

Wollastonit, plastik ve kauçuk sanayisinde yarı mukavim katkı maddesidir. Katıldığı plastıklere, daha az absorpsiyonu, daha düşük dielektrik katsayısı ve daha düşük viskozite özellikleri verir. Wollastonit ısı ile sertleşen, nemsiz emici, astara ve yine ısı ile yumuşayan kalıba şekil vermeyi şiddetlendirici özelliği, ısı kararlılığı, elektrik direnci, kimyasal direnç ve mekanik özellik artırıcılığı nedeniyle plastıklere kullanılmaktadır. Rengi beyaz, kurşini ya da kahve rengi olabilir ve Şekil 2.13'te görüldüğü gibi lifsi bir görünüme sahiptir. Yüksek ısıya dayanım, yüksek mekanik direnç ve iyi izolasyon kabiliyeti gibi özelliklere sahip bir kalsiyum silikat ($CaSiO_3$) mineralidir [32].



Şekil 2.13. Wollastonit [32]

2.5.4. Karbon siyahı

Karbon siyahı kauçuklarda en yaygın ve en fazla kullanılan dolgu maddesidir. Aktif dolgu maddesi görevi yaparak kauçuğun mekanik özelliklerini iletir. Karbon siyahı ayrıca, renklendirme (siyah), UV-ışınlarından koruma ve iletkenliği artırmak amacıyla kauçuklar dışında diğer polimerlerde de katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. En fazla tüketildiği alan ise %85'lik payla araç lastikleridir.

Karbon siyahı, yüksek sıcaklıklarda bozunma ile elde edilen hidrokarbon buharındaki elementel karbonun bir yüzey üzerinde toplanması ile üretilir. Üretim tekniğine bağlı olarak dört farklı karbon siyahı tanımlanır;

- 1) Fırın siyahı; petrol rafinerilerindeki aromatik atıkların 1200°C-1700°C arası sıcaklıklarda aşırı hava ile yakılmasıyla üretilirler, beslemenin bir kısmı yanarken çoğu karbon ve hidrojene parçalanır. Fırın siyahı asidiktir ve kauçukların vulkanizasyonunu yavaşlatır.
- 2) Kanal siyahı; doğal gazın kısmi yanması ile üretilir, kauçuklarda en fazla kullanılan karbon siyahıdır ve pahalıdır.
- 3) Isı siyahı; doğal gazın havasız ortamda 1300°C dolayında ısıl parçalanması ile üretilir. İri taneciklidir ve kauçukları takviye açısından zayıftır.
- 4) Asetilen siyahı; asetilenden elde edilir ve iletken polimerler hazırlamada kullanılır.

Tablo 2.5. Fırın, kanal ve ısı siyahlarının element bileşimi

| | Karbon | Oksijen | Hidrojen | Sülfür |
|---------------------|---------------|----------------|-----------------|---------------|
| Kanal Siyahı | 96 | 3 | 0,5 | 0,1 den az |
| Fırın Siyahı | 98 | 1 | 0,4 | 0,5-0,8 |
| Isı Siyahı | 99 | Eser | 0,4 | 0,05 den az |

Karbon siyahları biçim ve büyüklüklerine göre ayrıca üç gruba ayrılırlar. Tanecikli yapıdaki karbon siyahlarının boyutları 10-500 nm arasında değişirken, taneciklerin bir araya gelerek oluşturduğu kümeli yapıdaki karbon siyahlarının boyutları 40-600nm arasında değişir. Ayrıca kümeler küçük yığınlar halinde toplanarak boyutları farklı karbon siyahı toprakları verirler. Yüzey alanı büyük olduğu için tanecikli karbon siyahları takviye açısından en uygundur, ancak kauçuk içerisine homojen karıştırılmaları zordur.

2.5.5. Diğerleri

Kauçuklar da maliyeti düşürmek amacıyla alüminyum silikatlar, kalsiyum karbonat, silika, baryum sülfat vb. dolgu maddeleri kullanılır. Alüminyum silikatlar ve kalsiyum karbonat bir miktar takviye etkisi de yapar.

BÖLÜM 3. NR/SBR TİPİ ELASTOMER ESASLI MALZEMELERE UYGULANAN ÇEKME DENEYİ YÖNTEMİ

Malzemelerin, mukavemet özelliklerini saptamak ve malzemeleri özelliklerine göre sınıflandırmak amacıyla uygulanan çeşitli mekanik deneyler mevcuttur. Bundan başka deneyler, kalite kontrol, performans gereksinimleri, malzemeyi geliştirme, veri tabanları ve giriş verileri elde etmek gibi amaçlar gözetmektedir.

Kauçuklara uygulanan deneylerden bazıları çekme deneyi, sertlik ölçümü, yırtılma deneyi, uzama deneyi, yoğunluk ölçümü, bennewart bükme deneyi, aşınma deneyi, SEM incelemeleri, sürünme deneyi, sıkıştırma deneyi, sürtünme deneyi, yorulma deneyi, elektriksel deney ve ozon deneyidir [33].

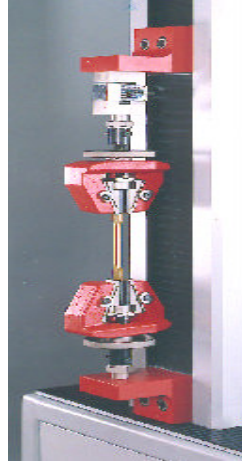
3.1. Çekme Deneyi

Çekme deneyi standartlara göre hazırlanmış deney numunesinin metalden yapılmış iki çene arasında, tek eksenle, belirli bir hızla ve sabit sıcaklıkta koparıncaya kadar çekilmesidir. Malzemelerin statik (darbesiz) yük altındaki mukavemet özelliklerini saptamak ve malzemelerin özelliklerine göre sınıflandırılmasını sağlamak amacıyla uygulanan, mühendislik açısından çok önemli bir mekanik deneydir.

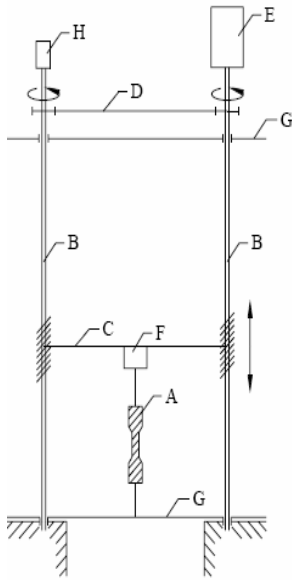
Kauçuk türü malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde en çok çekme deneyi yapılır.

Çekme deneyi numuneye uygulanan kuvvete göre;

- 1) Tek eksenli çekme
- 2) İki eksenli çekme olarak ikiye ayrılmaktadır.



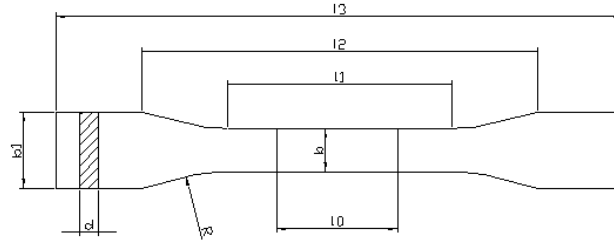
Şekil 3.1. Çekme cihazı [34]



- A- Numune
- B- Tahrik milleri
- C- Hareketli tabla
- D- Zincir Dişli Çark Mekanizması
- E- Tahrik Motoru
- F- Yük Hücresi
- G- Yataklama Tablaları
- H- Enkoder

Şekil 3.2. Basit çekme deneyi genel prensibi [13]

Genel olarak yukarıda bahsedilen tahrik sisteminde çalışan basit çekme deneylerinde kauçuk türü malzemeler için genellikle Papyon numune olarak adlandırılan numune kullanılmaktadır [13].



Şekil 3.3. Standart papyon deney numunesi

Papyon numune kullanılmaması durumunda, kullanılacak numune boyunun tutma çeneleri arasında kalan kısmı uzunluk olarak alınabilmektedir. Literatürde yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde Papyon numune yerine dikdörtgen formunda ince uzun numunelerin de kullanıldığı görülmektedir.

Çekme deneyi ile malzemelerin;

- Elastiklik modülü
- Elastik sınır
- Rezilyans: Malzemenin elastik şekil değiştirdiğinde absorbe ettiği enerjiyi şekil değişimini yapan kuvvetin kaldırılmasıyla geri vermesi özelliğine denir.
- Akma gerilmesi
- Çekme dayanımı
- % uzama
- % kesit daralması gibi özellikleri saptanır.

Basit çekme deformasyonunda, malzemeye uygulanan kuvvetler sadece bir yönde olup gerilmeler; $\sigma_1 = \sigma$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ olup şekil değişimleri ise, Poisson oranının 0,5 olduğu kabulü altında, kuvvet uygulanan doğrultuda uzama olurken diğer iki doğrultuda eşit miktarda daralma meydana gelir.

$$\lambda_1 = \lambda \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (3.1.)$$

Burada λ , asal doğrultulardaki uzama oranı olup uzama oranı şekil değiştirme cinsinden;

$$\lambda = 1 + \varepsilon \quad (3.2.)$$

denklemleri ile tanımlanır [13].

Tablo 3.1. SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin mekanik özellikleri [13]

| ÖZELLİKLER | SBR | NR |
|------------------------------|-------|-------|
| Kopma Gerilmesi (MPa) | 28,1* | 22,1* |
| Kopma Uzaması (%) | 440* | 490* |
| Poisson Oranı (v) | 0,5 | 0,5 |

* 100 birim karışımında 50 birim karbon siyahı katkısı vardır.

3.1.1. Çekme deneyi ile ilgili hesaplar

a) Gerilim direnci;

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.3.)$$

A_0 = İlk kesit alanı, F = Yük

b) Uzama;

$$e = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.4.)$$

L_1 = Numunenin son uzunluğu

L_0 = Numunenin ilk uzunluğu

c) Kesit alanındaki değişim;

$$A_0 \times L_0 = A_1 \times L_1 \quad (3.5.)$$

A_0 = İlk kesit alanı

A_1 = Uzama sonunda oluşan kesit alanı

d) Gerçek gerilim direnci; Kesit alanındaki değişim dikkate alınarak hesaplanan gerilim direncidir.

$$\sigma_g = \sigma(1 + e) \quad (3.6.)$$

e) Genel formül;

$$\frac{A_0}{A} = \frac{L}{L_0} = \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = 1 + e \quad (3.7.)$$

3.1.2. Çekmede kalıcı deformasyon

Çekme deformasyonu genellikle şerit ya da papyon numuneyi belli bir germe ve uzama yüzdesinde standart müddet tutup, germeyi kaldırınca parçanın 30 dakika kendini toplamasından sonra yapılan ölçüm farkı tespiti şeklinde olmaktadır. Şekil 3.2'deki papyonun ince kısmındaki işaretler arasındaki veya şerit numunenin iki işaret arasındaki ölçü uzaması test değerini vermektedir.

Çekmede kalıcı deformasyon;

$$\frac{L_1 - L_0}{L_s - L_0} \times 100 \quad (3.8.)$$

L_s = işaretli kısmın çekmedeki boyu

L_0 = orijinal işaretli boy

L_1 = çekmeden sonra kendini toplamış parçanın işaretli kısmının boyu

Çekme yüzdesi mamulün tabikatına göre tespit edilir ve test ısısı, kopma uzaması göz önünde bulundurulur. Çekme %100, %25, %50, %200 ve %300 değerlerinde yapılabilir ve test ısısı için 23°C, 70°C, 85°C, 100°C veya 150°C kullanılabilir. Süre olarak 24, 72, 168 saat olup istenen gerginin elde edilmesinden 30 dakika sonra sayılır [35].

3.1.3. Çekmede kopma mukavemeti

Kopma mukavemeti, genellikle yassı bir papyon şeklindeki numunenin kopma anında vardığı azami gerilme mukavemetidir. Gerekli kuvvet orijinal kesitin birim alanına göre belirtilir. Uzama bu papyon numunede işaretlenen iki çizginin tatbik edilen çekme ile birbirinden uzaklaşma yüzdesidir. Kopmadaki uzama, numunenin koptuğu andaki yüzde uzamasıdır.

Çekme gerilmesi veya modülü, belli uzama yüzdesi için gerekli gerilme gücüdür. 7 MPa'lık bir germe gücü % 200 uzama veriyorsa numunenin % 200 'de 7 MPa lık elastik modülü var demektir.

Metallerin aksine, kauçuktaki gerilme-çekme kuvveti ile düz orantılı değildir. Dolayısıyla elastisite modülü, gerilme-birim şekil değiştirme (stress-strain) eğrisinde bir noktanın koordinatıdır. Metalde ise modül, gerilmenin birim uzamaya bölünmesi (young modülü) olup sabittir.

Test edilecek numune, test levhalarından 100-130 mm boyunda papyonlar halinde kalıpla kesilir ve orta dar bölgesinde 25 veya 50 mm 'lik bir ara işaretlenir. Uçlar çenelere tutturulur ve alt çene 50 cm/dk. (500mm/dk) ile numune kopana kadar

hareket ettirilir. Orta bölgede işaretlenen kısmın birbirinden uzaklaşması % uzamayı gösterir. Standart test ısısı 23°C 'dir.

Kopma mukavemeti ve uzama değerleri kauçuk teknoloğuna karışımın geliştirilmesi, imalatın kontrolü ve karışımın kimyasallar gibi dış tesirlere dayanıklılığını ölçmekte yardımcı olur. Kopma mukavemeti genel olarak pek çok kauçuk kimyasalının vulkanizasyon özelliklerine etkisini tespit etmekte de kullanılmaktadır. Bu test imalatın tespit edilen özelliklere göre yapılmakta olup olmadığını da kontrol eder. Az veya çok vulkanizasyon, kötü karıştırma ve karışımındaki yabancı madde tespitinde de kullanılmaktadır.

Numunelerin ısıya, yağa, kimyasallara direncinin ölçülmesinde de ilk değerler ve testten sonraki değerlerin mukayese edilmesi ile faydalı olmaktadır. Çünkü ufak bir zayıflama kopma mukavemetinde kendini göstermektedir. İlk ve son değerlerin arasındaki farkın az olması bu testte ilk ve son değerlerin yüksek olmasından daha önemlidir [36].

BÖLÜM 4. ELASTOMERLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE DAVRANIŞ MODELLERİ

4.1. Kauçuk Esaslı Malzemelerinin Hiperelastik Davranışı

Hiperelastik malzeme modeli:

- 1) İzotropik (her tarafı aynı özellikleri gösteren) özelliğe sahiptir ve doğrusal değildir,
- 2) Büyük birim şekil değiştirmelere, ani elastik tepki gösteren malzemeler için geçerlidir (kauçuk, katı propellant ya da diğer elastik malzemeler gibi) ve
- 3) Bu model, sonlu-birim şekil değiştirme uygulamaları için geliştirildiğinden dolayı, analiz aşaması sırasında geometrik doğrusal olmayışın açıklanabilirliğini gerektirir.

4.1.1. Sıkıştırılabilirlik

Çoğu elastomerler (katı, kauçuk esaslı malzemeler), kayma esnekliğiyle karşılaştırıldığında çok küçük sıkıştırılabilirliğe sahiptir. Bu davranış, düzlemsel gerilim, kabuk, zar, kiriş, kafes yada inşaat demiri (nervürlü çelik) elemanlarına özel ilgi için kesin değildir, ama sayısal çözüm, üç boyutlu katı, düzlemsel birim şekil değiştirme ve asimetrik analiz elemanları için sıkıştırılabilirliğin derecesi için oldukça hassas olabilmektedir. Malzemenin oldukça sınırlandırıldığı durumlarda (bir O-ring (lastik segman)ın bir sızdırmazlık elemanı olarak kullanılması gibi), sıkıştırılabilirlik, kesin sonuçlar elde edilebilmesi için düzenli olarak modellenebilmelidir.

Malzemenin sınırlandırılmadığı uygulamalarda, sıkıştırılabilirliğin derecesi genellikle çok önemli değildir. Örneğin, Kullandığımız analiz programının Standard

bölümünde malzemenin tamamen sıkıştırılmaz olduğunu varsaymak oldukça yeterlidir.

Kauçuk esaslı malzemelerin diğer sınıfı elastik köpüktür. Elastik köpükler, elastiktir ama yüksek sıkıştırılabilirliğe sahiptir.

Biz bir malzemenin hacimsel basınç katsayısının oranı K_0 ile, onun ön kayma katsayısı μ_0 için o malzemenin sıkıştırılabilirliği ile ilgili değerlendirme yapabiliriz. Bu oran, Poisson oranının terimlerinde ifade edilebilir, ν için ;

$$\nu = \frac{3K_0 / \mu_0 - 2}{6K_0 / \mu_0 + 2} \quad (4.1.)$$

Tablo 4.1.'de birkaç tipik değer verilmektedir.

Tablo 4.1. Katsayılar

| K_0/μ_0 | Poisson oranı |
|-------------|---------------|
| 10 | 0,452 |
| 20 | 0,475 |
| 50 | 0,490 |
| 100 | 0,495 |
| 1000 | 0,4995 |
| 10.000 | 0,49995 |

a) Abaqus/Standard' ta sıkıştırılabilirlik;

Sıkıştırılmaz ve neredeyse sıkıştırılmaz durumlarda, kullandığımız analiz programının Standard bölümündeki “hibrit” (karışık formülasyon) elemanlarının kullanımı tavsiye edilmektedir. Düzlemsel gerilim, kabuk ve zar elemanlarında, malzeme kalınlık yönünde deformasyon için serbesttir. Aynı şekilde, tek boyutlu elemanlarda (kafes krişler, kafesler ve inşaat demiri (nervürlü çelik) gibi), yanal yönlerde deformasyon için serbesttir. Bu durumlarda, özel hacimsel davranış işlemi gerekli değildir; normal gerilme/yer değiştirme elemanlarının kullanımı yeterlidir.

b) Abaqus/Explicit' te sıkıştırılabilirlik ;

Düzlemsel gerilim ve tek eksen durumları hariç, malzemenin tamamen sıkıştırılmaz olduğunu varsaymak kullandığımız analiz programının Explicit bölümünde mümkün değildir. Çünkü program, her malzemenin hesaplama noktasında bir sınırlama gibi muhteşem bir mekanizmaya sahip değildir. Onun yerine, biraz sıkıştırılabilirlik sağlanmalıdır. Sıkıntı şudur ki, birçok durumda gerçek malzeme davranışı, iş verimliliğine dair çözüm yolları için çok az sıkıştırılabilirlik gösterir ve böylece, düzlemsel gerilim ve tek eksen durumları hariç, işe dair kural için yeterli sıkıştırılabilirlik sağlanmalıdır. Şu bilinmeli ki, bu özellik gerçek malzeme modelinden daha ılımlı hacim davranış modeli yapar. Bazı görüşler bundan dolayı, çözümün kesin olarak yeterli olup olmadığına yada bu sayısal sınırlama sebebiyle, problemin kullandığımız analiz programının Explicit bölümünde tamamen modellenip modellenemeyeceğine karar vermeyi gerektirmektedir.

Hiperelastik modelde malzemenin sıkıştırılabilirliği hakkında eğer hiç değer verilmezse, önceden tanımlanmış kullandığımız analiz programının Explicit bölümünde $K_0/\mu_0=20$ varsayılır yani 0,475 Poisson oranına denktir. Genellikle katkısız elastomerlerin K_0/μ_0 oranları 1,000 – 10,000 ($\nu=0,4995$ - $\nu=0,49995$) aralığındadır ve katkılı elastomerlerin K_0/μ_0 oranları 50-200 ($\nu=0,490$ - $\nu=0,497$) aralığındadır. Bu sebepten dolayı, bu tanımlama, çoğu elastomerde mümkün olabilecek sıkıştırılabilirlikten daha fazla olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, Şayet elastomer sınırlandırılmazsa, bu malzemenin daha uyumlu olan hacim davranış modellemesi genellikle oldukça kesin sonuçlar sunar. Ne yazık ki, malzemenin oldukça sınırlandırılabilir olduğu durumlarda (bir katı, metal parçalarıyla temas halindeyken ve çok küçük miktarda serbest yüzeye sahipken, özellikle yükleme oldukça sıkıştırıcı olduğu zaman gibi) kullandığımız analiz programının Explicit bölümü ile kesin sonuçlar elde etmek mümkün olmayabilir.

Şayet, tanımlanmış bir değeri kabul etmektense sıkıştırılabilirlik tanımlanırsa, K_0/μ_0 oranı için 100 ün üstünde bir limit önerilmektedir. Daha büyük oranlar,

yüksek frekans gürültüsünü dinamik çözümün içine getirir ve çok küçük zaman artışlarını gerektirmektedir.

4.2. İzotropik Varsayım

Kullandığımız analiz programında, deformasyon geçmişi boyunca, izotropik davranış varsayımında hep hiperelastik modeller baz alınmıştır. Bu yüzden, birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi, birim şekil değiştirme fonksiyonu olarak formüle edilebilmektedir.

4.3. Birim Şekil Değiştirme Potansiyel Enerjileri

Hiperelastik malzemeler, “birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi” terimleri içerisinde yer almaktadır. $U(\epsilon)$, malzemede şu noktada bir birim şekil değiştirme fonksiyonu olarak referans hacim malzemenin her biriminde (ön biçimdeki hacim) depolanmış birim şekil değiştirme enerjisi tanımlanmaktadır. Neredeyse sıkıştırılamaz olan izotropik elastomer modeli için kullandığımız analiz programında mevcut çeşitli birim şekil değiştirme potansiyel enerji formları mevcuttur;

- 1) Arruda-Boyce formu
- 2) Marlow formu
- 3) Mooney-Rivlin formu
- 4) Neo-Hookean formu
- 5) Ogden formu
- 6) Polynomial formu
- 7) Reduced polynomial formu
- 8) Yeoh formu
- 9) Van der Waals formu

Aşağıda belirtileceği gibi, Reduced polynomial ve Mooney-Rivlin modelleri, polynomial modelin belli durumları olarak görülebilmektedir. Yeoh ve Neo-Hookean potansiyelleri, sırayla, Reduced polynomial’in özel durumları olarak

görülebilmektedir. Bu sebeple bazen, bu modellerden toplu olarak “Polynomial modeller” olarak bahsedilmiştir.

Genellikle, çoklu deneysel testlerden elde edilen veri mevcut olduğu zaman (genellikle, en azından tek eksenli ve eş iki eksenli test verisi gerektirir), Ogden ve Van der Waals formlarına uygun deneysel sonuçlar daha kesindir. Şayet sınırlı test verisi kalibrasyon için uygunsa, Arruda-Boyce, Van der Waals, Yeoh yada Reduced polynomial formlar makul davranış gösterir. Yalnızca bir test veri seti (tek eksenli, eş iki eksenli yada düzlemsel test verisi) mevcut olduğu zaman, Marlow formu kullanılmaktadır. Bu durumda bir birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi kurulmaktadır. Şöyle ki, test verisi aynen çoğaltılmakta ve diğer deformasyon yollarında uygun davranışa sahip olmaktadır.

4.4. Hiperelastik Malzemeleri Değerlendirme

Kullandığımız analiz programının CAE bölümünde, seçilmiş birim şekil değiştirme potansiyel enerjisini kullanan otomatik olarak yaratılan yanıt eğrileri tarafından, hiperelastik malzeme davranışını değerlendirmemiz için bize izin vermektedir. Ek olarak, belirli bir birim şekil değiştirme potansiyel enerjisini belirtmeksizin bir malzeme için deneysel test verisini tedarik edebiliriz ve en uygun birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi belirlemek için malzemeyi kullandığımız analiz programının CAE bölümünde değerlendirebiliriz. Alternatif olarak, birim şekil değiştirme potansiyel enerjisini değerlendirmek için tek eleman test durumları kullanabilmektedir.

4.4.1. Arruda-Boyce formu

Arruda-Boyce formu birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi;

$$U = \mu \left\{ \frac{1}{2}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{20\lambda_m^2}(\bar{I}_1^2 - 9) + \frac{11}{1050\lambda_m^4}(\bar{I}_1^3 - 27) + \frac{19}{7000\lambda_m^6}(\bar{I}_1^4 - 81) + \frac{519}{673750\lambda_m^8}(\bar{I}_1^5 - 243) \right\} + \frac{1}{D} \left(\frac{J_{el}^2 - 1}{2} - \ln J_{el} \right) \quad (4.2)$$

U , referans hacminin her bir birim şekil değiştirme enerjisidir.

μ, λ_m ve D , sıcaklığa bağlı malzeme parametreleridir.

\bar{I}_1 , birinci deviatorik birim şekil değiştirme sabitidir.

Şöyle tanımlanır ;

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \quad (4.3)$$

$$\text{Deviatorik uzamalar } \bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i \quad (4.4)$$

J , toplam hacim oranıdır

J^{el} ise, elastik hacim oranıdır

λ_i , başlıca uzamalardır.

Ön kayma modülü, μ_0 , μ ile aşağıdaki ifadeyle ilişkilidir ;

$$\mu_0 = \mu \left(1 + \frac{3}{5\lambda_m^2} + \frac{99}{175\lambda_m^4} + \frac{513}{875\lambda_m^6} + \frac{42039}{67375\lambda_m^8} \right) \quad (4.5)$$

$$\mu_0 = 1,0125\mu \quad (4.6)$$

için tipik bir λ_m değeri 7 dir. Şayet, analiz girdi dosyası işlemcisinden model verisinin bir çıktısı istenirse, hem ön kayma modülü μ ve hem de μ_0 parametresi (.dat) veri dosyasında yazdırılmaktadır. Başlangıç hacimsel basınç katsayısı D ile aşağıdaki ifadeyle ilişkilidir ;

$$K_0 = \frac{2}{D} \quad (4.7)$$

4.4.2. Marlow formu

Marlow formu birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi;

$$U = U_{dev}(\bar{I}_1) + U_{vol}(J_{el}) \quad (4.8)$$

U , referans hacminin her bir birim şekil değiştirme enerjisidir

U_{dev} , deviatorik parçası

U_{vol} , hacimsel parçası

\bar{I}_1 , birinci deviatorik birim şekil değiştirme sabitidir. Şöyle tanımlanır;

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \quad (4.9)$$

$$\text{Deviatorik uzamalar } \bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i \quad (4.10)$$

J , toplam hacim oranıdır

J_{el} ise, elastik hacim oranıdır

λ_i , başlıca uzamalardır.

Hacimsel parça, hacimsel test verisini tedarik etmekle, Poisson oranını tanımlayarak ya da tek eksenli, eş iki eksenli yada düzlemsel test verisi ile birlikte yanal birim şekil değiştirmeleri belirterek tanımlanırken, potansiyelin deviatorik parçası, tek eksenli, eş iki eksenli yada düzlemsel test verisinden birisini tedarik etmekle belirlenmektedir [37].

4.4.3. Mooney-Rivlin formu

İlk çalışma Mooney tarafından 1940 yılında gerçekleştirilmiştir. Mooney çalışmasını özel ve genel durum olmak üzere iki kısma ayırmıştır. Özel durumda aşağıdaki kabulleri yapmış ve bu şartları sağlayan malzemeleri de “hiperelastik malzeme” olarak adlandırmıştır.

Malzeme sıkıştırılmaz ve izotropdur. Kayma gerilmesi kayma şekil değiştirmesi ile orantılıdır.

Mooney malzeme modelinin uygulamalarının çoğu, tek eksenli çekme deneyi ile sınırlıdır. Fakat diğer deformasyon çeşitleri ile deneysel veriler elde edilmek istenildiğinde ciddi uyumsuzluklar görülmektedir [4].

Mooney-Rivlin formu birim şekil değiştirme potansiyel enerji;

$$U = C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + C_{01} (\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1} (J^{el} - 1)^2 \quad (4.11)$$

U , referans hacminin her bir birim şekil değiştirme enerjisidir

C_{10} , C_{01} ve D_1 sıcaklığa bağlı malzeme parametreleridir

\bar{I}_1 , \bar{I}_2 birinci ve ikinci deviatorik birim şekil değiştirme sabitleridir. Şöyle tanımlanır;

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \quad (4.12)$$

$$\bar{I}_2 = \bar{\lambda}_1^{(-2)} + \bar{\lambda}_2^{(-2)} + \bar{\lambda}_3^{(-2)} \quad (4.13)$$

Deviatorik uzamalar $\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i$ (4.14)

J , toplam hacim oranıdır

J^{el} ise, elastik hacim oranıdır. λ_i , başlıca uzamalardır. Başlangıç kayma modülü ve hacimsel basınç katsayısı aşağıdaki gibi verilmiştir [37];

$$\mu_0 = 2(C_{10} + C_{01}) \quad (4.15)$$

$$K_0 = \frac{2}{D_1} \quad (4.16)$$

4.4.4. Neo-Hookean formu

Şekil değiştirme enerji fonksiyonunu bu şekilde ilk defa Treloar kullanmıştır. Treloar, yapmış olduğu çalışmada Neo-Hookean malzeme modelini farklı deformasyonlarda deneysel ve teorik verileri karşılaştırmıştır. Tek eksenli çekme deneyinde % 40 şekil değişimi, basit kaymada % 90 şekil değişimi ve eş iki eksenli çekme deneyinde % 200 şekil değişimine kadar deneysel verilerle teorik veriler uyumaktadır. Tek eksenli basma deneyinde ise teorik ve deneysel sonuçlar oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Buradan Neo-Hookean malzeme modelinin küçük şekil değiştirme bölgesinde yeterli fakat büyük şekil değiştirme bölgesinde yetersiz olduğu görülmüştür [4].

Neo-Hookean formu birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi;

$$U = C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1} (J^{el} - 1)^2 \quad (4.17)$$

U , referans hacminin her bir birim şekil değiştirme enerjisidir

C_{10} ve D_1 sıcaklığa bağlı malzeme parametreleridir

\bar{I}_1 birinci deviatorik birim şekil değiştirme sabitidir. Şöyle tanımlanır;

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \quad (4.18)$$

$$\text{Deviatorik uzamalar } \bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i \quad (4.19)$$

J , toplam hacim oranıdır

J^{el} ise, elastik hacim oranıdır

λ_i , başlıca uzamalarıdır. Başlangıç kayma modülü ve hacimsel basınç katsayısı aşağıdaki gibi verilmiştir [37];

$$\mu_0 = 2C_{10} \quad (4.20)$$

$$K_0 = \frac{2}{D_1} \quad (4.21)$$

4.4.5. Ogden formu

Ogden modeli yapısı gereği deneysel verilere eğri uydurma yaklaşımını kullanmaktadır. Herhangi bir gerilme durumu istenilen derecede hassasiyet ile temsil edilebilmektedir. Modeldeki sabitler tek veya iki eksenli çekme deneylerinin sonuçları kullanılarak belirlenebilmektedir.

Ogden göstermiştir ki; Ogden malzeme modeli üç terime kadar açılır ise basit tek eksenli, eş-iki eksenli ve basit kayma deneylerinin sonuçları yeterli oranda temsil edilebilmektedir [4].

Ogden formu birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi;

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i} \quad (4.22)$$

λ_i , başlıca uzamalardır.

N, bir malzeme parametresidir

μ_i, α_i ve D_i , sıcaklığa bağlı malzeme parametreleridir. Ogden formu için başlangıç kayma modülü ve hacimsel basınç katsayısı aşağıdaki gibi verilmiştir;

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i \quad (4.23)$$

$$K_0 = \frac{2}{D_1} \quad (4.24)$$

Yukarıda belirtilen Mooney-Rivlin ve Neo-Hookean formları, μ_i ve α_i nin özel seçenekleri için, genel Ogden birim şekil değiştirme potansiyel enerjisinden de elde edilebilmektedir [37].

4.4.6. Polynomial (Polinom) formu

Bu yaklaşımla kauçuğun bünye denklemi elde edilmeye çalışılmıştır ve kauçuğun mekanik özellikleri daha doğru ve gerçekçi matematiksel formda elde edilmiştir.

Mooney 1940 yılında yapmış olduğu çalışmada kayma gerilmesinin kayma şekil değişimi ile doğrusal değiştiğini ifade etmiş ve kendi adıyla anılan şekil değiştirme enerji fonksiyonunu çıkarmıştır. Bunu Rivlin, yapmış olduğu bir dizi çalışmada malzemenin izotrop ve sıkıştırılmazlık kabulleri altında tek eksenli çekme ve basma, basit kayma, iki eksenli çekme, basit burulma gibi problemleri kauçuk türü malzemeler için çözerek şekil değiştirme enerji fonksiyonunun şekil değiştirme invariantları cinsinden ifade

edilmesi gerektiğini belirtmiş ve genelleştirilmiş Mooney-Rivlin şekil değiştirme enerji fonksiyonunu elde etmiştir.

Rivlin'in elde etmiş olduğu denklemi Isahara, Tschoegl, James, Green, Simpson, Biderman ve Yeoh gibi araştırmacılar farklı şekilde seriye açarak farklı şekil değiştirme enerji fonksiyonları elde etmişlerdir. Yine şekil değiştirme invariantlarını kullanarak fakat polinomial olmayan formda şekil değiştirme enerji fonksiyonlarını Hart-Smith, Alexander, Thomas ve Swanson gibi araştırmacılar elde etmişlerdir. Rivlin'in yapmış olduğu kabulün aksine Valanis, Landel, Ogden, Peng ve Landel gibi araştırmacılar şekil değiştirme enerji fonksiyonunu şekil değiştirme invariantları yerine uzama oranları ile ifade etmişlerdir [4].

Polynomial formu birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi;

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i} \quad (4.25)$$

U , referans hacminin her bir birim şekil değiştirme enerjisidir

N , bir malzeme parametresidir

C_{ij} ve D_i sıcaklığa bağlı malzeme parametreleridir.

\bar{I}_1 ve \bar{I}_2 birinci ve ikinci deviatorik birim şekil değiştirme sabitleridir. Şöyle tanımlanır;

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \quad (4.26)$$

$$\bar{I}_2 = \bar{\lambda}_1^{(-2)} + \bar{\lambda}_2^{(-2)} + \bar{\lambda}_3^{(-2)} \quad (4.27)$$

$$\text{Deviatorik uzamalar } \bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i \quad (4.28)$$

J , toplam hacim oranıdır

J^{el} ise, elastik hacim oranıdır

λ_i , başlıca uzamalardır. Başlangıç kayma modülü ve hacimsel basınç katsayısı aşağıdaki gibi verilmiştir;

$$\mu_0 = 2(C_{10} + C_{01}) \quad (4.29)$$

$$K_0 = \frac{2}{D_1} \quad (4.30)$$

Bahsedilen birim şekil değiştirmelerin küçük yada yalnızca orta karar büyüklükte (<100%) oldukları yerdeki durumlar için, polinomial serilerindeki ilk terimler genellikle yeterli kesin modeli tedarik etmektedir. C_{ij} nin özel seçenekleri için Mooney-Rivlin, Neo-Hookean ve Yeoh formları elde edilmektedir.

4.4.7. Reduced polynomial (Azaltılmış Polinom) formu

Reduced polynomial formu birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi;

$$U = \sum_{i=1}^N C_{i0} (\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i} \quad (4.31)$$

U , referans hacminin her bir birim şekil değiştirme enerjisidir

N , bir malzeme parametresidir

C_{i0} ve D_i sıcaklığa bağlı malzeme parametreleridir.

\bar{I}_1 birinci deviatorik birim şekil değiştirme sabitidir. Şöyle tanımlanır;

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \quad (4.32)$$

$$\text{Deviatorik uzamalar } \bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i \quad (4.33)$$

J , toplam hacim oranıdır

J^{el} ise, elastik hacim oranıdır

λ_i , başlıca uzamalardır. Başlangıç kayma modülü ve hacimsel basınç katsayısı aşağıdaki gibi verilmiştir;

$$\mu_0 = 2C_{10} \quad (4.34)$$

$$K_0 = \frac{2}{D_1} \quad (4.35)$$

4.4.8. Van der Waals formu

Van der Waals formu birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi;

$$U = \mu \left\{ -(\lambda_m^2 - 3) [\ln(1 - \eta) + \eta] - \frac{2}{3} \alpha \left(\frac{\tilde{I} - 3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} + \frac{1}{D} \left(\frac{J_{el}^2 - 1}{2} - \ln J_{el} \right) \quad (4.36)$$

$$\tilde{I} = (1 - \beta) \bar{I}_1 + \beta \bar{I}_2 \quad (4.37)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\tilde{I} - 3}{\lambda_m^2 - 3}} \quad (4.38)$$

Burada,

U , referans hacminin her bir birim şekil değiştirme enerjisidir

μ , başlangıç kayma modülüdür

λ_m , kilit uzama

α , bütünsel etkileşim parametresi

β , sabit karışım parametresi

D ise sıkıştırılabilirliği yönetir.

Bu parametreler sıcaklığa bağlı olabilir. \bar{I}_1 ve \bar{I}_2 birinci ve ikinci birim şekil değiştirme sabitleridir. Şöyle tanımlanır;

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \quad (4.39)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^{(-2)} + \bar{\lambda}_2^{(-2)} + \bar{\lambda}_3^{(-2)} \quad (4.40)$$

$$\text{Deviatorik uzamalar } \bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i \quad (4.41)$$

J, toplam hacim oranıdır

J^{el} ise, elastik hacim oranıdır

λ_i , başlıca uzamalarıdır. Başlangıç kayma modülü ve hacimsel basınç katsayısı aşağıdaki gibi verilmiştir [37];

$$\mu_0 = \mu \quad (4.42)$$

$$K_0 = \frac{2}{D} \quad (4.43)$$

4.4.9. Yeoh formu

Birçok araştırmacının deney numunesi olarak vulkanize edilmiş fakat katkı maddesi kullanılmamış kauçuk malzemesi kullanmasının aksine Yeoh çalışmalarında vulkanize edilmiş ve katkı maddesi olarak karbon siyahı katılmış malzemeyi deney numunesi olarak kullanmış ve bu malzeme için şekil değiştirme enerji fonksiyonu elde etmeye çalışmıştır. Deneysel çalışmalarını daha kolay ve standartlaştırılmış olan tek eksenli çekme ve basma üzerinde gerçekleştirmiştir. İki eksenli çekme deneyinin zor olması ve standart olarak uygulanmayışı nedeniyle kullanmamıştır.

Bu şekil değiştirme enerji fonksiyonunun en büyük pratik faydası ise sonlu elemanlar paket programlarından birçoğunda üçüncü dereceden deformasyon modelinin bulunmasıdır. Yeoh, çalışmalarını vulkanize edilmiş ve kauçuğa karbon siyahı katılmış ve katılmamış numuneler için yapmıştır. Her ikisinde de kayma modülünün, Neo-Hookean ve Mooney-Rivlin malzeme modelinin aksine, deformasyonla değiştiğini belirtmiştir. Yeoh önermiş olduğu malzeme modelinde tek eksenli çekme deneyinden elde edilen verilerin farklı deformasyonlardaki gerilme-şekil değiştirme davranışını yeterli ölçüde tanımladığını bu nedenle diğer deneylerin özellikle iki eksenli çekme deneyine gerek kalmadan malzemenin davranışının tek eksenli çekme deneyi ile belirlenebileceğini belirtmiştir [4].

Yeoh formu birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi;

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{30}(\bar{I}_1 - 3)^3 + \frac{1}{D_1}(J^{el} - 1)^2 + \frac{1}{D_2}(J^{el} - 1)^4 + \frac{1}{D_3}(J^{el} - 1)^6 \quad (4.44)$$

U, referans hacminin her bir birim şekil değiştirme enerjisidir

C_{i0} ve D_i sıcaklığa bağlı malzeme parametreleridir.

\bar{I}_1 birinci deviatorik birim şekil değiştirme sabitidir. şöyle tanımlanır;

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \quad (4.45)$$

$$\text{Deviatorik uzamalar } \bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i \quad (4.46)$$

J, toplam hacim oranıdır

J^{el} ise, elastik hacim oranıdır

λ_i , başlıca uzamalardır. Başlangıç kayma modülü ve hacimsel basınç katsayısı aşağıdaki gibi verilmiştir;

$$\mu_0 = 2C_{10} \quad (4.47)$$

$$K_0 = \frac{2}{D_1} \quad (4.48)$$

4.5. Isıl Genleşme

Hiperelastik malzeme modelinde yalnızca izotropik ısıl genleşmeye izin verilir.

Elastik hacim oranı J^{el} , toplam hacim oranı J ve ısıl hacim oranı J^{th} ile aşağıdaki gibi ilişkilidir;

$$J^{el} = \frac{J}{J^{th}} \quad (4.49)$$

J^{th} ise şöyle verilmiştir;

$$J^{th} = (1 + \varepsilon^{th})^3 \quad (4.50)$$

ε^{th} , sıcaklık ve izotropik ısı genleşme katsayısından elde edilen, doğrusal ısı genleşme birim şekil değiştirmedir.

4.6. Hiperelastik Malzeme Davranışının Tanımlaması

Bir malzemenin mekanik yanıtı, belirli malzemeye uygun bir birim şekil değiştirme potansiyel enerjisinin seçimiyle tanımlanmaktadır. Kullandığımız analiz programındaki, birim şekil değiştirme potansiyel enerji formları, bir deviatorik bileşenin ayrılabilir fonksiyonları ve bir hacimsel bileşen olarak yazılmaktadır;

$$U = U_{dev}(\bar{I}_1, \bar{I}_2) + U_{vol}(J_{el}) \quad (4.51)$$

Ayrıca, birim şekil değiştirme potansiyel enerjisinin ayrılabilir olmaya ihtiyaç duymadığı durumda, kullanıcı altprogram ile birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi tanımlanabilmektedir.

Genel olarak, hiperelastik malzeme modellerinin kullandığımız analiz programında uygunluğu için, malzeme katsayılarını açıkça belirtmeyi yada deneysel test verisini tedarik etmeyi ve kullandığımız analiz programının otomatik olarak uygun katsayı değerlerinin belirlenmesine sahip olabilmekteyiz. Marlow formu bir istisnadır. Bu durumda birim şekil değiştirme potansiyel enerjisinin deviatorik parçası test verisiyle belirlenmelidir.

Kauçuk esaslı malzemelerin özellikleri, bir gruptan diğerine değişkenlik gösterebilmektedir, bu yüzden, veri farklı deneylerde kullanılıyorsa, deneylerin hepsi aynı malzeme grubundan alınan numunelerde gerçekleştirilmelidir.

4.7. Viskoelastik ve Histeretik Malzemeler

Viskoelastik malzemelerin elastik yanıtı ve histeretik malzemeler ani yanıt yada böyle malzemelerin uzun vadeli yanıtının tanımlanmasıyla, açıkça belirlenebilmektedir. Şayet, diğer taraftan, uzun vadeli elastik yanıt kullanırsa, deneylerden elde edilen veri, bu malzemelerin karakteristik yumuşama sürelerinden çok daha uzun süre mesafesinden sonra toplanmak zorundadır. Uzun vadeli elastik yanıt, varsayılan elastik malzeme davranışıdır.

4.8. Sıkıştırılabilirliğin Açıklaması

Sıkıştırılabilirlik, D_i için sıfırdan farklı değerleri belirleyerek (Marlow modeli dışında) 0,5 ten daha küçük bir değer için Poisson oranını kurarak yada sıkıştırılabilirliği karakterize eden test verisini temin ederek tanımlanabilmektedir. Şayet Marlow modeli dışındakilerin hiperelastikliği için Poisson oranını belirlersek, kullandığımız analiz programı, başlangıç kayma modülünden elde edilen başlangıç hacimsel basınç katsayısını hesaplamaktadır.

$$D_1 = \frac{2}{\kappa_0} = \frac{3(1-2\nu)}{\mu_0(1+\nu)} \quad (4.52)$$

Marlow modeli için, belirlenmiş Poisson oranı, sabit bir değeri temsil etmektedir. O değeri, deformasyon işlemi boyunca belirlemektedir. Eğer D_1 sıfıra eşitse, bütün D_i ler sıfıra eşit olmalıdır. Böyle bir durumda malzeme, kullandığımız analiz programının Standard bölümünde tamamen sıkıştırılmaz kabul edilirken, Explicit bölümü sıkıştırılabilir davranışı $\kappa_0 / \mu_0 = 20$ (Poisson oranı 0,475) kabul etmektedir.

4.9. Malzeme Katsayılarını Doğrudan Belirtme

Hiperelastik birim şekil değiştirme potansiyel enerji parametreleri, Marlow formu dışında, bütün formların birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi için sıcaklık fonksiyonları olarak doğrudan verilebilmektedir.

4.10. Malzeme Katsayılarını Ayarlamak İçin Test Verisinin Kullanımı

Hiperelastik modellerin malzeme katsayıları, deneysel gerilme-birim şekil değiştirme verisinden kullandığımız analiz programı tarafından ayarlanabilmektedir. Marlow modeli durumunda, test verisi, birim şekil değiştirme potansiyel enerjisini doğrudan ayarlayabilir çünkü bu model için malzeme katsayıları yoktur. N değeri ve deneysel gerilim-birim şekil değiştirme verisi, dört örnek test için tanımlanabilir; Tek eksenli, eş iki eksenli, düzlemsel ve eğer malzeme sıkıştırılabilirse, hacimsel bir sıkıştırma testi. Daha sonra kullandığımız analiz programı, malzeme parametrelerini hesaplamaktadır. Malzeme sabitleri, gerilmedeki ilgili hatayı küçültten en küçük kareler uydurma işlemi sayesinde belirlenmektedir. n , Nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme verisi çiftleri için, ilişkin hata ölçümü E , küçültülebilmektedir;

$$E = \sum_{i=1}^n \left(1 - T_i^{th} / T_i^{test}\right)^2 \quad (4.53)$$

T_i^{test} , test verisinden elde edilen bir gerilme değeridir ve T_i^{th} , elde edilen nominal gerilme ifadelerinden birisinden gelmektedir. Daha düşük birim şekil değiştirmelerde daha iyi bir uygunluğu tedarik etmesi için, kullandığımız analiz programı, ilgili hatayı, bir mutlak hata ölçümünden daha fazla küçültmektedir. Bu yöntem, bütün birim şekil değiştirme potansiyel enerjileri ve maksimum izin verilen $N=2$ olduğu polynomial form dışındaki herhangi bir N düzeni için kullanılabilir. Polinomiyal modeller, C_{ij} sabit terimlerinde doğrusaldır. Bundan dolayı, en küçük kareler uydurma işlemi kullanılabilir. Arruda-Boyce, Ogden ve Van der Waals

potansiyelleri, katsayılarının bir kaçında doğrusal değildir, bu yüzden, en küçük kareler uydurma işlemini gerektirmektedir.

Uygulamada, birim şekil değiştirme ilgi sırası üzerinde, farklı deformasyon çeşitleri içeren birkaç deneyden veri elde etmek ve bu verinin tamamını parametreleri belirlemek için kullanmak genellikle en iyisidir. Bu özellikle, görüngüsel modeller yani Ogden ve polinomial modeller için doğrudur. İyi bir hassasiyet ve sağlamlığı başarabilmek için gözlem yapılmaktadır, bu modellerin tam olarak uygun olması için, bir deformasyondan daha fazlasından elde edilen test verisinin kullanımı gerekli olmaktadır. Bazı durumlarda, özellikle büyük birim şekil değiştirmelerde, bu sınırlandırmayı azaltabilen ikinci sabite bağlılığı kaldırmaktır. Arruda-Boyce, Neo-Hookean ve Van der Waals modelleri $\beta = 0$ ile fiziksel bir yorum önermekte ve parametreler, yalnızca bir testi baz aldığı zaman, daha iyi bir genel deformasyon usülleri tahmini sunmaktadır.

Bu yöntem, sıcaklığa bağlı olan hiperelastik özelliklere izin vermemektedir. Bununla birlikte, eğer sıcaklığa bağlı test verisi kullanılabilir ise, uydurulmuş birkaç eğri, basit bir girdi dosyasında analizi denetleyen bir verinin performansı ile yürütülebilmektedir. Bu durumda, kullandığımız analiz programı tarafından belirlenen sıcaklığa bağlı katsayılar, analiz çalışmasında doğrudan girilebilmektedir.

Diğer parametrelerin, en küçük kareler eğri uydurmayı kullandığı bulunurken, isteğe bağlı olarak, Van der Waals modelindeki β parametresi, sabit bir değer için kurulmaktadır.

Her bir testten ne kadar çok veri noktası isteniyorsa girilebilmektedir. Dört testten (aynı malzemeden alınan örnek parçalar üzerinde) elde edilen verinin dahil edilmesi ve yüklemde meydana çıkacağı umulan nominal birim şekil değiştirme aralığını kapsayan veri noktaları tavsiye edilmektedir. Genel Polinomial ve Ogden modelleri için ve Van der Waals modelindeki β katsayısı için, düzlemsel test verisine tek eksenli test verisi, eş iki eksenli test verisi yada bu her iki test verisi eşlik etmelidir. Aksi takdirde, en küçük kareler uydurma çözümü tek olmayacaktır.

Birim şekil değiştirme verisi, nominal birim şekil değiştirme değerleri olarak verilmelidir (her bir uzunluk orijinal uzunlukla değiştirilir). Tek eksenli, eş iki eksenli ve düzlemsel testler için gerilim verisi, nominal gerilim değerleri (orijinal kesitsel alanın her bir kuvveti) olarak verilmektedir. Bu testler, sıkıştırma ve uzama verisinin girmesine izin vermektedir. Sıkıştırıcı gerilim ve birim şekil değiştirme, negatif değerler olarak girilmektedir.

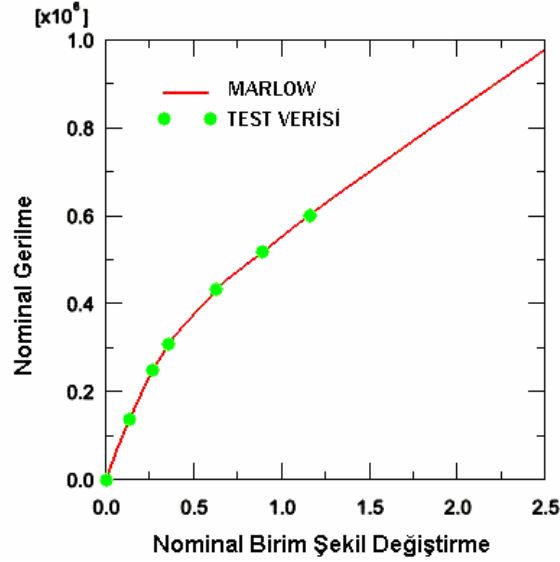
Sıkıştırılabilirlik açıkça belirtildiyse, D_i yada D , hacimsel sıkıştırma test verisinden hesaplanabilmektedir. Alternatif olarak, sıkıştırılabilirlik, kullandığımız analiz programının başlangıç kayma modülünden başlangıç hacimsel basınç katsayısını, hesapladığı durumda, bir Poisson oranını belirterek tanımlanabilmektedir. Şayet böyle bir veri verilmezse, kullandığımız analiz programının Standard bölümünde D yada bütün D_i leri sıfır kabul edilmektedir. Oysa kullandığımız analiz programının Explicit bölümü, sıkıştırılabilirliği 0,475 Poisson oranıyla ilgili olarak kabul etmektedir. Bu sıkıştırma testleri için, gerilim verisi basınç değerleri olarak verilmektedir.

4.11. Marlow Modelini Belirtme

Marlow modeli, birim şekil değiştirme potansiyel enerjisinin 2.deviatorik sabit \bar{I}_2 nin bağımsız kabul etmektedir. Bu model, sıkıştırılabilirlik hesaba katıldığında, deviatorik davranışı ve isteğe bağlı olarak hacimsel davranışı tanımlayan test verisi tedarik edilerek tanımlanmaktadır. Kullandığımız analiz programı, Şekil 4.1’de de gösterildiği gibi, tam anlamıyla test verisini çoğaltan bir birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi kurmaktadır

Marlow model ile gerilim-birim şekil değiştirme verisinin interpolasyon ve ekstrapolasyonu, küçük ve büyük birim şekil değiştirmeler için yaklaşık olarak doğrusaldır. 0,1 ile 1 aralığındaki ara birim şekil değiştirmeler için, Marlow modeli ile interpolasyon/ekstrapolasyon da, önemli bir düzeyde doğrusal olmayan davranış gözlemlenmektedir. Örneğin, yukarıda 4. ve 5. veri noktaları arasında doğrusal olmayış açıkça görülmektedir. İstenmeyen doğrusal olmayışlığı azaltmak için, ara

birim şekil değiştirme aralığında yeterli veri noktalarının belirlendiğinden emin olunmalıdır.



Şekil 4.1. Test verisiyle Marlow modelin sonuçları

Deviatorik davranış, tek eksenli, eş iki eksenli yada düzlemsel test verisinin belirlenmesiyle tanımlanmaktadır. Genel olarak, testler eşdeğer olduğu için, sıkıştırma testlerinden elde edilen veri yada çekme testlerinden elde edilen veriden birini belirtebilmekteyiz. Bununla birlikte, kafes krişiler, kafesler ve inşaat demirleri için, çekme yada sıkıştırma testlerinden elde edilen veri birlikte belirlenebilmektedir. Hacimsel davranış, aşağıda takip eden üç yöntemden birini kullanarak tanımlanabilmektedir:

- 1) Tek eksenli, eş iki eksenli yada düzlemsel test verisinin parçası olarak, nominal birim şekil değiştirmeler ve nominal gerilimlere ek olarak nominal yanıl birim şekil değiştirmeleri belirlemek
- 2) Hiperelastik malzeme için Poisson oranı belirlemek
- 3) Hacimsel test verisinin doğrudan belirlemek. Hidrostatik sıkıştırma ve hidrostatik çekme verisi belirlenebilmektedir. Şayet, yalnızca hidrostatik sıkıştırma verisi mevcutsa, ki genellikle böyledir, kullandığımız analiz programı, hidrostatik basıncın, bir nominal hacimsel birim şekil değiştirmenin ters simetrik fonksiyonu kabul edecektir.

$$\epsilon_{vol} = J_{vol} - 1 \quad (4.54)$$

Şayet hacimsel davranışı tanımlamazsak, kullandığımız analiz programının Standard bölümü tamamen sıkıştırılmaz kabul eder iken, Explicit bölümü, sıkıştırılabilirliği 0,475 Poisson oranıyla ilgili olarak kabul etmektedir.

Gerilimdeki malzeme test verisi, simülasyon esnasında yakınsama zorluğu için liderlik edebilen birim şekil değiştirme artışıyla, yumuşak değişim göstermemektedir. Yumuşak (düzgün) test verisinin Marlow formunu tanımlamak için kullanılması çokça tavsiye edilmektedir. Kullandığımız analiz programı, bir yumuşatma algoritması tedarik etmektedir.

Marlow modeli için olan test verisi, bir sıcaklık fonksiyonu ve alan değişkenleri olarak verilebilmektedir. Gerekli kullanıcı tanımlı alan bağılıklarının numarası belirtilmek zorundadır.

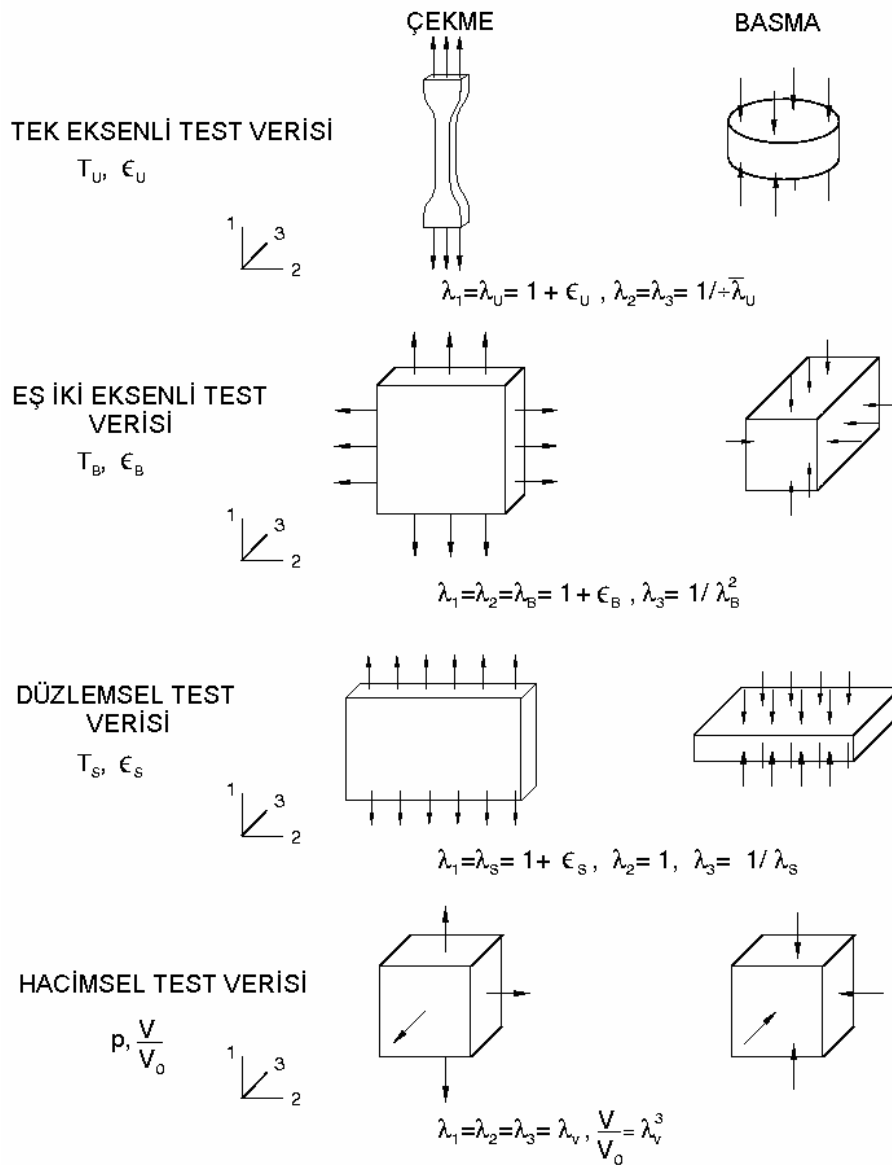
Tek eksenli, eş iki eksenli ve düzlemsel test verisi, nominal birim şekil değiştirmelerin artan sırasıyla, hacimsel test verisi, hacim oranının azalan sırasıyla verilmelidir.

4.12. Deneysel Testler

Homojen bir malzeme için, homojen deformasyon modları, malzeme sabitlerini karakterize etmek için yeterlidir. Kullandığımız analiz programı, aşağıdaki deformasyon modlarından test verisi almaktadır:

- a) Tek eksenli çekme ve basma
- b) Eş iki eksenli çekme ve basma
- c) Düzlemsel çekme ve basma (saf kayma)
- d) Hacimsel çekme ve basma

Bu modlar, Şekil 4.2'de şematik olarak resimle gösterilmiştir ve aşağıda tanımlanmıştır. En çok gerçekleştirilen deneyler tek eksenli çekme, tek eksenli sıkıştırma ve düzlemsel çekmedir.



Şekil 4.2. Deformasyon modlarının şematik resimleri [37]

İyi bir hiperelastik malzeme davranışı karakterizasyonu elde etmek için bu üç test tipinden elde edilen veriler birleştirilmektedir.

Sıkıştırılmaz malzeme modeli uyarlaması için, farklı testler için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri, birim şekil değiştirme sabitleriyle ilgili olarak birim şekil değiştirme enerji fonksiyonunun türevlerini kullanarak geliştirilmektedir. Bu ilişkiler, nominal gerilme (orjinali tarafından bölünmüş kuvvet, deformasyonsuz alan) ve nominal yada mühendislik birim şekil değiştirir. Uzunların yönlerinde ifade edilen, deformasyon eğimi (değişim ölçüsü);

$$F = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

λ_1, λ_2 ve λ_3 başlıca uzamalarıdır. Bir malzemenin başlıca fiber yönlerinde, son uzamanın orijinal konfigürasyondaki uzunluğa oranları. Başlıca uzamalar, λ_i , başlıca nominal birim şekil değiştirmelerle, ϵ_i , ile ilişkilidir;

$$\lambda_i = 1 + \epsilon_i \quad (4.56)$$

Sıkıştırılamazlık ve izotermal yanıt, $J = \det(F) = 1$ ve ,dolayısıyla, $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$ kabul edilmektedir. Başlıca uzamaların terimlerinde deviatorik birim şekil değiştirmelerin sabitleri şunlardır;

$$\bar{I}_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (4.57)$$

$$\bar{I}_2 = \lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} \quad (4.58)$$

4.12.1. Tek eksenli testler

Tek eksenli deformasyon modu, başlıca uzama terimlerinde, λ_1 , aşağıdaki gibi karakterize edilmektedir;

$$\lambda_1 = \lambda_U \quad (4.59)$$

$$\lambda_2 = \lambda_3 = 1/\sqrt{\lambda_U} \quad (4.60)$$

λ_U , yükleme yönündeki uzamadır. Nominal birim şekil değiştirme şöyle tanımlanır;

$$\epsilon_U = \lambda_U - 1 \quad (4.61)$$

tek eksenli nominal gerilimi, T_U , türevi için, virtüyel işe başvurulmaktadır:

$$\delta_U = T_U \delta \lambda_U \quad (4.62)$$

$$T_U = \frac{\partial U}{\partial \lambda_U} = 2(1 - \lambda_U^{-3}) \left(\lambda_U \frac{\partial U}{\partial \bar{I}_1} + \frac{\partial U}{\partial \bar{I}_2} \right) \quad (4.63)$$

Tek eksenli çekme testi, bütün bu testlerin içinde en yaygın olanıdır ve genellikle “köpek-kemiği (papyon)” numunesi çekilerek gerçekleştirilmektedir. Tek eksenli basma testi, yağlanmış yüzeyler arasında bir baskı kafasına yüklemeyle gerçekleştirilmektedir. Baskı kafasında, homojen tek eksenli basma gerilim-birim şekil değiştirme durumundan sapmalara sebep olacak herhangi fıçılama etkisini azaltmak için, yükleme yüzeyleri yağlanmaktadır.

4.12.2. Eş iki eksenli testler

Eş iki eksenli deformasyon modu, başlıca uzama terimlerinde, λ_i , aşağıdaki gibi karakterize edilmektedir ;

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_B \quad (4.64)$$

$$\lambda_3 = 1 / \lambda_B^2 \quad (4.65)$$

λ_B , iki dikey yükleme yönlerindeki uzamadır. Nominal birim şekil değiştirme şöyle tanımlanmaktadır;

$$\epsilon_B = \lambda_B - 1 \quad (4.66)$$

Eş iki eksenli nominal gerilim, T_B , için olan anlatımı geliştirmek için, yine virtüyel iş kullanılmaktadır (yükleme yönüne dikey olan gerilimi sıfır olarak kabul etmekteyiz),

$$\delta_U = 2T_B \delta\lambda_B \quad (4.67)$$

$$T_B = \frac{1}{2} \frac{\partial U}{\partial \lambda_B} = 2(\lambda_B - \lambda_B^{-5}) \left(\frac{\partial U}{\partial \bar{I}_1} + \lambda_B^2 \frac{\partial U}{\partial \bar{I}_2} \right) \quad (4.68)$$

Uygulamada, tertibattaki deneysel zorluklar nedeniyle, eş iki eksenli basma testi nadir gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, bu deformasyon modu, davranış için apaçık olan bir tek eksenli çekme testine eşdeğerdir.

Daha yaygın bir test, eş iki eksenli çekme testidir. Eş iki eksenli çekme gerilmeleri ile bir gerilme durumu ve sıfır kayma gerilmesi yaratılmaktadır. Bu durum genellikle iki eksenli bir test makinesinde bir kare levhanın uzatılmasıyla elde edilmektedir. Bir de, bir dairesel ince zarı bir küresel şeklin içine doğru şişirerek elde edilmektedir (bir balonu şişirmek, patlatmak gibi). İnce zarın ortasındaki gerilim alanı o sırada eş iki eksenli çekmeye yakındır, bu noktada ince zarın kalınlığının eğriliğin yarı çapından çok daha küçük olduğunu vermektedir. Bununla birlikte, birim şekil değiştirmenin dağılımı tamamen aynı olmayacak ve lokal birim şekil değiştirme ölçüleri gerekli olmayacaktır. Birim şekil değiştirme ve eğrilik yarı çapı bilindiği zaman, nominal gerilmeler, şişirme basıncından elde edilebilmektedir.

4.12.3. Düzlemsel testler

Düzlemsel deformasyon modu, başlıca uzama terimlerinde, λ_i , aşağıdaki gibi karakterize edilmektedir;

$$\lambda_1 = \lambda_S, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = 1/\lambda_S \quad (4.69)$$

λ_S , yükleme yönünde bir uzamadır. Bu durumda, yükleme yönündeki nominal birim şekil değiştirme ;

$$\varepsilon_s = \lambda_s - 1 \quad (4.70)$$

Bu teste “sadece (saf) kayma” testi de denilmektedir. Logaritmik birim şekil değiştirme terimlerinde,

$$\varepsilon_1 = \ln \lambda_1 = -\ln \lambda_3 = -\varepsilon_3 \quad (4.71)$$

$$\varepsilon_2 = \ln \lambda_2 = 0 \quad (4.72)$$

yüklemeye yönüne 45° açıda bir saf kayma durumuna uymaktadır.

Virtüyel iş prensibi şunu vermektedir;

$$\delta U = T_s \delta \lambda_s \quad (4.73)$$

T_s , nominal düzlemsel gerilmedir,

$$T_s = \frac{\partial U}{\partial \lambda_s} = 2(\lambda_s - \lambda_s^{-3}) \left(\frac{\partial U}{\partial \bar{I}_1} + \frac{\partial U}{\partial \bar{I}_2} \right) \quad (4.74)$$

genel polinomial ve Ogden modelleri için ve Van der Waals daki β katsayısı için, bu denklem yalnız sabitleri benzersiz bir şekilde belirlememektedir. Malzeme parametrelerini belirlemek için tek eksenli test verisi ve/veya iki eksenli test verisi tarafından, düzlemsel test verisi çoğaltılmış ve değerlendirilmiş olmalıdır.

Düzlemsel testler genellikle ince, kısa ve geniş dikdörtgen biçiminde şerit malzemeyle yapılmaktadır. Bu şerit malzemenin geniş kenarları, bağımsız hareket ettirilen rijit yüklemeye mangelereyle sabitlenmiştir. Ayrılma yönü 1-yönü ve kalınlık yönü 3-yönü ise, uzun boyuttaki numuneye kıyasla 2-yönünde ve rijit mangelere, $\lambda_2 = 1$ yaklaşımını kullanmamıza izin vermektedir, yani, numunenin

geniş yönünde deformasyon yoktur. Şayet 3-yönünün ana yön olduğu hesaba katılırsa, bu deformasyon moduna, düzlemsel basma da denilebilmektedir. Sıkıştırılmaz düzlem birim şekil değiştirme davranışının bütün formları, bu deformasyon modu tarafından karakterize edilmektedir. Sonuç olarak, şayet düzlem birim şekil değiştirme analizi gerçekleştirilirse, düzlemsel test verisi, malzemenin gerilmesi ile ilgiliyi temsil etmektedir.

4.12.4. Hacimsel testler

Asıl malzeme davranışı ile ilgili olarak, D_i (yada Arruda-Boyce ve Van der Waals modelleri için D), bu değerlerle, malzemenin başlangıç hacimsel basınç katsayısı modülü, $K_0 = 2/D_1$ 'i onun başlangıç kayma modülü (polinomial model için, $\mu_0 = 2(C_{10} + C_{01})$ ile, Ogden modeli için, $\mu_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i$ ile) karşılaştırabilmekte ve sonra D_i değerlerinin sunduğu sonuçların yeterli gerçeklikte olup olmadığı hakkında değerlendirme yapabilmekteyiz. Kullandığımız analiz programının Explicit bölümünün uyarısının faydalı olması için; K_0 / μ_0 , 100 den daha az olmalıdır. Aksi takdirde, gürültülü çözümler elde edilecek ve zaman artışları aşırı küçük olacaktır. D_i ve D , saf hacimsel sıkıştırma numunesinden (gerçekleştirmek için, hacimsel çekme testleri çok daha zordur) elde edilen veriden hesaplanabilmektedir. Saf hacimsel bir testte

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_V; \text{ bu yüzden, } \bar{I}_1 = \bar{I}_2 = 3 \text{ ve } J = \lambda_V^3 = V/V_0 \text{ (hacim oranı)} \quad (4.75)$$

Birim şekil değiştirme potansiyel enerjisinin polinomial formu kullanılarak, numune üzerindeki toplam basınç gerilimi elde edilmektedir;

$$\rho = -\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}\right) = -\sum_{i=1}^N 2i \frac{1}{D_i} (\lambda_V^3 - 1)^{2i-1} \quad (4.76)$$

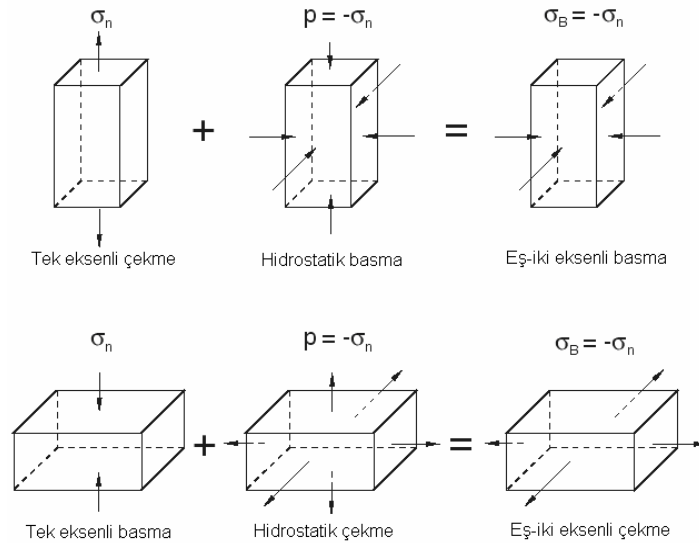
Bu denklem, D_i yi belirlemek için kullanılabilir. Şayet U için, ikinci bir polinomial serileri düzeni kullanıyorsak, $N=2$ ye sahibiz ve bundan dolayı iki tane D_i ye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden, basınç-hacim oranı eğrisi üzerinde, iki noktanın en küçük miktarına, D_i için iki denklem vermek için ihtiyaç duyulmaktadır. Ogden ve reduced polinomial potansiyelleri için D_i , $N=6$ ya kadar için belirlenebilmektedir. Bir doğrusal en küçük kareler uydurma, sağlanan N veri noktaları daha fazla olduğu zaman, gerçekleştirilebilmektedir.

Hacimsel bir testi yürütmenin yaklaşık bir yolu, üst yüzeyi rijit bir pistonla sıkıştırılmış ve rijit bir kabın içine uygun bir şekilde oturmuş silindirik bir kauçuk numunenin kullanımını içermektedir. Hacimsel ve deviatorik deformasyon mevcut olmasına rağmen, deviatorik gerilmeler hidrostatik gerilmelerden daha küçük birkaç düzen farkı olup (hacimsel basınç katsayısının kayma modülünden çok daha yüksek olması sebebiyle) ihmal edilebilir. Basma gerilmesi, etkin olarak basan rijit piston tarafından yüklenmekte ve silindir kauçuktaki hacimsel birim şekil değiştirme (deformasyon), pistonun yer değiştirmesinden hesaplanmaktadır.

D_i nin sıfıra eşit olmayan değerleri, tek eksenli, eş iki eksenli ve düzlemsel gerilme sonuçlarını etkilemektedir. Bununla birlikte, malzemenin sadece biraz sıkıştırılabilir olduğu kabul edildiği için, teknikler, deviatorik katsayıları elde etmek için tanımlanmaktadır. Malzemenin tamamen sıkıştırılmaz olduğunu kabul etmelerine rağmen, o katsayılar, yeterli kesinlikte değerleri vermelidir.

4.12.5. Eşdeğer deneysel testler

Bir yüklemdeki bir çekme ya da basma hidrostatik gerilmenin üst üste koyulması (süper pozisyon), farklı gerilmelerdeki tamamen sıkıştırılmaz elastik malzeme sonuçları deformasyonu değiştirmemektedir.



Gerilmeler σ_1 , nominal gerilme değildir, gerçek gerilmeyi gösteriyor.

Şekil 4.3. Hidrostatik gerilmenin üst üste koyulması (süper pozisyon) aracılığıyla eşdeğer deformasyon modları

Şekil 4.3 şunu gösterir, görünüşte farklı olan birkaç yükleme koşulu altında deformasyonlarında eşdeğerdir ve bundan dolayı, eşdeğer testlerdir;

- Tek eksenli çekme – Eş iki eksenli basma
- Tek eksenli basma – Eş iki eksenli çekme
- Düzlemsel çekme – Düzlemsel basma

Diğer taraftan, tek eksenli ve eş iki eksenli çekme ve sıkıştırma durumlarının modları birbirinden bağımsızdır, tek eksenli çekme ve tek eksenli sıkıştırma, bağımsız veri sağlamaktadır.

4.13. Test Verisi Yumuşatma

DeneySEL test verisi algılamada sık sık gürültü içermektedir. Rastgele gürültü tarafından, test verisi yavaşça değişmekte ve bozulmaktadır. Bu gürültü kullandığımız analiz programının türettiği, birim şekil değiştirme potansiyel enerjisinin kalitesini etkilemektedir. Bu gürültü özellikle Marlow formunda,

hesaplanan modeli ayarlamak için kullanılan test verisini tam olarak tanımlayan bir birim şekil değiştirme potansiyel enerjisinde bir problemdir. Bu diğer formlarda daha azdır çünkü yumuşak fonksiyonlar test verisi sayesinde uydurulmaktadır.

Kullandığımız analiz programı, Savitzky-Golay metodunu baz alan test verisinden olan gürültüyü ortadan kaldırmak için bir yumuşatma tekniği sunmaktadır. Test verisinin baskın eğilimine etki etmeksizin gürültü seviyesinin azaltılabilmesi için, bu fikir, çevredeki veri noktalarının lokal bir ortalaması tarafından her bir noktasının yerini almak içindir. Uygulamada bir kübik polinomial, bu noktanın yakın sağ ve solu için her bir veri noktası i ve n veri noktaları tarafından uydurulmaktadır. En küçük kareler yöntemi, bu $2n+1$ noktaları tarafından polinomiali uydurmak için kullanılmaktadır. Veri noktası i nin değeri, aynı pozisyonda polinomialin değeri ile yer değiştirmekte ve her bir polinomial, bir polinomialin, çoğul noktaları ayarlamak için kullanıldığı yerdeki eğrinin yakın son noktaları hariç bir veri noktasını ayarlamak için kullanılmaktadır. Çünkü, birinci ve sonuncu birkaç nokta, veri noktaları topluluğunu uydurma merkezi olamaz. Verinin aynı sonuçları ortaya koymasıyla iki ardışık ilerlemeye kadar, bütün veri noktaları için, bu işleme defalarca başvurulmaktadır.

Varsayılan, test verisi yumuşatılmamakta, şayet yumuşatma belirtilmişse, varsayılan değer $n=3$ tür. Alternatif olarak, uyan en küçük kareler polinomialinin içerisinde hareketli penceredeki bir veri noktasının sağ ve solu için veri noktalarının numarasını belirleyebilmekteyiz.

4.14. Deneysel Veriye Karşı Malzeme Davranış Model Tahmini

Birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi belirlendiği zaman, kullandığımız analiz programında, hiperelastik model davranışı kurulmaktadır. Bununla birlikte, bu davranışın kalitesi tayin edilmiş olmalı, farklı deformasyon modları altında malzeme davranış tahmini, deneysel veriye karşı kıyaslanmış olmalıdır. Analiz programı tarafından belirlenen birim şekil değiştirme potansiyel enerjisinin kabul edilir olup olmadığını, analiz programı tahminleri ve deneysel veri arasındaki ilişki baz alınarak yargılanmalıdır. Analiz programının CAE bölümünde hiperelastik davranış otomatik

olarak değerlendirilebilmektedir. Alternatif olarak, tek eleman test durumları, malzeme modelinin nominal gerilme-nominal birim şekil değiştirme yanıtını türetmek için kullanılabilir.

4.15. Hiperelastik Malzeme Dengesi

Deneysel veri için uygun kalite yargılamasında önemli bir faktör, malzeme kavramı yada Drucker dengesidir. Yukarıda tanımlı ilk üç deformasyon modu için malzemenin Drucker dengesi, Analiz programı tarafından denetlenmektedir.

Sıkıştırılmaz bir malzeme için Drucker denge koşulu şunu ister, gerilimde, $d\sigma$,değişiklik, aşağıda logaritmik birim şekil değiştirmede herhangi çok küçük değişiklik, $d\varepsilon$,eşitsizliği tamamlama

$$d\sigma : d\varepsilon > 0 \quad (4.77)$$

$$d\sigma = D : d\varepsilon \quad (4.78)$$

i kullanarak, D , teğet (tanjant) malzeme sertliğidir, eşitsizlik şöyle oluyor ;

$$d\varepsilon : D : d\varepsilon > 0 \quad (4.79)$$

böylece teğetsel malzeme sertliğinin, pozitif-tanımlı olması için gerekmektedir.

İzotropik elastik formülasyon için, eşitsizlik, başlıca gerilme-birim şekil değiştirme terimlerinde gösterilir;

$$d\sigma_1 d\varepsilon_1 + d\sigma_2 d\varepsilon_2 + d\sigma_3 d\varepsilon_3 > 0 \quad (4.80)$$

önce olduğu gibi, malzemenin sıkıştırılmaz olduğu varsayıldığında, biz hidrostatik basınç için, birim şekil değiştirmeleri etkilemeksizin herhangi bir değer

seçebilmekteyiz. Denge hesabı için uygun bir seçim $\sigma_3 = d\sigma_3 = 0$ dır, bu yukarıdaki denklemde üçüncü terimi ihmal etmemize izin vermektedir.

Birim şekil değiştirme ve gerilme arasındaki değişikliklerin ilişkisi, matrix formunda elde edilebilmektedir;

$$\begin{pmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \end{pmatrix} \quad (4.81)$$

$$D_{ij} = D_{ij}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (4.82)$$

Malzeme dengesi için D , pozitif-tanımlı olmalı; böylece, şu gereklidir,

$$D_{11} + D_{22} > 0 \quad (4.83)$$

$$D_{11}D_{22} - D_{12}D_{21} > 0 \quad (4.84)$$

Bu denge kontrolü, Polinomial modeller, Ogden potensiyel, Van der Waals formu ve Marlow formu için uygulanmaktadır. Arruda-Boyce formu, (μ, λ_m) nin pozitif değerleri için daima dengelenmiştir; bu yüzden, dengeyi garanti altına almak için malzeme katsayılarını denetlemek yeterlidir.

Polinomial modeller, yada Ogden formu için (μ_i, α_i) yada C_{ij} tanımlarken dikkatli olunmalıdır: özellikle $N > 1$ olduğu zaman, daha yüksek birim şekil değiştirmelerdeki davranış, (μ_i, α_i) yada C_{ij} değerleri için kuvvetlice hassastır ve şayet bu değerler düzenli tanımlanmazsa, kararsız malzeme davranışı sonucu verebilme ihtimali vardır. Katsayılardan birkaçı kuvvetlice negatif olduğu zaman, daha yüksek birim şekil değiştirme seviyelerde kararsızlık meydana gelmesi muhtemeldir.

Analiz programı, altı farklı yükleme formu (tek eksenli çekme ve basma, eş iki eksenli çekme ve basma, ve düzlemsel çekme ve basma) için, $0,1 \leq \lambda_1 \leq 10,0$

(nominal birim şekil değiştirme $-0,9 \leq \epsilon_1 \leq 9,0$ aralığı) için $\Delta\lambda_1 = 0,01$ aralıklarında, malzemenin dengesi üzerinde bir denetim uygulamaktadır. Şayet bir kararsızlık bulunursa, analiz programı bir uyarı mesajı yayınlamakta ve kararsızlık gözlemlenen ϵ_1 in en düşük mutlak değerini yazmaktadır. İdeal olanı, kararsızlık meydana gelmemesidir. Şayet, birim şekil değiştirme seviyelerinde kararsızlık gözlemlenirse, ki bunun analizde meydana gelmesi muhtemeldir, malzeme modelini değiştirmek yada dikkatlice gözden geçirmek ve malzeme girdi verisini yeniden düzenlemek kesinlikle tavsiye edilmektedir.

4.16. Uygun Test Verisinin Dengesi ve Doğruluğunu Geliştirmek

Ne yazık ki, deneysel veri için modellerin ön uygunluğu umulduğu gibi ortaya çıkmadığı olabilmektedir. Bu, özellikle en genel polinomial model ve Ogden model gibi modeller için doğrudur. Daha basit modellerden bir kaçını için, aşağıdaki birkaç basit kural tarafından denge güveni verilmektedir;

- 1) Ön kayma modülü, μ , nün pozitif değerleri ve kilit uzama, λ_m , için, Arruda-Boyce formu daima dengelenmiştir.
- 2) C_{10} katsayısının pozitif değerleri için, neo-Hookean formu daima dengelenmiştir.
- 3) Ön kayma modülü, μ , nün verilen pozitif değerleri ve kilit uzama, λ_m , Van der Waals modelinin dengesi, bütünsel etkileşim parametresi, α , ne bağlıdır.
- 4) Şayet bütün $C_{i0} > 0$ ise Yeoh modeli için denge güveni verilmektedir. Tipik olarak, bununla birlikte, C_{20} negatif olacaktır, çünkü bu, gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin S-şekli özelliğini yakalamaya yardım etmektedir. Böylece, mutlak C_{20} değerini azaltma yada mutlak C_{10} değerini büyütme, Yeoh modelini daha dengelenmiş yapmak için yardım edecektir.

Bütün durumlarda aşağıdaki öneriler kalite uygunluğunu ilerletebilmektedir:

- 1) Çekme ve sıkıştırma verisi sağlanmalıdır; sıkıştırma gerilmeleri ve birim şekil değiştirmeleri negatif değerler olarak girilmelidir. Uygulamalara bağlı sıkıştırma ve çekme verisi kullanılmalıdır, tek bir malzeme modelini çekme ve sıkıştırma verisi için tam olarak uydurmak zordur.
- 2) Her zaman, bilinmeyen katsayılardan çok daha fazla deneysel veri noktaları kullanılmalıdır.
- 3) Şayet $N \geq 3$ kullanılırsa, deneysel veri en az %100 çekme birim şekil değiştirme yada %50 sıkıştırma birim şekil değiştirme için uygun olmalıdır.
- 4) Testlerin farklı çeşitleri uygulanmalıdır (mesela, basma ve basit kayma testleri). Bir deformasyon modu için uygun malzeme davranışı, modu karakterize etmek için test verisi istemektedir.
- 5) Malzeme kararsızlığı hakkında uyarı mesajları yada test verisini uydurmada yakınsama eksikliği hakkında hata mesajları kontrol edilmelidir. Bu kontrol özellikle yeni test verisi için önemlidir; Analiz girdi dosyası işlemcisi aracılığıyla malzeme dengesini denetlemek için, basit bir sonlu eleman modeli yeni test verisiyle çalıştırılabilmektedir.
- 6) Deneysel veri ile farklı birim şekil değiştirme potansiyel enerjileri için yanıt eğrilerini karşılaştırmak için Analiz programının CAE bölümünde malzeme değerlendirme kapasitesi kullanılmalıdır. Alternatif olarak, deneysel veri ve Analiz sonuçlarını ölçüştürmek ve basit deformasyon modları için tek-eleman simülasyonları uygulanabilmektedir. Analiz programının CAE bölümünün Visualization modülündeki X-Y çizim seçenekleri, bu karşılaştırma için kullanılabilir.
- 7) Şayet büyük şekil değiştirmeler tahmin edilirse, çok küçük birim şekil değiştirmelerde birkaç veri noktası silinmelidir. Düşük birim şekil değiştirme noktalarının uymayan bir değeri gereksiz olarak, düşük birim şekil değiştirme aralığına doğru uygunluğun doğruluğunu etkileyebilir ve büyük şekil değiştirme aralığında daha büyük hatalara sebep verebilmektedir.
- 8) Şayet umulan ara derece birim şekil değiştirmeler için küçükse, en yüksek birim şekil değiştirmelerde birkaç veri noktası silinmelidir. Yüksek birim şekil değiştirme noktaları uydurmayı ve/veya düşük birim şekil değiştirme aralığındaki dengeyi, kesinliğini kaybetmesi için zorlayabilmektedir.

- 9) Bütün birim şekil değiştirme aralığı boyunca benzer doğruluklarla sonuçlanacak olan, beklenen birim şekil değiştirme aralığından daha yüksek tarafsızca ayrılmış birim şekil değiştirme aralıklarından veri noktaları seçilmelidir.
- 10) N sırası ne kadar yüksek olursa, o kadar çok salınım meydana gelmesi muhtemeldir, gerilim birim şekil değiştirme eğrilerinde kararsızlıklara yol açmaktadır. Şayet genel polynomial model kullanılırsa, N sırası 2 den 1 e daha düşüktür(Ogden için 3den 2 ye), özellikle maksimum birim şekil değiştirme seviyesi düşükse (%100 den daha düşük birim şekil değiştirme diye söylenmelidir).
- 11) Şayet test verisinin çoklu tipleri kullanılırsa ve uydurma hala başarısızlıkla ortaya çıkıyorsa, test verisinin bir kaçı muhtemelen deneysel hatalar içeriyor demektir. Yeni testlere ihtiyaç duyulabilmektedir. Hangi test verisinin hatalı olduğunu belirlemenin bir yolu, malzemenin ön kayma modülü, μ_0^{test} , ilk ayarlamasıdır. Sonra Analiz programında, test verisinin her bir tipi ayrı olarak uydurulmalı ve aşağıdaki ilişkileri kullanarak malzeme sabitlerinden kayma modülü, μ_0^{fit} , hesaplanmalıdır.

$$\mu_0^{fit} = 2(C_{10} + C_{01}) \text{ (polinomiyal form) yada } \mu_0^{fit} = \sum_{i=1}^N \mu_i \text{ (Ogden formu).}$$

Alternatif olarak, ön Young modülü, E_0^{test} , ayarlanabilmekte ve kıyaslanabilmektedir.

$$E_0^{fit} = 6(C_{10} + C_{01}) \text{ (polinomiyal form) yada } E_0^{fit} = 3 \sum_{i=1}^N \mu_i \text{ (Ogden formu) .}$$

μ_0^{fit} yada E_0^{fit} değerleri, hatalı test verisinin göstergesi olan μ_0^{test} yada E_0^{test} den çok farklıdır.

4.17. Elemanlar

Hiperelastik malzeme modeli, katı (kontinyum-uzay zaman süreklisi) elemanlarla, sonlu-birim şekil değiştirme kabukları (S4 hariç), kontinyum kabuklar, ince zarlar ve tek boyutlu elemanlar (kafes krişler ve inşaat demirleri (nervürlü çelik)) kullanılabilir. Analiz programının Standard bölümünde hiperelastik malzeme modeli bir de Timoshenko kirişleri (B21, B22, B31, B31OS, B32, B32OS, PIPE21, PIPE22, PIPE31, PIPE32 ve onların “hibrit” eşdeğerleri) ile kullanılabilir. Euler-Bernoulli kirişleri (B23, B23H, B33 ve B33H) ve küçük-birim şekil değiştirme kabukları (STRI3, STRI65, S4R5, S8R, S8R5, S9R5) ile kullanılmamalıdır.

4.18. Analiz programının Standard bölümünde Hibrit’e Karşı Saf Yer Değiştirme Formülasyonu

Analiz programının Standard bölümünde, kontinyum elemanlar için, Hiperelastisite, saf yer değiştirme formülasyon elemanları yada “hibrit” (karışık formülasyon) elemanlarıyla kullanılabilir. Elastomerik malzemeler genellikle neredeyse sıkıştırılmazdır, bu sebeple, tümüyle bütünleşmiş saf yer değiştirme yöntemi elemanlarının, düzlemsel gerilme durumları hariç, bu malzemeyle kullanılması tavsiye edilmez. Şayet tümüyle yada seçici azaltılmış-tamamlama yer değiştirme yöntemi elemanları, bu malzeme modelinin neredeyse sıkıştırılmaz formu ile kullanılabilir. Bu malzeme modeli, düzlemsel gerilme analizi dışında herhangi bir şeyde sıkıştırılmazlığı sınırlamaya maruz bırakmak için kullanılan bir penaltı metodudur. Penaltı metodu bazen sayısal sorunlara sebep olur; bundan dolayı, tümüyle yada seçici azaltılmış-tamamlama “hibrit” formülasyon elemanlarının, hiperelastik malzeme ile kullanılması tavsiye edilmektedir.

Genelde, tek hibrit eleman kullanan bir analizin, düzenli bir yer değiştirme-temel eleman kullanan bir analizden, hesaplama maliyeti biraz daha fazladır. Bununla birlikte, dalga yüzü optimize edildiği zaman, lagranj çarpanları, elemanla ilgili bağımsızlığın düzenli derecelerinden ayrı olarak düzenlenemeyebilir, böylece, ikinci-sıra hibrit tetrahedra nın çok büyük bir ağının dalga yüzü, ikinci-sıra hibrit tetrahedra

kullanan bir eş değer ağın dalga yüzünden, önemli derecede daha geniş olabilmektedir. Bu, önemli daha yüksek CPU maliyetlerine, disk alanına ve hafıza ihtiyaçlarına sebep olabilmektedir.

4.19. Analiz Programının Standart Bölümünde Birbirine Zıt Mod Elemanlar

Birbirine zıt mod elemanlar, büyük birim şekil değiştirmeleri içeren uygulamalarda uyarı ile kullanılmalıdır. Yakınsama yavaş olabilmekte ve hiperelastik uygulamalarda hatalar birikebilmektedir. Hatalı gerilmeler bazen, birbirine zıt mod hiperelastik elemanlarda (bir karışık deformasyon geçmişi ile karşı karşıya getirildikten sonra yükü boşaltılan) ortaya çıkabilmektedir [37].

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneyisel çalışmalarda kullanılan donanım ve yazılımlar, bunlara ait teknik özellikler Tablo 5.1’de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 5.1. Deneyleerde kullanılan ekipmanların teknik özellikleri

| Kullanılan Malzeme, Makine ve Programlar | Tedarik Edildiği Firma | Ticari Adı ve Teknik özellikleri |
|--|---|---|
| NR (Doğal Kauçuk) | Eral protec A.Ş. İSTANBUL | NR RSS 3 Yoğunluğu : 0,93 g/cm ³ |
| SBR (Stiren Butadien Kauçuk) | Petkim A.Ş. İZMİR | SBR 1502 Yoğunluğu : 0,94 g/cm ³ |
| Cam Küre Dolgu Maddesi | Kaltun Madencilik A.Ş. AYDIN / Çine | Quartz-75 Ergime Sıcaklığı : 1785 °C Yoğunluğu : 2,65 |
| Mika Tozu Dolgu Maddesi | Kaltun Madencilik A.Ş. AYDIN / Çine | Mica SMW 375 Yoğunluğu : 2,7 g/cm ³ |
| Wollastonit Dolgu Maddesi | Esan Endüstriyel Hammaddeler A.Ş. | FW 325 Yoğunluğu : 2,94 g/cm ³ |
| Karbon Siyahı Dolgu Maddesi | Petkim A.Ş. İZMİR | HAF N330 Yoğunluğu : 1,7 g/cm ³ |
| Çekme Cihazı | Testometric micro 350 Materials Testing Machines/ İNGİLTERE | PCX serisi Yük birimi : kgf Çekme hızı : 10 mm/sn. |
| Sonlu Elemanlar Analiz Programı (ABAQUS 6.7) | A-z tech İSTANBUL | Uzmanlık Alanı : Structural (Yapısal) Analiz |

5.1. NR/SBR Karışım Malzemesi

NR+SBR kauçuk karışımı kompozit bir malzemedir. Aynı formülasyona %5,15 - %9,4 - %13,4 - %17,2 oranlarında yani 250g. - 500g. - 750g. - 1000g. ayrı ayrı cam

küre, mika tozu ve wollastonit dolgu maddeleri ilave edilerek elastomer karışımları elde edilmiştir.

Karbon siyahı olarak, ince taneli ve hamur içerisinde üstün dağılma özelliğinden dolayı aşınma, sertlik, kopma dayanımı gibi mekaniksel özellikleri iyileştiren HAF N330 kullanılmıştır.

Proses kolaylaştırıcı ve yumuşatıcı olarak, hamurun iç yağlanmasını sağlayan % 5,1 oranında parafinik yağ kullanılmıştır.

Sertleştirici olarak silikasil, beyaz dolgular için asidik özelliği önleyen aktivatör olarak DEG (Dietilenglikol) ve vulkanizasyonu hızlandırmak için TH (Thiruum) katılmıştır.

Formüldeki katkı ve dolgular (kaolen dolgusu hariç) sabit tutularak, mika tozu, wollastonit ve cam küre dolguları için dörder farklı hamur hazırlanmıştır.

Formüldeki kauçuk ve dolgu oranları gruplandırılarak yüzde olarak Tablo 5.3.'te verilmiştir. 250 g dolgulu malzemeler CK1, MT1, W1 şeklinde, 500 g dolgulu malzemeler CK2, MT2, W2 şeklinde, 750 g dolgulu malzemeler CK3, MT3, W3 şeklinde, 1000 g dolgulu malzemeler CK4, MT4, W4 şeklinde gösterilmiştir.

Tablo 5.2. Deneylerde kullanılan dolguların teknik özellikleri ve ticari isimleri [16]

| Dolgu Malzemesi | Ticari Adı, Tedarik Yeri | Partikül Büyüklüğü (µm) | Yoğunluk (g/cm³) |
|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Cam küre (CK) | Quartz-75, Kaltun Madencilik | 28 | 2,65 |
| Mika tozu (MT) | Mica SMW 375, Kaltun Madencilik | 50 | 2,7 |
| Wollastonit (W) | FW 325, Esan Madencilik | 75 | 2,94 |

Tablo 5.3. Formülasyonlardaki kauçuk ve dolgu maddesi oranları[16]

| | W1,CK1,MT1 250 g | W2,CK2,MT2 500 g | W3,CK3,MT3 750 g | W4,CK4,MT4 1000 g |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | (%) | (%) | (%) | (%) |
| NR (%) | 11,2 | 10,2 | 10,2 | 9,7 |
| SBR (%) | 33,4 | 31,9 | 30,4 | 29,1 |
| NR+SBR (%) | 44,6 | 42,1 | 40,6 | 38,8 |
| İlave Dolgu Toplamı (%) | 5,15 | 9,4 | 13,4 | 17,2 |
| Toplam Dolgu Toplamı (%) | 48,33 | 50,6 | 52,7 | 54,6 |

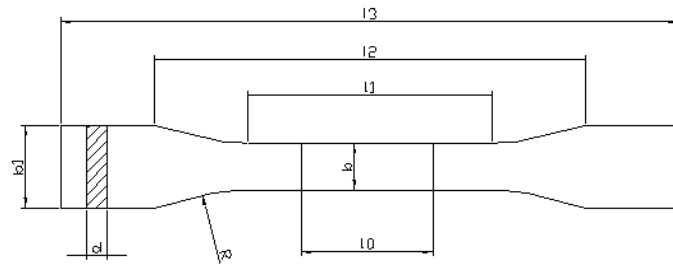
5.2. Çekme Deneyinin Yapılışı

Kauçuk, bir yük uygulandığında hacim değişmesinden daha çok, şekli değişen sıkıştırılmaz bir maddedir. Metallerden farklı olarak, Gerilme-Uzama eğrisi Hooke Kanunu'na uymamaktadır. Yaklaşık %15 oranındaki uzamalar için lineer olan kısımdan Young modülünü hesaplamak mümkündür. Fakat pratikte kauçuk parçalar çok daha büyük şekil değiştirme oranına maruz kaldığından, Young modülü karakteristik bir büyüklük olarak kullanılmaz [1].

Kauçuk türü malzemeler için gerçekleştirilen en yaygın deformasyon türü tek eksenli çekme deneyidir. Tek eksenli çekme deneyi hariç diğer deneyler için standartlaştırılmış numune boyutu ve çekme hızı yoktur [4].

Çekme deneylerinde kauçuk türü malzemeler için genellikle Papyon numune olarak adlandırılan numune kullanılmaktadır (Şekil 5.1) [13].

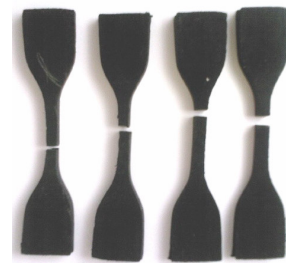
Çekme deneyi, malzemelerin statik (darbesiz) yük altındaki mukavemet özelliklerini saptamak ve malzemelerin özelliklerine göre sınıflandırılmasını sağlamak amacıyla uygulanan, mühendislik açısından çok önemli bir mekanik deneydir.



Şekil 5.1. TS 1398-2 Standart papyon deney numunesi

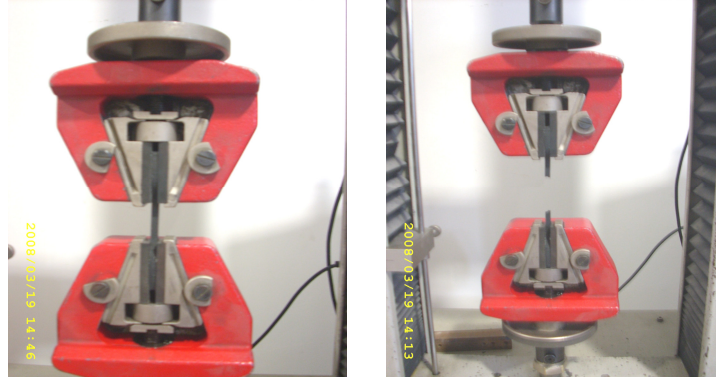
TS 1398-2, ISO 527-2 standartlarına göre papyon şeklinde hazırlanmış çekme numuneleri 10 mm/sn. hızda çekme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 5.1).

Çekme deneyi sonucu elde edilen uzama - gerilme grafiklerinden, gerçek gerilme, gerçek birim şekil değiştirme, nominal gerilme ve birim şekil değiştirme, yüzde uzama değerleri hesaplanmış ve bu değerler Abaqus 6.7.1. analiz programında malzeme karakteristiklerini bulmak için kullanılmıştır.



Şekil 5.2. a) Testometric micro 350 PCX çekme test cihazı ve bilgisayar donanımı b) Çekilmiş TS 1398-2 Standart Test Numuneleri

Çekme deneyi, Adapazarı Federal Elektrik A.Ş. de yapılmıştır. Kullanılan test cihazı Testometric micro 350 Materials Testing Machines PCX serisi, İngiltere’de Testometric firması tarafından üretilmiştir. Yük birimi kgf dir, cihaz tek başına veya MC Universal Software paket programı ile birlikte çalışacak biçimde tasarlanmıştır.



Şekil 5.3. Çekme metal ağızlar

Standartlara uygun olarak hazırlanmış NR/SBR malzemesinin çekme numuneleri, Şekil 5.2, 5.3'te görüldüğü gibi bu cihazda teste tabi tutulmuştur.

20°C oda sıcaklığında, yeterli sayıdaki numuneler test edildikten sonra yazdırma modu seçilerek sonuçların çıktısı, cihaza bağlı olan bilgisayardan alınmıştır.

5.3. Çekme Deneyi Sonucu Hesaplanan Değerler

a) Nominal gerilim direncinin hesaplanması;

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0} \quad (5.1)$$

σ_n = Nominal gerilim direnci

A_0 = İlk kesit alanı

F = Yük

b) Nominal uzamanın hesaplanması;

$$e = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (5.2)$$

e = Nominal uzama

L_1 = Numunenin son uzunluğu

L_0 = Numunenin ilk uzunluğu

c) Gerçek gerilim direnci (kesit alanındaki değişim dikkate alınarak hesaplanan gerilim direnci) nin hesaplanması;

$$\sigma_g = \sigma_n (1 + e) \quad (5.3)$$

σ_g = gerçek gerilim direnci

d) Gerçek uzamanın hesaplanması;

$$\mathcal{E} = \ln(1 + e) \quad (5.4)$$

\mathcal{E} = gerçek uzama

e) % uzama = $e \times 100$

5.4. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Davranışın Modellenmesi

Sonlu elemanlar yöntemi, sürekli bir sistemi problemin karakterine uygun sonlu elemanlara ayırarak elde edilen elemanlar üzerinde iç ve dış kuvvetlerin enerjisinin minimizasyonu ve sonra bu elemanların birleştirilmesi tarzında bir uygulama getirir. Bunun sonucu olarak mesnet şartları, sisteme ait özellikler dış yüklerin sürekli ya da ani değişimleri kolayca göz önüne alınabilir. Dolayısıyla sonlu elemanlar yöntemi

analitik metotlarla çözülemeyen karışık problemlere uygulanabilir. Yüzeysel sistemin tipik bölgelerinde eleman boyutları küçültülerek o bölgenin daha iyi incelenmesi mümkün olur. Diğer bir avantajı da sınır şartlarının problemin çözüm sırasına göre en son adımda probleme dahil edilmesidir. Böylelikle çeşitli sınır şartlarını probleme uygularken baştaki yoğun hesaplara girilmemektedir.

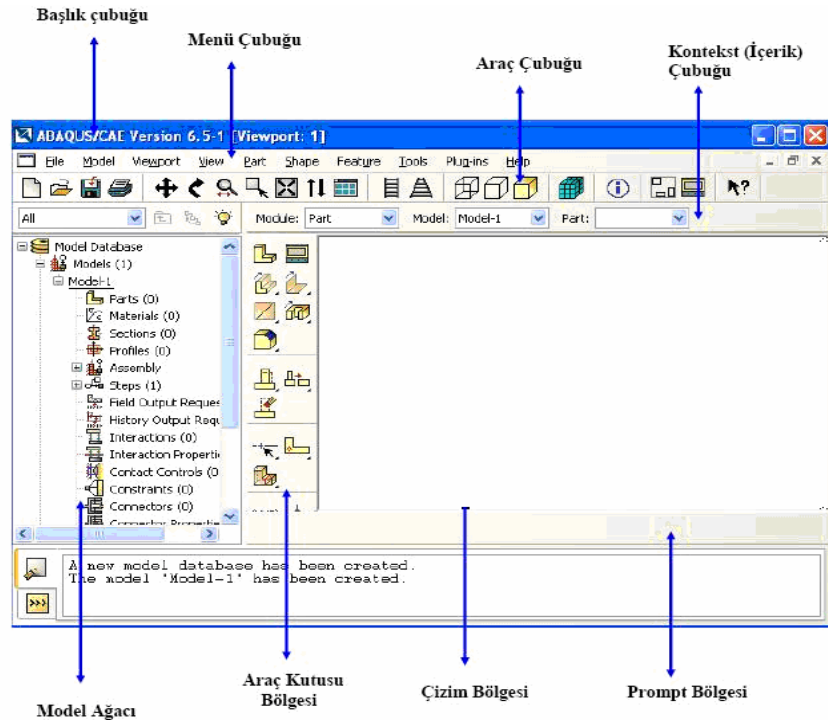
Sonlu elemanlar metodunda sistem sonlu sayıda elemana ayrılmaktadır. Elemanlar boyutları küçüldükçe problemin hata oranı azalmakta, fakat çözüm süresi uzamaktadır. Sistemi oluşturan elemanların her birine sonlu eleman denir ve birleştikleri köşe noktaları da düğüm noktaları olarak adlandırılır. Sonlu eleman yüzeyinin şekil değiştirmesi, düğüm noktalarının deplasman parametrelerine bağlı olarak ifade edilebilir. Deplasman parametreleri, deplasman bileşenleri, dönmeler ve burulma eğriliği gibi deplasman vektörlerini içermektedir. Eğilme hesaplarında düğüm noktalarının, deplasman parametrelerinin belirlenmesi, sistemin deplasman yüzeyinin ve her düğüm noktasındaki kesit tesirlerinin bulunması için yeterlidir. Kararlılık hesabında ise, bu deplasman parametrelerine göre kurulan denklem takımının (Δ) katsayılar determinantını sıfır yapan yük yani kritik yük tayin edilir. Dinamik hesapta ise frekans determinantını sıfır yaparak özel açısal frekans ve mod şekilleri hesaplanır [38].

Günümüzde sanayide, uçak sektörü ve otomotivde en yaygın kullanılan sonlu eleman analiz programları Ansys, Abaqus ve Nastran/Patran'dır. Abaqus yazılımı ise windows tabanında rahat çalışması ve yapısal analizlerde gerçeğe yakın sonuçlar vermesiyle dikkat çekmektedir.

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapan Abaqus 6.7.1. analiz programı kullanılmıştır.

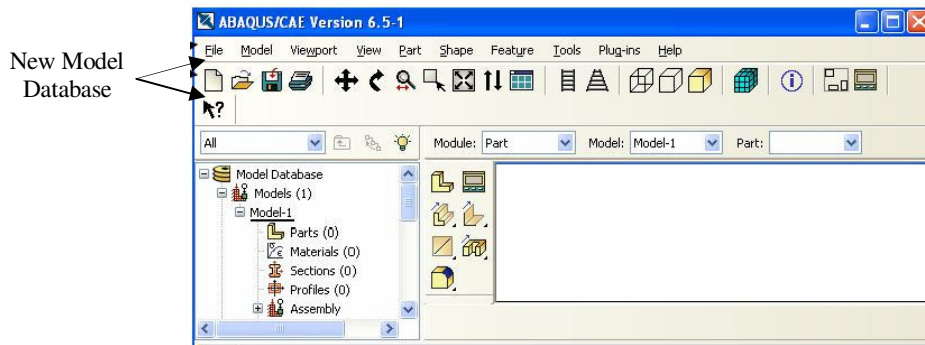
Programın ilk aşamasında numune modellenir. Üç boyutlu numunenin malzeme değerleri girilir (elastiklik modülü vs.). Sınır koşulları, kuvvetler belirlendikten sonra mesh kısmına geçilir. Numune basit bir şekle sahipse (dikdörtgen prizma) program tarafından otomatik olarak parçalara ayrılır. Karmaşık bir şekle sahip ise kullanıcının müdahalesiyle daha küçük parçalara bölünerek basit parçalara ayrılır.

5.4.1. Abaqus'te çekme numunesinin modellenmesi



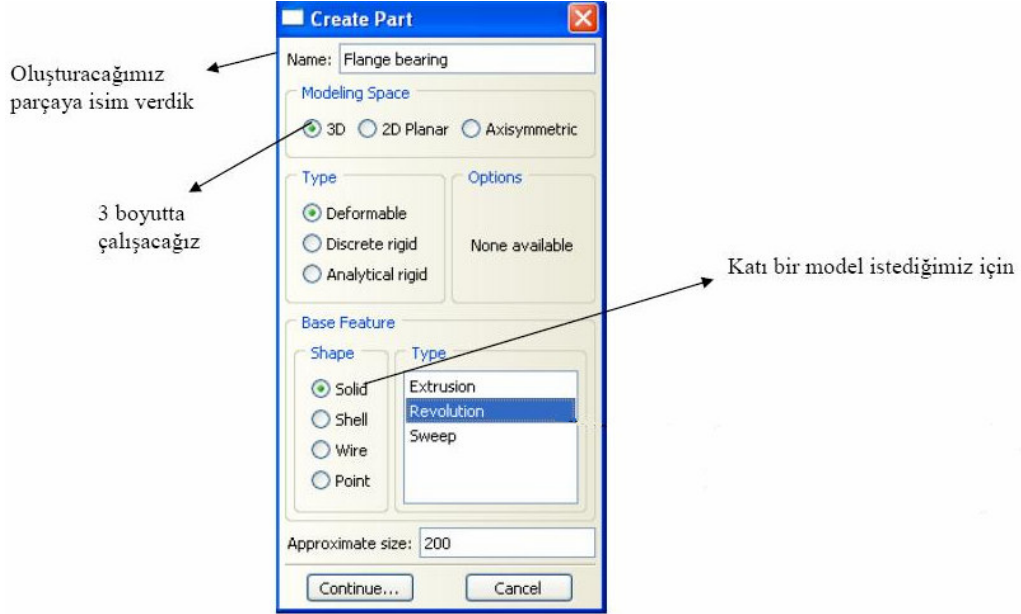
Şekil 5.4. Abaqus'ün ana penceresinin bileşenleri

Yeni bir veritabanı oluşturabilmek için New Model Database butonu ya da File => New yolu izlenmektedir (Şekil 5.5).



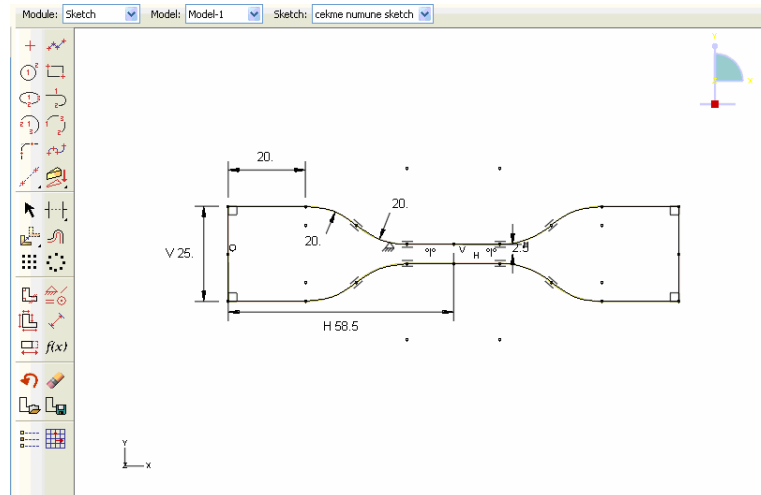
Şekil 5.5. Yeni veri tabanı oluşturma

Parça oluşturmak için Create Part iletişim penceresine üst menüden Part => Create yolu izlenerek ulaşılabilmektedir (Şekil 5.6).

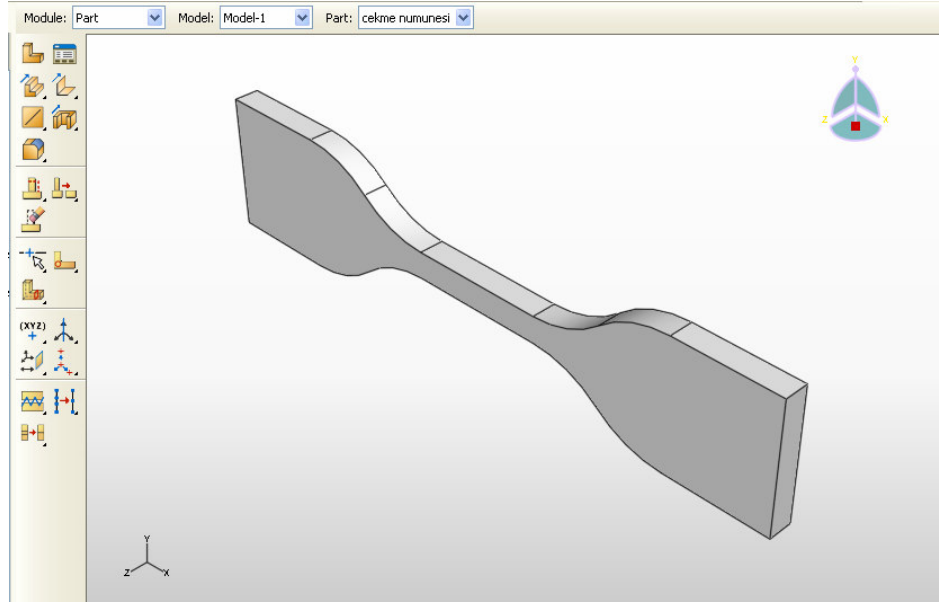


Şekil 5.6. Parça oluşturma

Numune gerçek ölçülerinde Sketch modülünde çizilip, Done butonuna basılıp kalınlık değeri girildiğinde parça hazır hale gelmektedir (Şekil 5.7, Şekil 5.18).



Şekil 5.7. Numunenin 2 boyutlu çizimi



Şekil 5.8. Numunenin 3 boyutlu modeli

Çalıştığımız malzeme, hiperelastik bir malzemedir. Yani, büyük birim şekil değiştirmelere, ani elastik tepki gösteren malzemelerdir. İzotropik (her tarafı aynı özellikleri gösteren) özelliğe sahiptir. Modelimiz homojen kabul edilmiştir.

Abaqus'te mevcut formlar vardır;

1. Arruda-Boyce formu
2. Marlow formu
3. Mooney-Rivlin formu
4. Neo-Hookean formu
5. Ogden formu
6. Polynomial formu
7. Reduced polynomial formu
8. Yeoh formu
9. Van der Waals formu

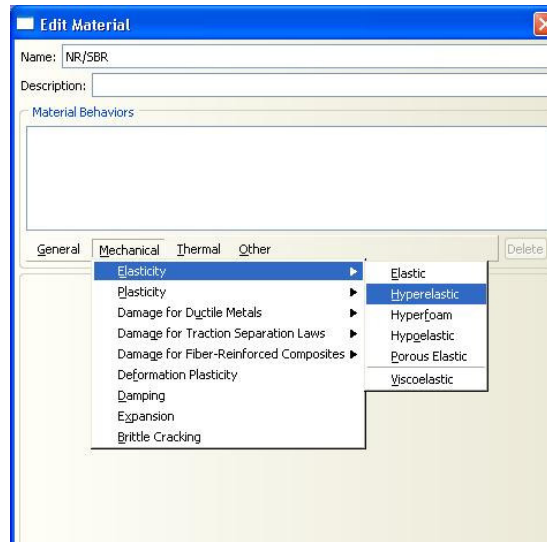
Malzememize uygun olan Marlow formudur. Yalnızca bir test veri seti (tek eksenli, eş iki eksenli ya da düzlemsel test verisi) mevcut olduğu zaman, kullandığımız analiz programında Marlow formu kullanılmaktadır. Literatürde bu formun kullanılması

tavsiye edilmektedir. Bunun yanında seçtiğimiz modelin uygunluğu Material Manager => Evaluate den de test edilebilmektedir.

5.4.2. Abaqus evaluate material malzeme form seçimi

Kullandığımız analiz programının bu bölümünde, özellikleri tanımlanan malzemeye uygun form seçimi için, malzeme değerlendirmeye tabi tutulmuştur.

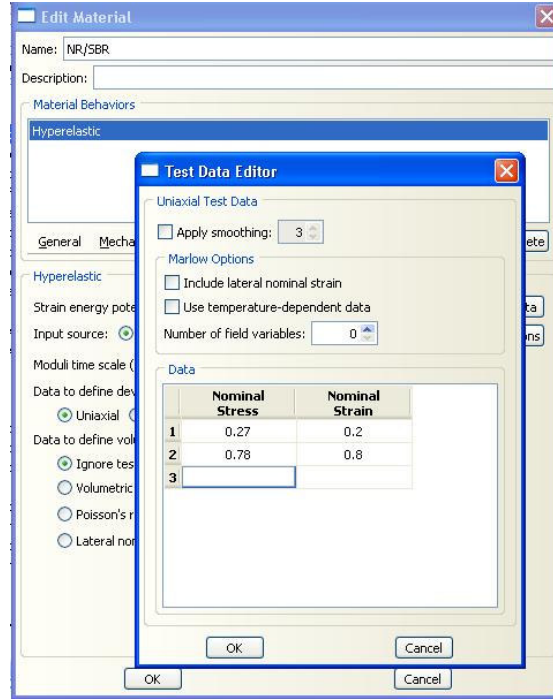
Malzemeyi tanımlamak için “Modül Property” ye gelinmiş ve “Create Material” komutu seçilmiştir. Ekranda Edit Material iletişim penceresi gözüktüğünde, burada malzeme ismi NR/SBR girilmiştir.



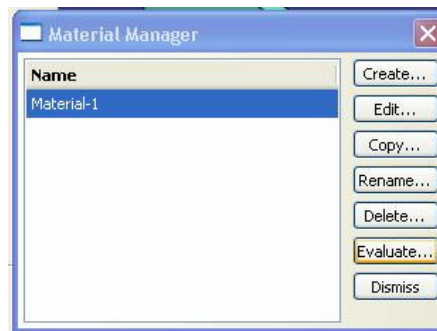
Şekil 5.9. Malzeme tanımlama

Mekanik deneylerden elde edilen verilerden hesaplanan değerler “Test data editor” den girilmiştir (Şekil 5.10).

Malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra Material Manager => Evaluate den uygun formu bulmak için malzeme test edilmiştir (Şekil 5.11).



Şekil 5.10. Malzeme özelliklerini girme

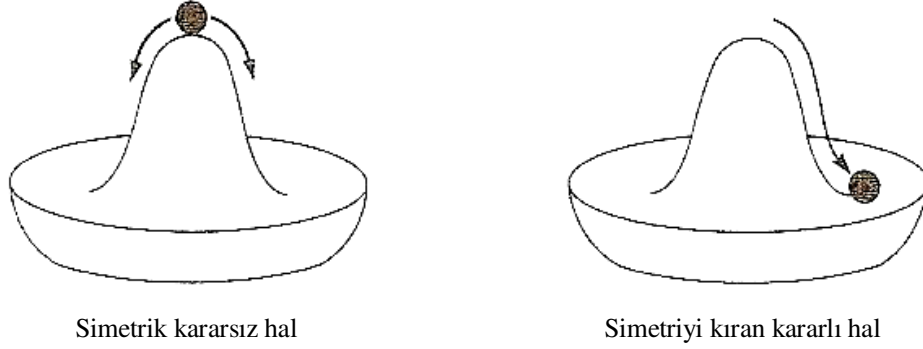


Şekil 5.11. Malzeme form seçimi testi

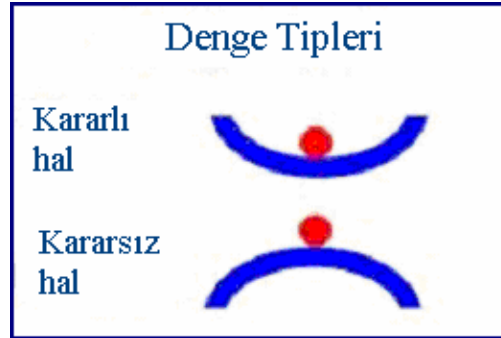
Değerlendirmeleri açıklamaya başlamadan önce, değerlendirme sonuçlarında sıkça geçen “stability” kavramı açıklanmalıdır.

İlk başlarda mekanik sistemlerin, otomobil ve uçakların kararlılığını belirtmek için kullanılan daha sonra bilgisayarların belirli bir performans değerinde çalışmasını da belirtmek için kullanılmaya başlanan kelime, kararlılık, bulunduğu durumu koruyabilme yeteneği manalarına gelmektedir.

Stabilite kavramı denilince akla ilk olarak simetrik Meksika şapkası ve top kıyaslaması gelmektedir. Şekil 5.12’de, kararlı hal (stable) ve kararsız hal (unstable) davranışlar resimlerle açıklanmıştır [39].



Şekil 5.12. Meksika şapkası – top kıyaslaması [39]

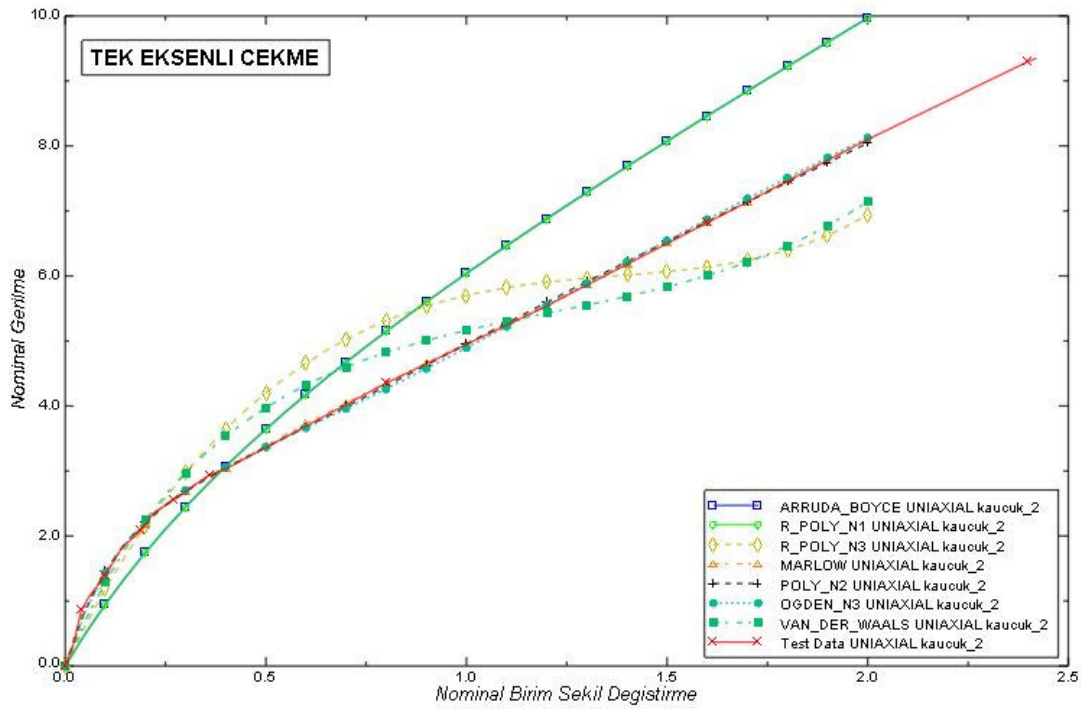


Şekil 5.13. Denge tipleri [40]

Kararlılıkta denge konumu bellidir. Bu konumun kararlı olup olmadığına bakılır (Şekil 5.13) [38].

5.4.3. Abaqus malzeme değerlendirme sonuçları

CK 250 için sonuçlar;



Şekil 5.14. CK 250 için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği

Yukarıda Şekil 5.14'te, CK 250 malzemelerinin tüm formlar için değerlendirme sonuçları görülmektedir.

Test verileri 2. dereceden polynomial'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.4).

Tablo 5.4. CK 250 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C10 | C11 | C20 | D1 | D2 |
|-------|------|-------|-------|------|----|----|
| 10,09 | 3,19 | -6,62 | -0,62 | 0,10 | 0 | 0 |

Bu model, tek eksenli çekme, eş iki eksenli basma, hacimsel çekme ve basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Ancak bu modelde bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli basma gerilmesinde, birim şekil değiştirme değeri -0,2439 dan küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,15 ten büyük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,39 dan büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,2806 dan daha küçük olması durumunda kararlı değildir.

Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 3. dereceden Ogden'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.5).

Tablo 5.5. CK 250 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar

| | μ_1 | α_1 | D1 |
|---|---------|------------|----|
| 1 | -11,87 | -1,34 | 0 |
| 2 | -1,25 | 2,51 | 0 |
| 3 | 19,69 | -3,30 | 0 |

Ogden modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 9,03 ten büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,2818 den küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,18 den büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada -0,6842 den küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,58 den büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,3671 den daha küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 1. dereceden Reduced Polynomial (Neo Hooke)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.6).

Tablo 5.6. CK 250 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C10 | D1 |
|-----|------|----|
| 0 | 1,72 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada

bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri 3. dereceden Reduced Polynomial (Yeoh)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.7).

Tablo 5.7. CK 250 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C03 | C10 | C11 | C12 | C20 | C21 | C30 | D1 | D2 | D3 |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-------|-----|----------------------|----|----|----|
| 0 | 0 | 0 | 2,17 | 0 | 0 | -0,16 | 0 | $8,98 \cdot 10^{-3}$ | 0 | 0 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri Arruda-Boyce'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.8).

Tablo 5.8. CK 250 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar

| μ | μ_0 | λ_m | D |
|-------|---------|-------------|---|
| 3,45 | 3,45 | 5806,42 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu form da, hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

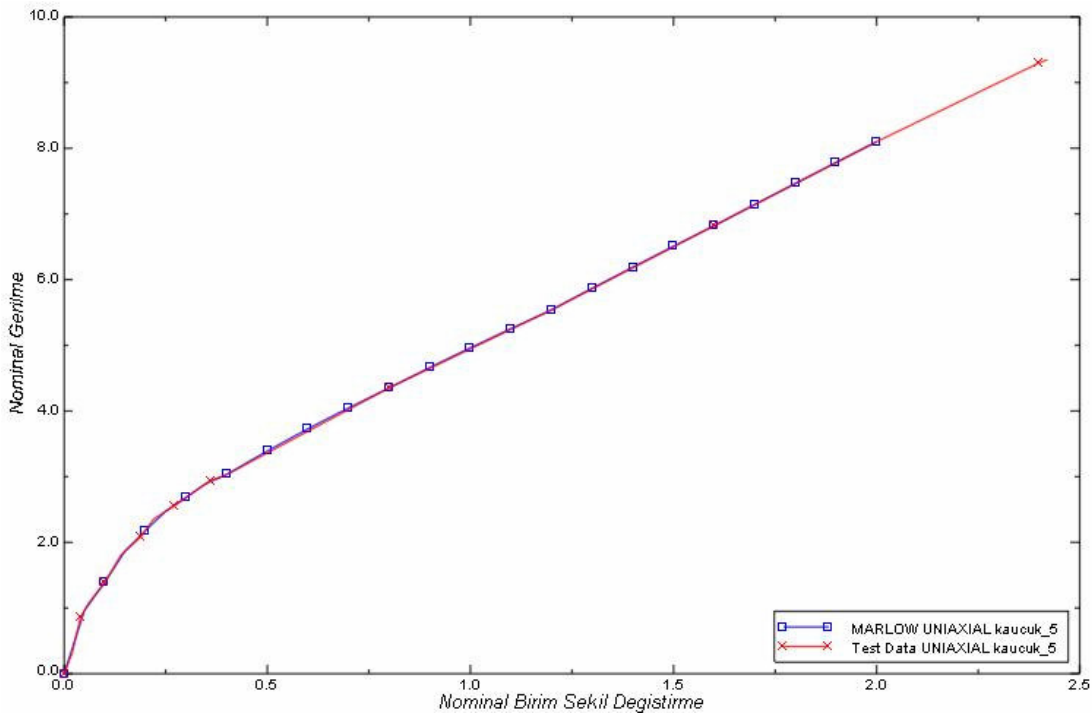
Test verileri Van Der Waals'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.9).

Tablo 5.9. CK 250 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar

| μ | λ_m | A | β | D |
|-------|-------------|------|---------|---|
| 4,98 | 5,83 | 0,74 | 0 | 0 |

Van Der Waals modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 4,81 den büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,9414 ten küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 3,13 den büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,5851 den küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 4,76 dan büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,8264 ten küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

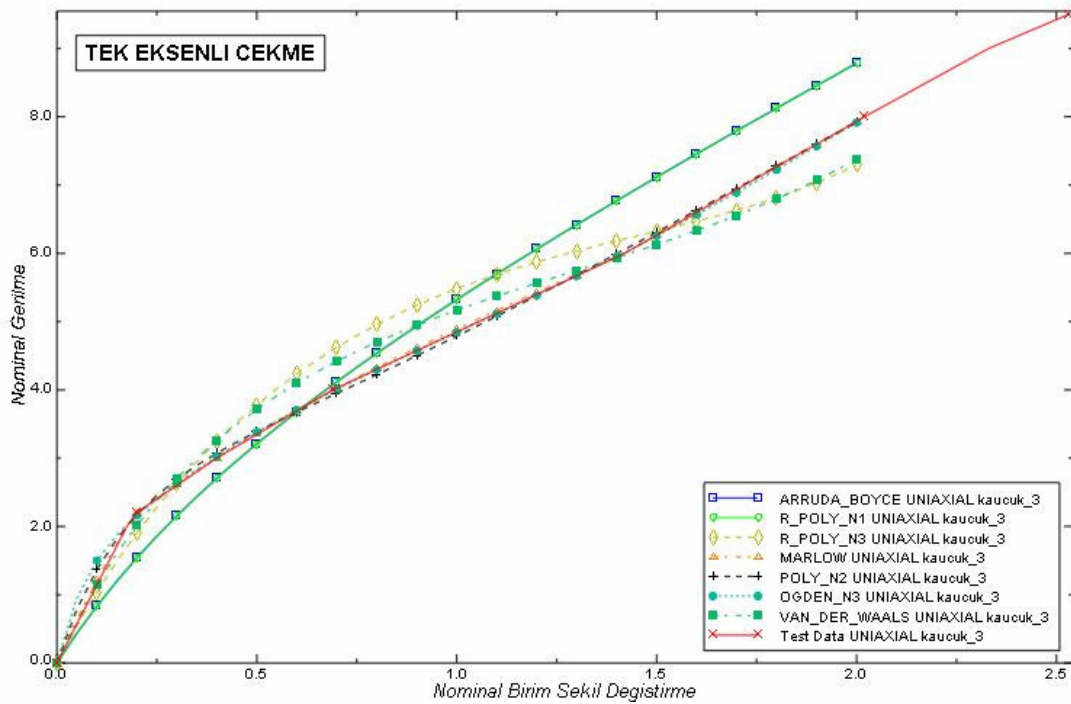
Test verileri Marlow'a uygulandığında aşağıdaki grafik elde edilmiştir (Şekil 5.15).



Şekil 5.15. CK 250 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Malzememize en uygun olan form Marlow formudur çünkü yalnızca bir test veri seti (tek eksenli, eş iki eksenli ya da düzlemsel test verisi) mevcut olduğu zaman, literatürde Marlow formunun kullanılması tavsiye edilmektedir [37].

CK 500 için sonuçlar;



Şekil 5.16. CK 500 için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği

Yukarıda Şekil 5.16'da, CK 500 malzemelerinin tüm formlar için değerlendirme sonuçları görülmektedir.

Test verileri 2. dereceden polynomial'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.10).

Tablo 5.10. CK 500 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C10 | C11 | C20 | D1 | D2 |
|------|------|-------|------|-------------------------|----|----|
| 6,44 | 1,02 | -3,41 | 0,19 | -3,87. 10 ⁻² | 0 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme ve basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için karardır. Ancak bu modelde bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede, birim şekil değiştirme değeri 4,94 ten büyük olması durumunda, tek eksenli basmada, birim şekil değiştirme değeri -0,36 dan küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,25 ten büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,5897 den küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,94 ten büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,4845 ten daha küçük olması durumunda karardır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 3. dereceden Ogden'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.11).

Tablo 5.11. CK 500 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar

| | μ_1 | α_1 | D1 |
|---|---------|------------|----|
| 1 | 3,35 | 1,06 | 0 |
| 2 | -5,20 | 7,29 | 0 |
| 3 | 10,47 | -14,58 | 0 |

Ogden modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için karardır olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 2,89 dan büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1266 dan küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,07 den büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada -0,4930 dan küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,14 ten büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1228 den daha

küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 1. dereceden Reduced Polynomial (Neo Hooke)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.12).

Tablo 5.12. CK 500 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C10 | D1 |
|-----|------|----|
| 0 | 1,52 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri 3. dereceden Reduced Polynomial (Yeoh)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.13).

Tablo 5.13. CK 500 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C03 | C10 | C11 | C12 | C20 | C21 | C30 | D1 | D2 | D3 |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----------------------|-----|----------------------|----|----|----|
| 0 | 0 | 0 | 1,90 | 0 | 0 | $-9,86 \cdot 10^{-2}$ | 0 | $5,08 \cdot 10^{-3}$ | 0 | 0 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri Arruda - Boyce'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.14).

Tablo 5.14. CK 500 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar

| μ | μ_0 | λ_m | D |
|-------|---------|-------------|----------|
| 3,04 | 3,04 | 7981,51 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için karardır. Yani bu form da, hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

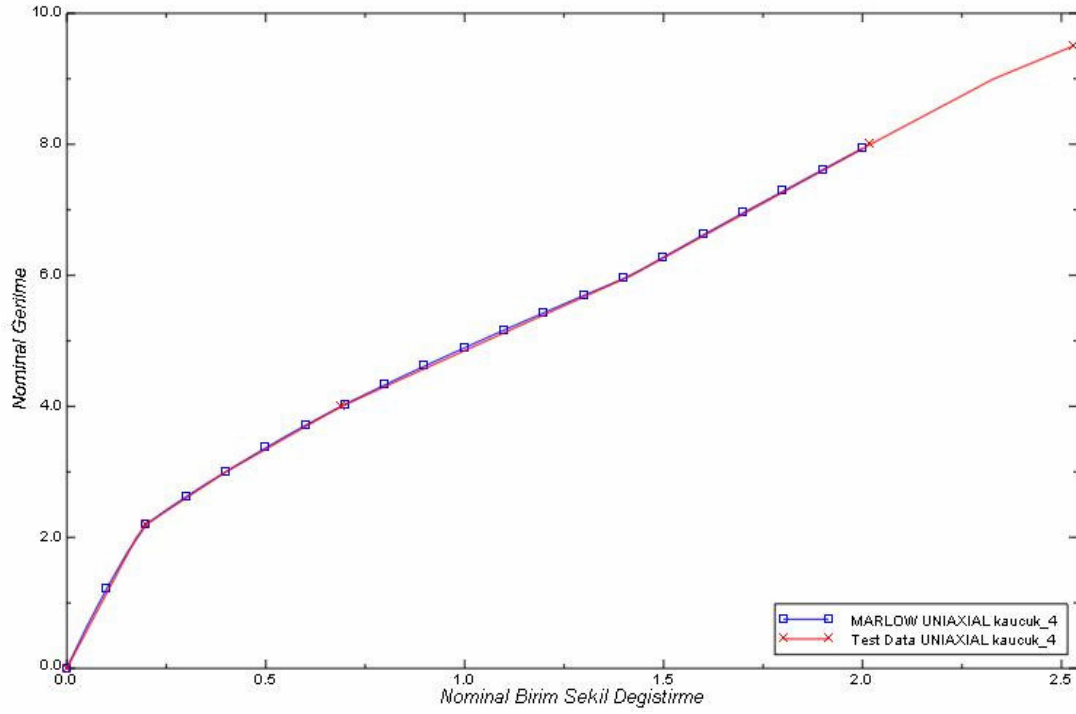
Test verileri Van Der Waals'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.15).

Tablo 5.15. CK 500 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar

| μ | λ_m | A | β | D |
|-------|-------------|----------|---------|----------|
| 4,36 | 6,40 | 0,62 | 0 | 0 |

Van Der Waals modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 5,39 dan büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,9515 ten küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 3,54 ten büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,6044 ten küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 5,33 ten büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,8420 den küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

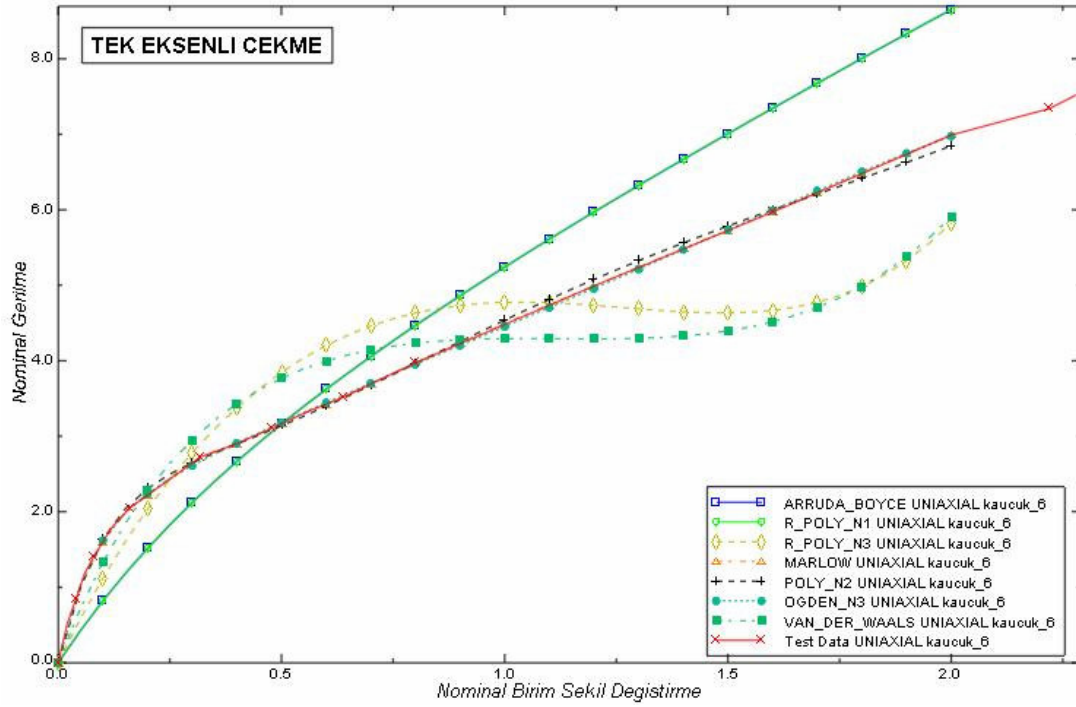
Test verileri Marlow'a uygulandığında aşağıdaki grafik elde edilmiştir (Şekil 5.17).



Şekil 5.17. CK 500 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değıştirme değeri için kararlıdır. Malzememize en uygun olan form Marlow formudur çünkü yalnızca bir test veri seti (tek eksenli, eş iki eksenli ya da düzlemsel test verisi) mevcut olduğu zaman, literatürde Marlow formunun kullanılması tavsiye edilmektedir [37].

CK 750 için sonuçlar;



Şekil 5.18. CK 750 için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği

Yukarıda Şekil 5.18'de, CK 750 malzemelerinin tüm formlar için değerlendirme sonuçları görülmektedir.

Test verileri 2. dereceden polynomial'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.16).

Tablo 5.16. CK 750 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C10 | C11 | C20 | D1 | D2 |
|-------|------|--------|-------|------|----|----|
| 15,83 | 6,16 | -11,63 | -1,72 | 0,29 | 0 | 0 |

Bu model, tek eksenli çekme, eş iki eksenli basma, hacimsel çekme ve basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Ancak bu modelde bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli basmada, birim şekil değiştirme değeri -0,1736 dan küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,1 den büyük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,23 ten büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil

değiştirme değeri -0,1870 den daha küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 3. dereceden Ogden'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.17).

Tablo 5.17. CK 750 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar

| | μ_1 | α_1 | D1 |
|---|---------|------------|----|
| 1 | 2,81 | 1,02 | 0 |
| 2 | -6,35 | 6,08 | 0 |
| 3 | 12,9 | -12,14 | 0 |

Ogden modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 2,74 ten büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1266 dan küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,07 den büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada -0,4829 dan küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,14 ten büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1228 den daha küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 1. dereceden Reduced Polynomial (Neo Hooke)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.18).

Tablo 5.18. CK 750 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C10 | D1 |
|-----|------|----|
| 0 | 1,49 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri 3. dereceden Reduced Polynomial (Yeoh)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.19).

Tablo 5.19. CK 750 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C03 | C10 | C11 | C12 | C20 | C21 | C30 | D1 | D2 | D3 |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-------|-----|----------------------|----|----|----|
| 0 | 0 | 0 | 2,05 | 0 | 0 | -0,21 | 0 | $1,35 \cdot 10^{-2}$ | 0 | 0 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri Arruda - Boyce'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.20).

Tablo 5.20. CK 750 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar

| μ | μ_0 | λ_m | D |
|-------|---------|-------------|---|
| 2,99 | 2,99 | 5858,77 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu form da, hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

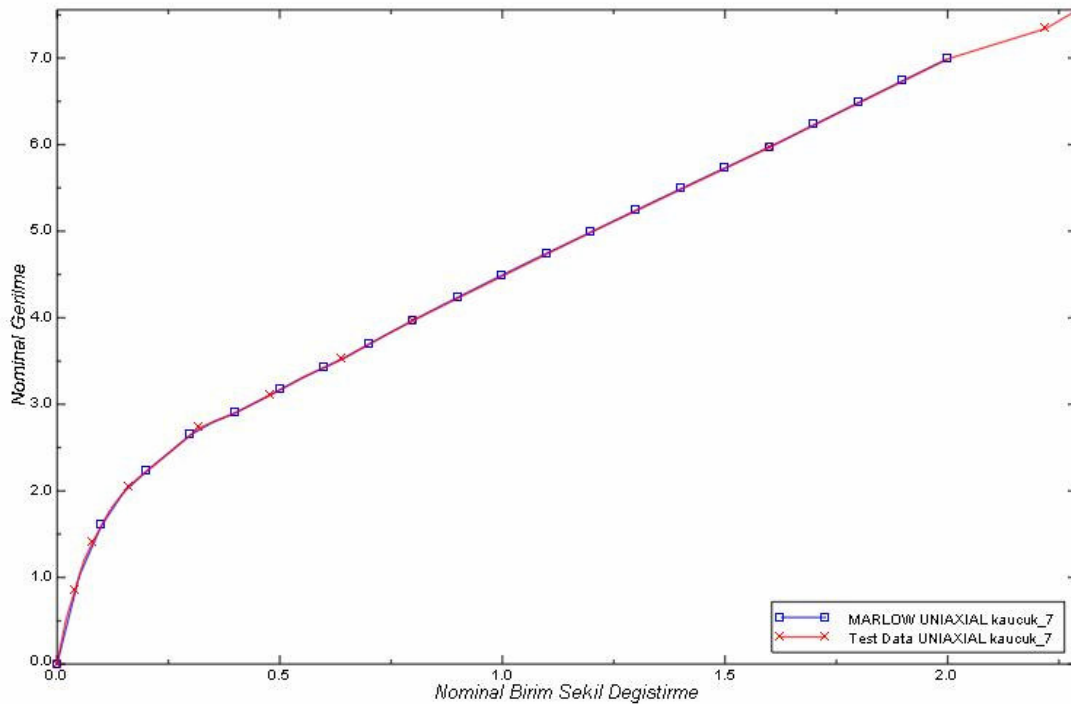
Test verileri Van Der Waals'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.21.).

Tablo 5.21. CK 750 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar

| μ | λ_m | A | β | D |
|-------|-------------|------|---------|---|
| 5,26 | 5,23 | 0,93 | 0 | 0 |

Van Der Waals modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 4,2 den büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,9270 ten küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 2,7 den büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,5615 ten küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 4,14 ten büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,8054 ten küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

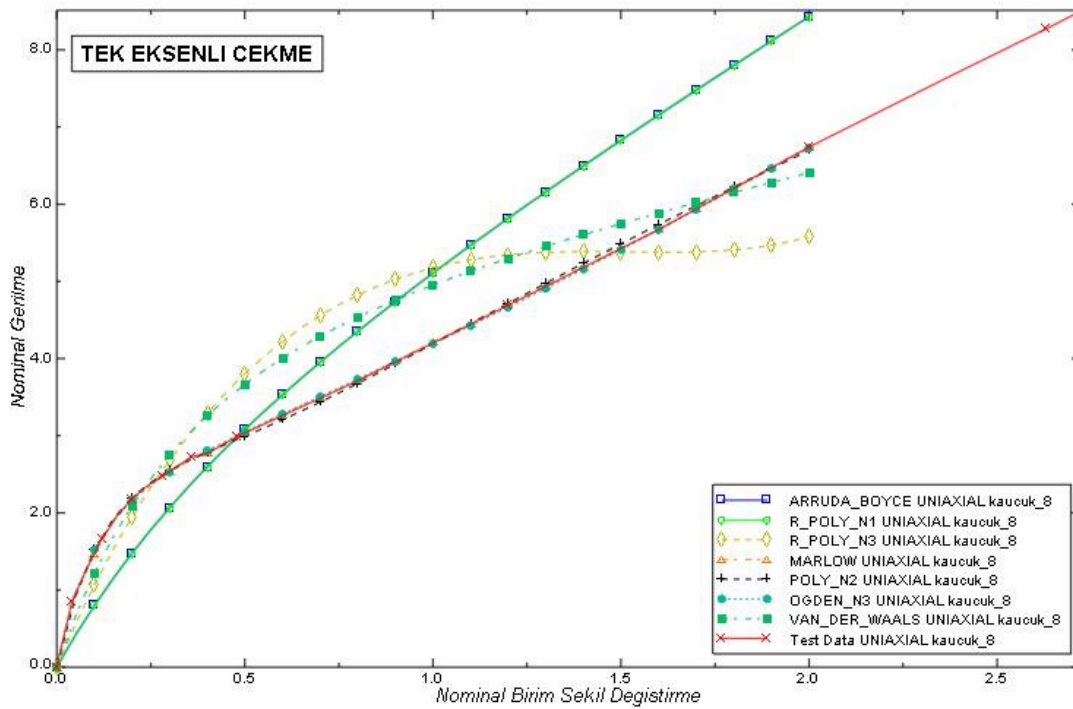
Test verileri Marlow'a uygulandığında aşağıdaki grafik elde edilmiştir (Şekil 5.19).



Şekil 5.19. CK 750 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Malzememize en uygun olan form Marlow formudur çünkü yalnızca bir test veri seti (tek eksenli, eş iki eksenli ya da düzlemsel test verisi) mevcut olduğu zaman, literatürde Marlow formunun kullanılması tavsiye edilmektedir [37].

CK 1000 için sonuçlar;



Şekil 5.20. CK 1000 için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği

Yukarıda Şekil 5.20’de, CK 1000 malzemelerinin tüm formlar için değerlendirme sonuçları görülmektedir.

Test verileri 2. dereceden polynomial’e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.22).

Tablo 5.22. CK 1000 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C10 | C11 | C20 | D1 | D2 |
|-------|------|-------|-------|------|----|----|
| 12,63 | 3,92 | -8,86 | -0,71 | 0,10 | 0 | 0 |

Bu model, tek eksenli çekme, eş iki eksenli basma, hacimsel çekme ve basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için karardır. Ancak bu modelde bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli basmada, birim şekil değiştirme değeri -0,2028 den küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,12 den büyük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,28 den büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,2188 den daha küçük olması durumunda karardır değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 3. dereceden Ogden'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.23).

Tablo 5.23. CK 1000 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar

| | μ_1 | α_1 | D1 |
|---|---------|------------|----|
| 1 | 2,34 | 0,87 | 0 |
| 2 | -5,31 | 4,92 | 0 |
| 3 | 11,13 | -9,78 | 0 |

Ogden modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için karardır olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 3,69 dan büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1427 den küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,08 den büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada -0,5382 den küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,19 dan büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1597 den daha küçük olması durumunda karardır değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 1. dereceden Reduced Polynomial (Neo Hooke)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.24).

Tablo 5.24. CK 1000 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C10 | D1 |
|-----|------|----|
| 0 | 1,45 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri 3. dereceden Reduced Polynomial (Yeoh)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.25).

Tablo 5.25. CK 1000 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C03 | C10 | C11 | C12 | C20 | C21 | C30 | D1 | D2 | D3 |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-------|-----|----------------------|----|----|----|
| 0 | 0 | 0 | 1,95 | 0 | 0 | -0,13 | 0 | $6,40 \cdot 10^{-3}$ | 0 | 0 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri Arruda - Boyce'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.26).

Tablo 5.26. CK 1000 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar

| μ | μ_0 | λ_m | D |
|-------|---------|-------------|----------|
| 2,91 | 2,91 | 6441,39 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için karardır. Yani bu form da, hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

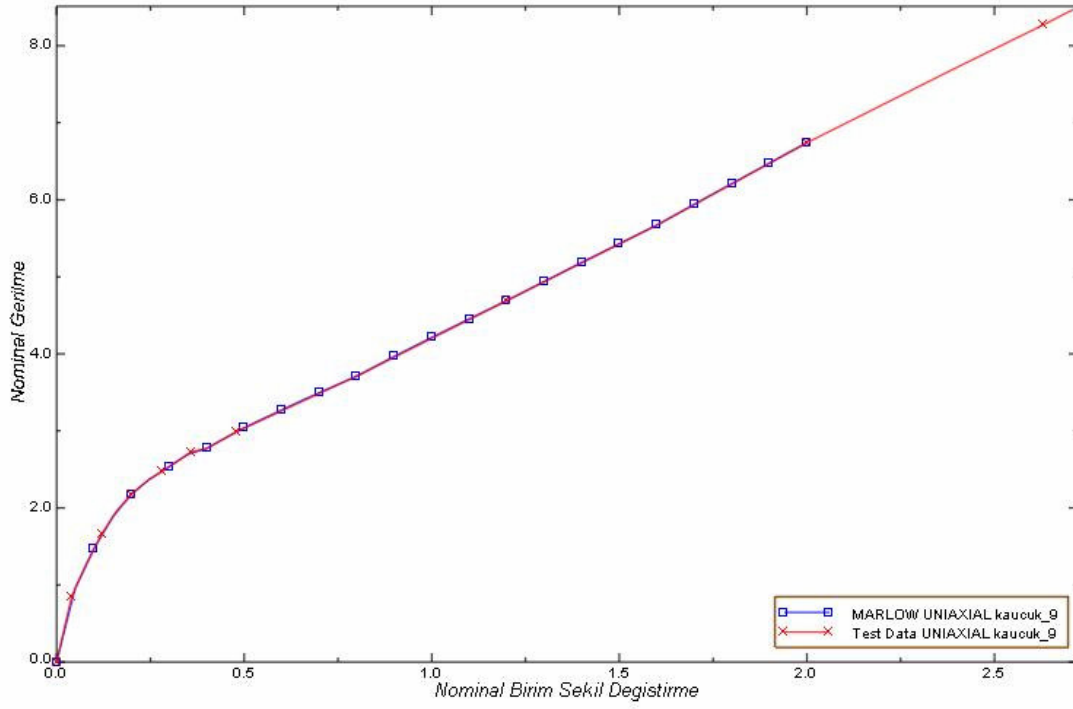
Test verileri Van Der Waals'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.27).

Tablo 5.27. CK 1000 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar

| μ | λ_m | A | β | D |
|-------|-------------|----------|---------|----------|
| 4,82 | 10,09 | 0,24 | 0,74 | 0 |

Van Der Waals modeli, tek eksenli çekme, eş iki eksenli basma, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,9125 ten küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 2,38 den büyük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 9,05 ten büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,9005 ten küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

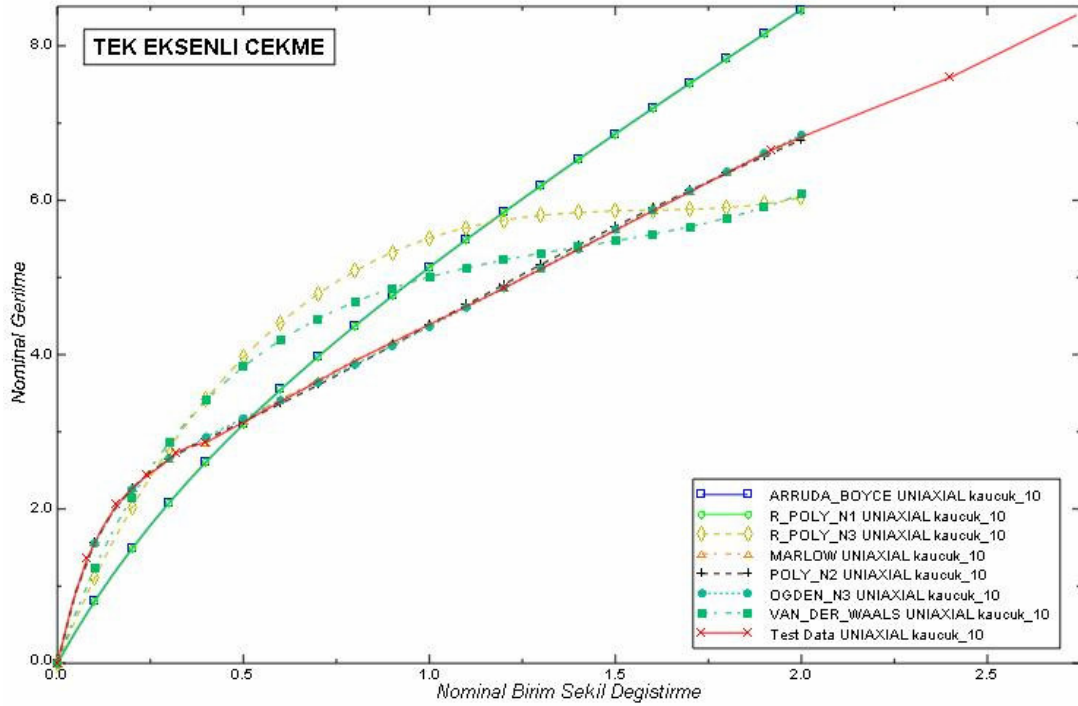
Test verileri Marlow'a uygulandığında aşağıdaki grafik elde edilmiştir (Şekil 5.21).



Şekil 5.21. CK 1000 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değıştirme değeri için kararlıdır. Malzememize en uygun olan form Marlow formudur çünkü yalnızca bir test veri seti (tek eksenli, eş iki eksenli ya da düzlemsel test verisi) mevcut olduğu zaman, literatürde Marlow formunun kullanılması tavsiye edilmektedir [37].

MT 250 için sonuçlar;



Şekil 5.22. MT 250 malzemesi için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği

Yukarıda Şekil 5.22’de, MT 250 malzemelerinin tüm formlar için değerlendirme sonuçları görülmektedir.

Test verileri 2. dereceden polynomial’e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.28).

Tablo 5.28. MT 250 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C10 | C11 | C20 | D1 | D2 |
|-------|------|-------|-------|------|----|----|
| 12,64 | 3,93 | -8,80 | -0,71 | 0,10 | 0 | 0 |

Bu model, tek eksenli çekme, eş iki eksenli basma, hacimsel çekme ve basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Ancak bu modelde bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli basmada, birim şekil değiştirme değeri -0,2028 den küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,12 den büyük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme

değeri 0,29 dan büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,2248 den daha küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 3. dereceden Ogden'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.29).

Tablo 5.29. MT 250 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar

| | μ_1 | α_1 | D1 |
|---|---------|------------|----|
| 1 | 1,66 | 2,01 | 0 |
| 2 | -5,32 | 3,72 | 0 |
| 3 | 11,50 | -7,34 | 0 |

Ogden modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 4,62 den büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1884 ten küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,11 den büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada -0,5782 den küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,24 ten büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1935 ten daha küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 1. dereceden Reduced Polynomial (Neo Hooke)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.30).

Tablo 5.30. MT 250 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C10 | D1 |
|-----|------|----|
| 0 | 1,46 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri 3. dereceden Reduced Polynomial (Yeoh)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.31).

Tablo 5.31. MT 250 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C03 | C10 | C11 | C12 | C20 | C21 | C30 | D1 | D2 | D3 |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-------|-----|----------------------|----|----|----|
| 0 | 0 | 0 | 2,02 | 0 | 0 | -0,12 | 0 | $5,53 \cdot 10^{-3}$ | 0 | 0 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri Arruda - Boyce'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.32).

Tablo 5.32. MT 250 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar

| μ | μ_0 | λ_m | D |
|-------|---------|-------------|---|
| 2,93 | 2,93 | 6295,68 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu form da, hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

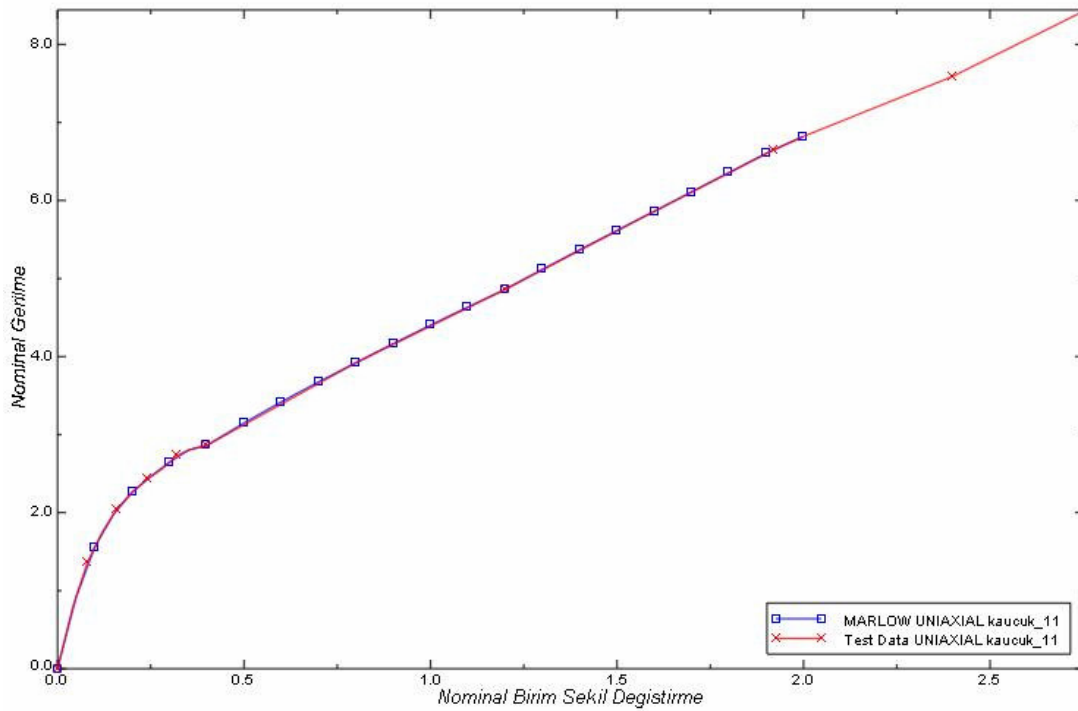
Test verileri Van Der Waals'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.33).

Tablo 5.33. MT 250 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar

| μ | λ_m | A | β | D |
|-------|-------------|------|---------|---|
| 4,74 | 6,49 | 0,68 | 0 | 0 |

Van Der Waals modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 5,48 den büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,9527 den küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 3,6 dan büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,6072 den küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 5,42 den büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,8442 den küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

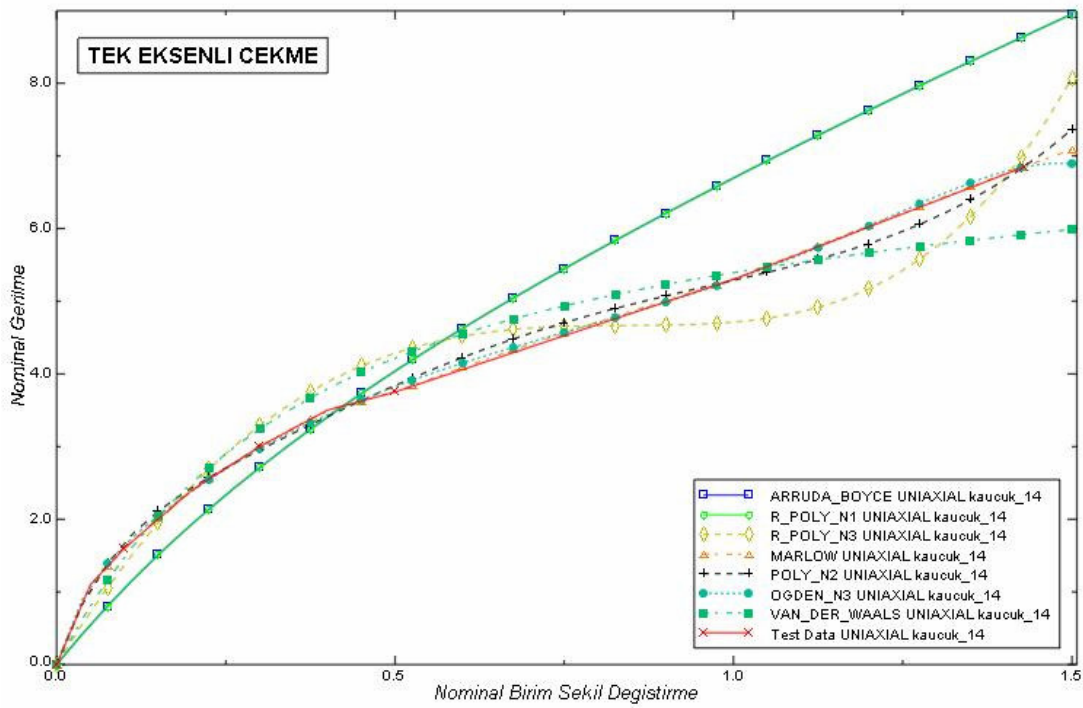
Test verileri Marlow'a uygulandığında aşağıdaki grafik elde edilmiştir (Şekil 5.23).



Şekil 5.23. MT 250 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Malzememize en uygun olan form Marlow formudur çünkü yalnızca bir test veri seti (tek eksenli, eş iki eksenli ya da düzlemsel test verisi) mevcut olduğu zaman, literatürde Marlow formunun kullanılması tavsiye edilmektedir [37].

MT 500 için sonuçlar;



Şekil 5.24. MT 500 malzemesi için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği

Yukarıda Şekil 5.24'te, MT 500 malzemelerinin tüm formlar için değerlendirme sonuçları görülmektedir.

Test verileri 2. dereceden polynomial'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.34).

Tablo 5.34. MT 500 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C10 | C11 | C20 | D1 | D2 |
|-------|-------|--------|-------|------|----|----|
| 18,43 | 15,22 | -14,05 | -9,83 | 2,35 | 0 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme ve basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Ancak bu modelde bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede, birim şekil değiştirme değeri 4,34 ten büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1583 ten küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,09 dan büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,5673 ten küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,22 den büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1803 ten daha küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 3. dereceden Ogden'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.35).

Tablo 5.35. MT 500 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar

| | μ_1 | α_1 | D1 |
|---|---------|------------|----|
| 1 | 4,71 | -0,24 | 0 |
| 2 | -6,35 | 12,50 | 0 |
| 3 | 12,70 | -24,99 | 0 |

Ogden modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 1,54 ten büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,0754 ten küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,04 ten büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada -0,3725 ten küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,08 den büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,0741 den daha

küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 1. dereceden Reduced Polynomial (Neo Hooke)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.36).

Tablo 5.36. MT 500 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C10 | D1 |
|-----|------|----|
| 0 | 1,91 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri 3. dereceden Reduced Polynomial (Yeoh)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.37).

Tablo 5.37. MT 500 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C03 | C10 | C11 | C12 | C20 | C21 | C30 | D1 | D2 | D3 |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-------|-----|---------------------|----|----|----|
| 0 | 0 | 0 | 2,53 | 0 | 0 | -0,48 | 0 | $6,4 \cdot 10^{-2}$ | 0 | 0 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri Arruda - Boyce'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.38).

Tablo 5.38. MT 500 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar

| μ | μ_0 | λ_m | D |
|-------|---------|-------------|---|
| 3,82 | 3,82 | 3882,13 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için karardır. Yani bu form da, hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

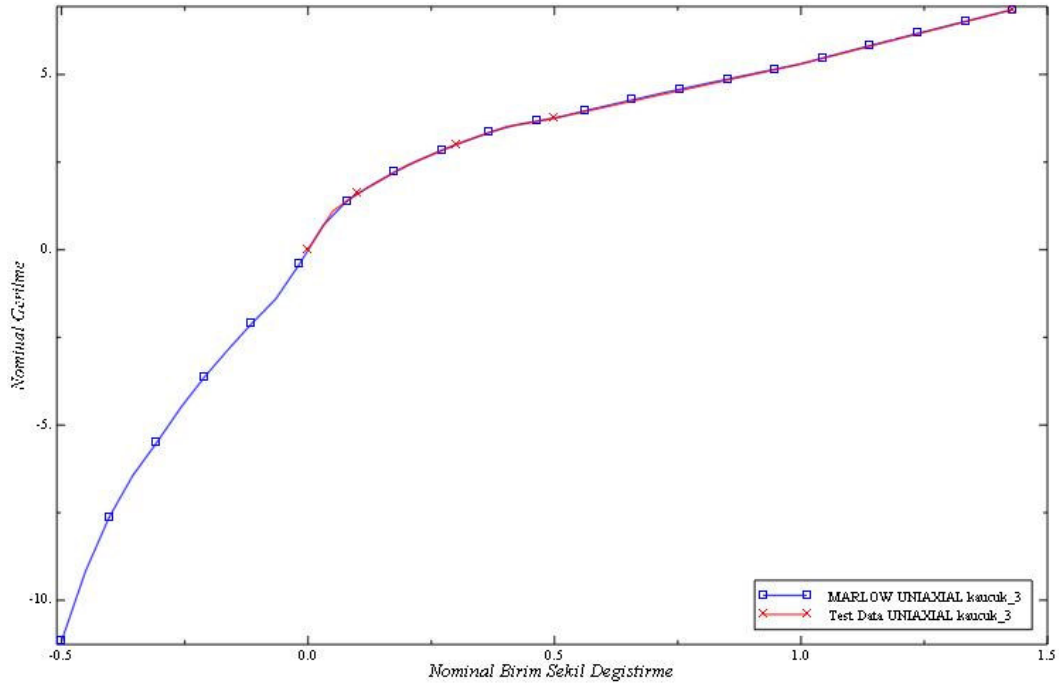
Test verileri Van Der Waals'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.39).

Tablo 5.39. MT 500 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar

| μ | λ_m | A | β | D |
|-------|-------------|------|---------|---|
| 5,95 | 9,09 | 0,34 | 0,80 | 0 |

Van Der Waals modeli, tek eksenli çekme, eş iki eksenli basma, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,8992 den küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 2,15 ten büyük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 8,04 ten büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,8894 ten küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

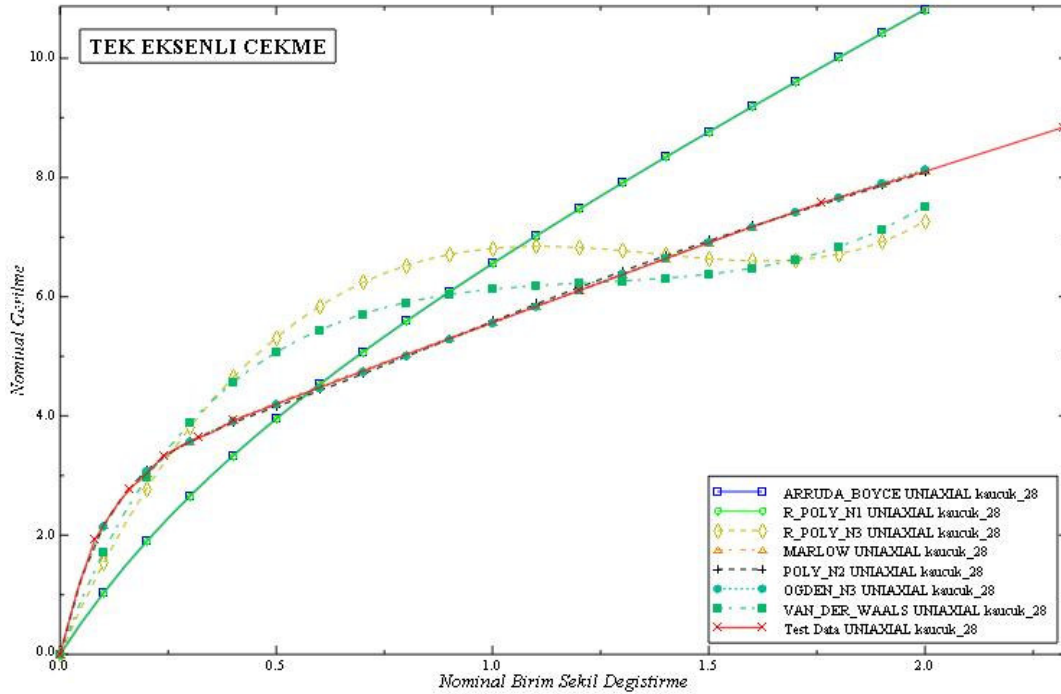
Test verileri Marlow'a uygulandığında aşağıdaki grafik elde edilmiştir (Şekil 5.25).



Şekil 5.25. MT 500 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için karardır. Malzememize en uygun olan form Marlow formudur çünkü yalnızca bir test veri seti (tek eksenli, eş iki eksenli ya da düzlemsel test verisi) mevcut olduğu zaman, literatürde Marlow formunun kullanılması tavsiye edilmektedir [37].

MT 750 için sonuçlar;



Şekil 5.26. MT 750 malzemesi için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği

Yukarıda Şekil 5.26'da, MT 750 malzemelerinin tüm formlar için değerlendirme sonuçları görülmektedir.

Test verileri 2. dereceden polynomial'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.40).

Tablo 5.40. MT 750 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C10 | C11 | C20 | D1 | D2 |
|-------|------|--------|-------|------|----|----|
| 18,22 | 6,01 | -12,87 | -1,34 | 0,21 | 0 | 0 |

Bu model, tek eksenli çekme, eş iki eksenli basma, hacimsel çekme ve basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Ancak bu modelde bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,2028 den küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme

değeri 0,12 den büyük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,27 den büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,2126 dan daha küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 3. dereceden Ogden'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.41).

Tablo 5.41. MT 750 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar

| | μ_1 | α_1 | D1 |
|----------|---------|------------|----|
| 1 | 4,78 | 2,73 | 0 |
| 2 | -10,35 | 3,64 | 0 |
| 3 | 16,54 | -7,44 | 0 |

Ogden modeli, tek eksenli çekme, eş iki eksenli basma, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1736 dan küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,10 dan büyük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,23 ten büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1870 ten daha küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 1. dereceden Reduced Polynomial (Neo Hooke)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.42).

Tablo 5.42. MT 750 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C10 | D1 |
|-----|------|----|
| 0 | 1,87 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri 3. dereceden Reduced Polynomial (Yeoh)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.43).

Tablo 5.43. MT 750 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C03 | C10 | C11 | C12 | C20 | C21 | C30 | D1 | D2 | D3 |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-------|-----|---------------------|----|----|----|
| 0 | 0 | 0 | 2,80 | 0 | 0 | -0,25 | 0 | $1,4 \cdot 10^{-2}$ | 0 | 0 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri Arruda - Boyce'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.44).

Tablo 5.44. MT 750 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar

| μ | μ_0 | λ_m | D |
|-------|---------|-------------|---|
| 3,74 | 3,74 | 6118,16 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu form da, hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

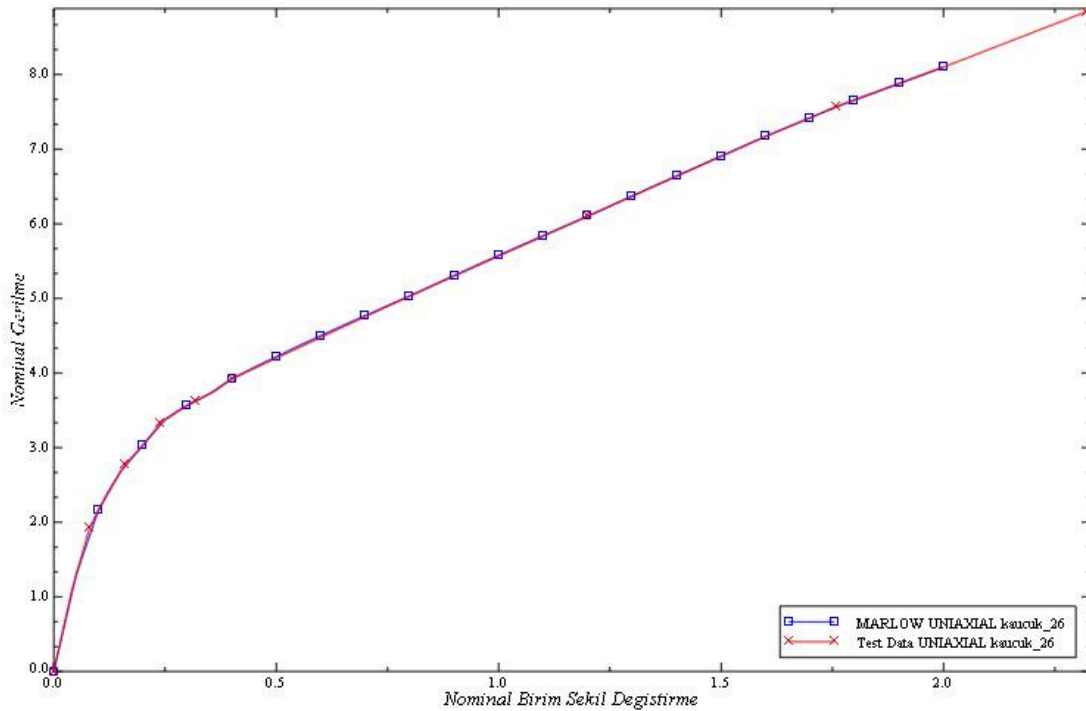
Test verileri Van Der Waals'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.45).

Tablo 5.45. MT 750 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar

| μ | λ_m | A | β | D |
|-------|-------------|------|---------|---|
| 6,71 | 5,70 | 0,83 | 0 | 0 |

Van Der Waals modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 4,68 den büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,9387 den küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 3,04 ten büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,5804 ten küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 4,61 den büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,8221 den küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

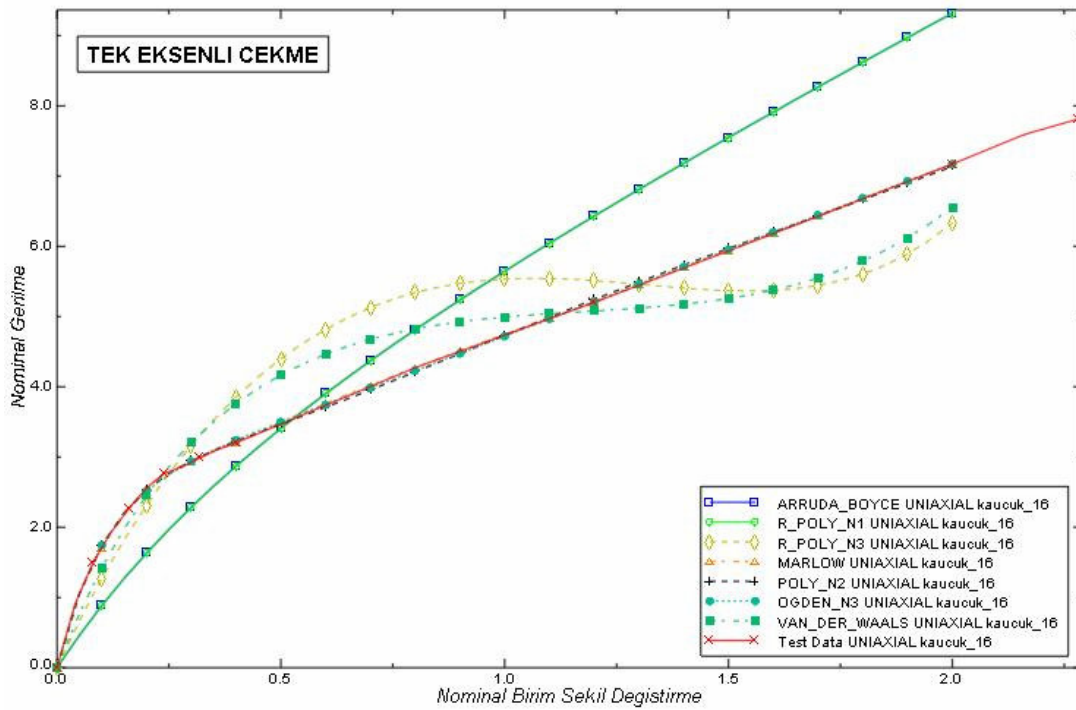
Test verileri Marlow'a uygulandığında aşağıdaki grafik elde edilmiştir (Şekil 5.27).



Şekil 5.27. MT 750 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Malzememize en uygun olan form Marlow formudur çünkü yalnızca bir test veri seti (tek eksenli, eş iki eksenli ya da düzlemsel test verisi) mevcut olduğu zaman, literatürde Marlow formunun kullanılması tavsiye edilmektedir [37]

MT 1000 için sonuçlar;



Şekil 5.28. MT 1000 malzemesi için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği

Yukarıda Şekil 5.28’de, MT 1000 malzemelerinin tüm formlar için değerlendirme sonuçları görülmektedir.

Test verileri 2. dereceden polynomial’e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.46).

Tablo 5.46. MT 1000 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C10 | C11 | C20 | D1 | D2 |
|-------|------|--------|-------|------|----|----|
| 14,37 | 4,76 | -10,06 | -1,09 | 0,18 | 0 | 0 |

Bu model, tek eksenli çekme, eş iki eksenli basma, hacimsel çekme ve basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için karardır. Ancak bu modelde bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,2028 den küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,12 den büyük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,28 den büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,2188 den daha küçük olması durumunda karardır değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 3. dereceden Ogden'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.47).

Tablo 5.47. MT 1000 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar

| | μ_1 | α_1 | D1 |
|---|---------|------------|----|
| 1 | 2,79 | 2,28 | 0 |
| 2 | -6,91 | 3,85 | 0 |
| 3 | 13,07 | -7,76 | 0 |

Ogden modeli, tek eksenli çekme, eş iki eksenli basma, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için karardır olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1736 dan küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,10 dan büyük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,23 ten büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1870 ten daha küçük olması durumunda karardır değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 1. dereceden Reduced Polynomial (Neo Hooke)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.48).

Tablo 5.48. MT 1000 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C10 | D1 |
|------------|------------|-----------|
| 0 | 1,61 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri 3. dereceden Reduced Polynomial (Yeoh)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.49).

Tablo 5.49. MT 1000 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C03 | C10 | C11 | C12 | C20 | C21 | C30 | D1 | D2 | D3 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 0 | 0 | 0 | 2,33 | 0 | 0 | -0,23 | 0 | $1,37 \cdot 10^{-2}$ | 0 | 0 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri Arruda - Boyce'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.50).

Tablo 5.50. MT 1000 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar

| μ | μ_0 | λ_m | D |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------|
| 3,22 | 3,22 | 6085,05 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu form da, hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

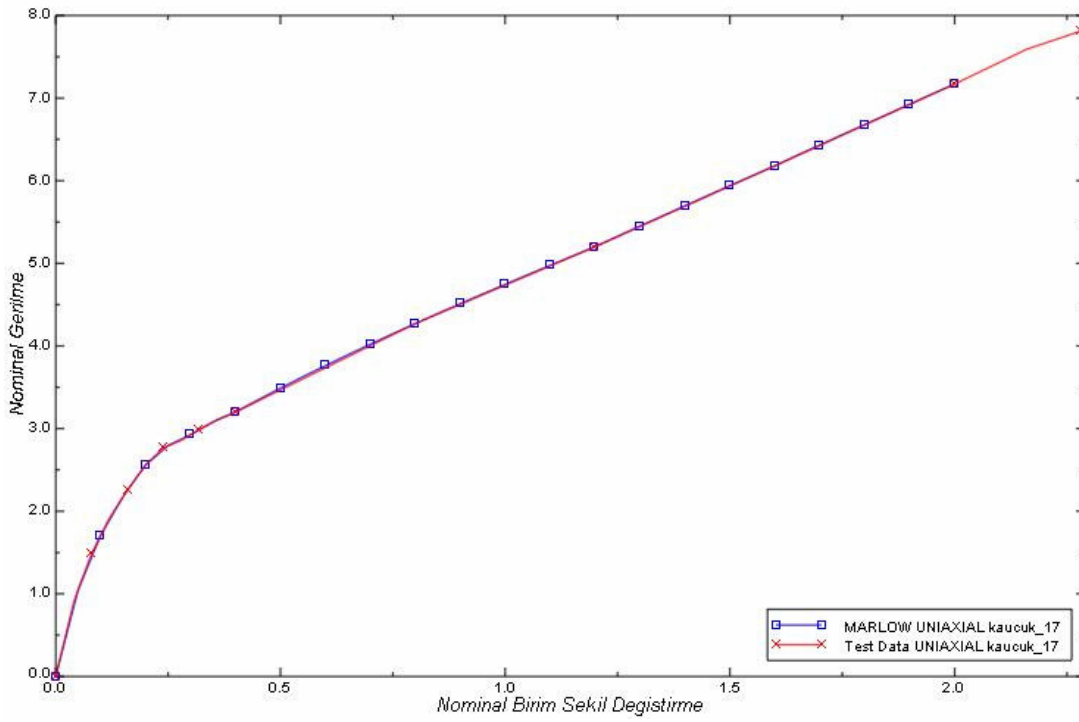
Test verileri Van Der Waals'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.51).

Tablo 5.51. MT 1000 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar

| μ | λ_m | A | β | D |
|-------|-------------|------|---------|---|
| 5,58 | 5,50 | 0,86 | 0 | 0 |

Van Der Waals modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 4,47 den büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,9343 ten küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 2,9 dan büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,5724 ten küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 4,41 den büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,8152 den küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

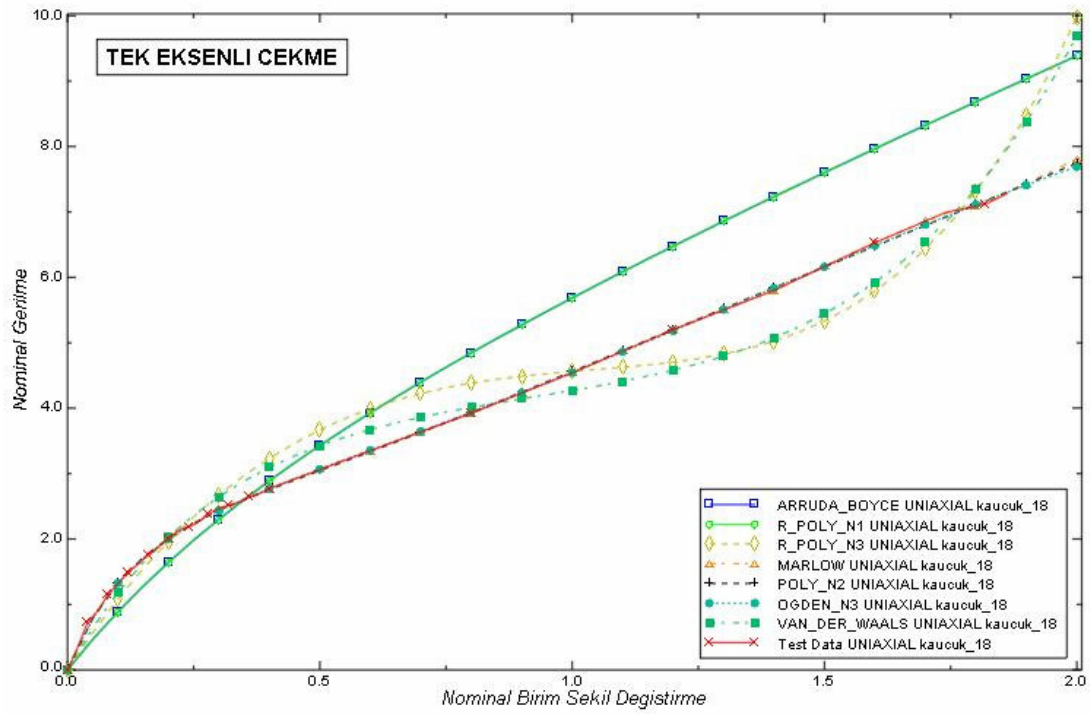
Test verileri Marlow'a uygulandığında aşağıdaki grafik elde edilmiştir (Şekil 5.29).



Şekil 5.29. MT 1000 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değıştirme değerleri için kararlıdır. Malzememize en uygun olan form Marlow formudur çünkü yalnızca bir test veri seti (tek eksenli, eş iki eksenli ya da düzlemsel test verisi) mevcut olduğu zaman, literatürde Marlow formunun kullanılması tavsiye edilmektedir [37].

W 250 için sonuçlar;



Şekil 5.30. W 250 malzemesi için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği

Yukarıda Şekil 5.30’da, W 250 malzemelerinin tüm formlar için değerlendirme sonuçları görülmektedir.

Test verileri 2. dereceden polynomial’e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.52).

Tablo 5.52. W 250 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C10 | C11 | C20 | D1 | D2 |
|------|------|-------|-------|----------------------|----|----|
| 9,22 | 2,81 | -6,07 | -0,47 | $7,57 \cdot 10^{-2}$ | 0 | 0 |

Bu model, tek eksenli çekme, eş iki eksenli basma, hacimsel çekme ve basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Ancak bu modelde bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,2439 dan küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,15 ten büyük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme

değeri 0,39 dan büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,2806 dan daha küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 3. dereceden Ogden'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.53).

Tablo 5.53. W 250 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar

| | μ_1 | α_1 | D1 |
|---|---------|------------|----|
| 1 | 2,30 | -2,45 | 0 |
| 2 | -2,69 | 4,49 | 0 |
| 3 | 6,89 | -8,63 | 0 |

Ogden modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 3,07 den büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,2028 den küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,12 den büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,5043 ten küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,28 den büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,2188 den daha küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 1. dereceden Reduced Polynomial (Neo Hooke)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.54).

Tablo 5.54. W 250 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C10 | D1 |
|-----|------|----|
| 0 | 1,62 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri 3. dereceden Reduced Polynomial (Yeoh)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.55).

Tablo 5.55. W 250 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C03 | C10 | C11 | C12 | C20 | C21 | C30 | D1 | D2 | D3 |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-------|-----|----------------------|----|----|----|
| 0 | 0 | 0 | 1,99 | 0 | 0 | -0,23 | 0 | $2,17 \cdot 10^{-2}$ | 0 | 0 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri Arruda - Boyce'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.56).

Tablo 5.56. W 250 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar

| μ | μ_0 | λ_m | D |
|-------|---------|-------------|---|
| 3,24 | 3,24 | 5691,92 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu form da, hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

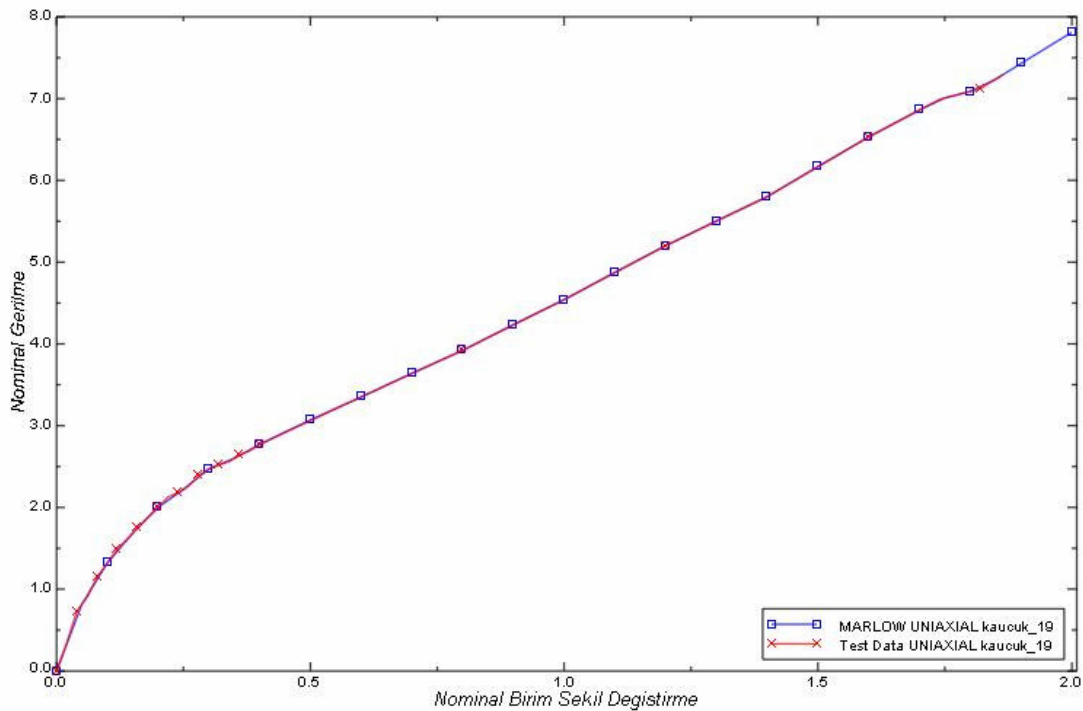
Test verileri Van Der Waals'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.57).

Tablo 5.57. W 250 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar

| μ | λ_m | A | β | D |
|-------|-------------|------|---------|---|
| 4,67 | 4,66 | 0,96 | 0 | 0 |

Van Der Waals modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 3,63 ten büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,9082 den küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 2,3 ten büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,5353 ten küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 3,56 dan büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,7807 den küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

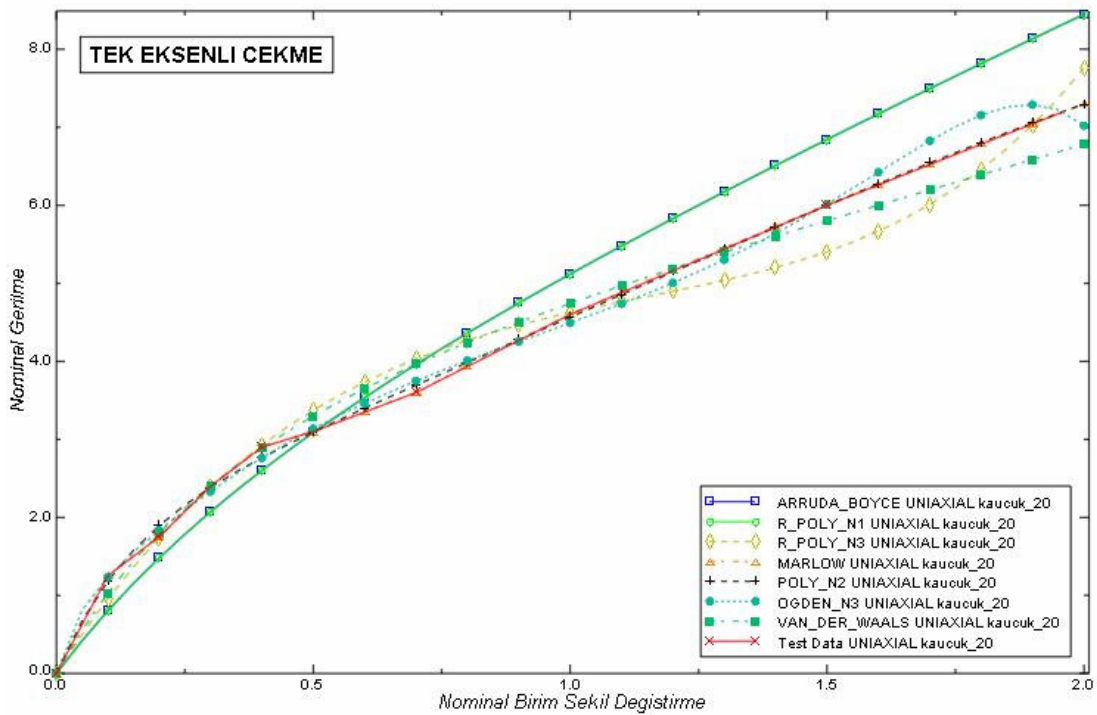
Test verileri Marlow'a uygulandığında aşağıdaki grafik elde edilmiştir (Şekil 5.31).



Şekil 5.31. W 250 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Malzememize en uygun olan form Marlow formudur çünkü yalnızca bir test veri seti (tek eksenli, eş iki eksenli ya da düzlemsel test verisi) mevcut olduğu zaman, literatürde Marlow formunun kullanılması tavsiye edilmektedir [37].

W 500 için sonuçlar;



Şekil 5.32. W 500 malzemesi için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği

Yukarıda Şekil 5.32’de, W 500 malzemelerinin tüm formlar için değerlendirme sonuçları görülmektedir.

Test verileri 2. dereceden polynomial’e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.58).

Tablo 5.58. W 500 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C10 | C11 | C20 | D1 | D2 |
|------|------|-------|-------|-----------------------|----|----|
| 5,36 | 1,03 | -2,77 | -0,10 | $-3,57 \cdot 10^{-2}$ | 0 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme ve basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için karardır. Ancak bu modelde bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 3,99 dan büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,3991 den küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,29 dan büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,5523 ten küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 1,14 ten büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,5327 den daha küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 3. dereceden Ogden'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.59).

Tablo 5.59. W 500 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar

| | μ_1 | α_1 | D1 |
|---|---------|------------|----|
| 1 | 3,42 | 0,90 | 0 |
| 2 | -4,82 | 12,49 | 0 |
| 3 | 9,65 | -24,99 | 0 |

Ogden modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 1,95 ten büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,0754 ten küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,04 ten büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,4178 den küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,08 den büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil

değiştirme değeri -0,0741 den daha küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 1. dereceden Reduced Polynomial (Neo Hooke)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.60).

Tablo 5.60. W 500 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C10 | D1 |
|-----|------|----|
| 0 | 1,46 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri 3. dereceden Reduced Polynomial (Yeoh)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.61).

Tablo 5.61. W 500 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C03 | C10 | C11 | C12 | C20 | C21 | C30 | D1 | D2 | D3 |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-------|-----|----------------------|----|----|----|
| 0 | 0 | 0 | 1,74 | 0 | 0 | -0,13 | 0 | $1,09 \cdot 10^{-2}$ | 0 | 0 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri Arruda - Boyce'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.62).

Tablo 5.62. W 500 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar

| μ | μ_0 | λ_m | D |
|-------|---------|-------------|----------|
| 2,92 | 2,92 | 5307,43 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için karardır. Yani bu form da, hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

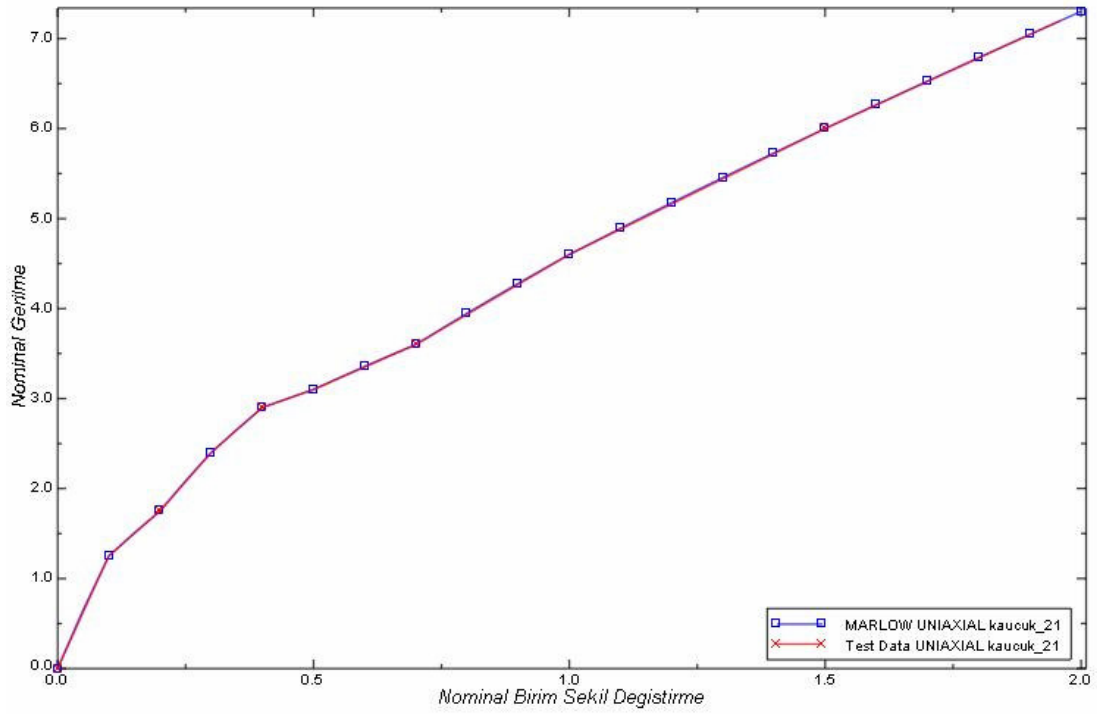
Test verileri Van Der Waals'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.63).

Tablo 5.63. W 500 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar

| μ | λ_m | A | β | D |
|-------|-------------|----------|---------|----------|
| 4 | 9,46 | 0,15 | 0,67 | 0 |

Van Der Waals modeli, tek eksenli çekme, eş iki eksenli basma, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,9098 den küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 2,33 ten büyük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 8,42 den büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,8938 den küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

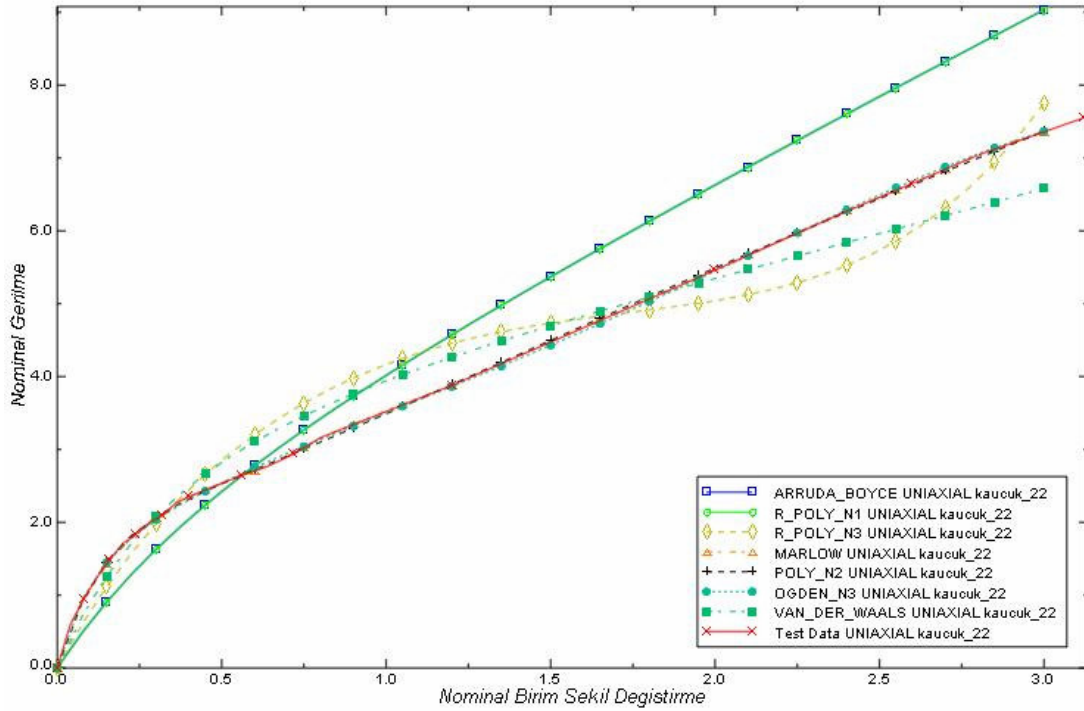
Test verileri Marlow'a uygulandığında aşağıdaki grafik elde edilmiştir (Şekil 5.33).



Şekil 5.33. W 500 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değıştirme değeri için kararlıdır. Malzememize en uygun olan form Marlow formudur çünkü yalnızca bir test veri seti (tek eksenli, eş iki eksenli ya da düzlemsel test verisi) mevcut olduğu zaman, literatürde Marlow formunun kullanılması tavsiye edilmektedir [37].

W 750 için sonuçlar;



Şekil 5.34. W 750 malzemesi için tüm formların değerlendirme sonuç grafiği

Yukarıda Şekil 5.34'te, W 750 malzemelerinin tüm formlar için değerlendirme sonuçları görülmektedir.

Test verileri 2. dereceden polynomial'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.64).

Tablo 5.64. W 750 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C10 | C11 | C20 | D1 | D2 |
|------|------|-------|-------|----------------------|----|----|
| 6,78 | 1,63 | -4,20 | -0,13 | $1,58 \cdot 10^{-2}$ | 0 | 0 |

Bu model, tek eksenli çekme, eş iki eksenli basma, hacimsel çekme ve basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararludur. Ancak bu modelde bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,2695 ten küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,17 den büyük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil

değiştirme değeri 0,45 ten büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,3103 ten daha küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 3. dereceden Ogden'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.65).

Tablo 5.65. W 750 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar

| | μ_1 | α_1 | D1 |
|---|---------|------------|----|
| 1 | 2,26 | 0,58 | 0 |
| 2 | -3,18 | 5,07 | 0 |
| 3 | 6,69 | -10,08 | 0 |

Ogden modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 3,84 ten büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1736 dan küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,1 den büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,5455 ten küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,22 den büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1803 ten daha küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 1. dereceden Reduced Polynomial (Neo Hooke)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.66).

Tablo 5.66. W 750 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C10 | D1 |
|-----|------|----|
| 0 | 1,14 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri 3. dereceden Reduced Polynomial (Yeoh)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.67).

Tablo 5.67. W 750 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C03 | C10 | C11 | C12 | C20 | C21 | C30 | D1 | D2 | D3 |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----------------------|-----|----------------------|----|----|----|
| 0 | 0 | 0 | 1,42 | 0 | 0 | $-6,58 \cdot 10^{-2}$ | 0 | $2,44 \cdot 10^{-3}$ | 0 | 0 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri Arruda - Boyce'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.68).

Tablo 5.68. W 750 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar

| μ | μ_0 | λ_m | D |
|-------|---------|-------------|---|
| 2,29 | 2,29 | 8803,78 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu form da, hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

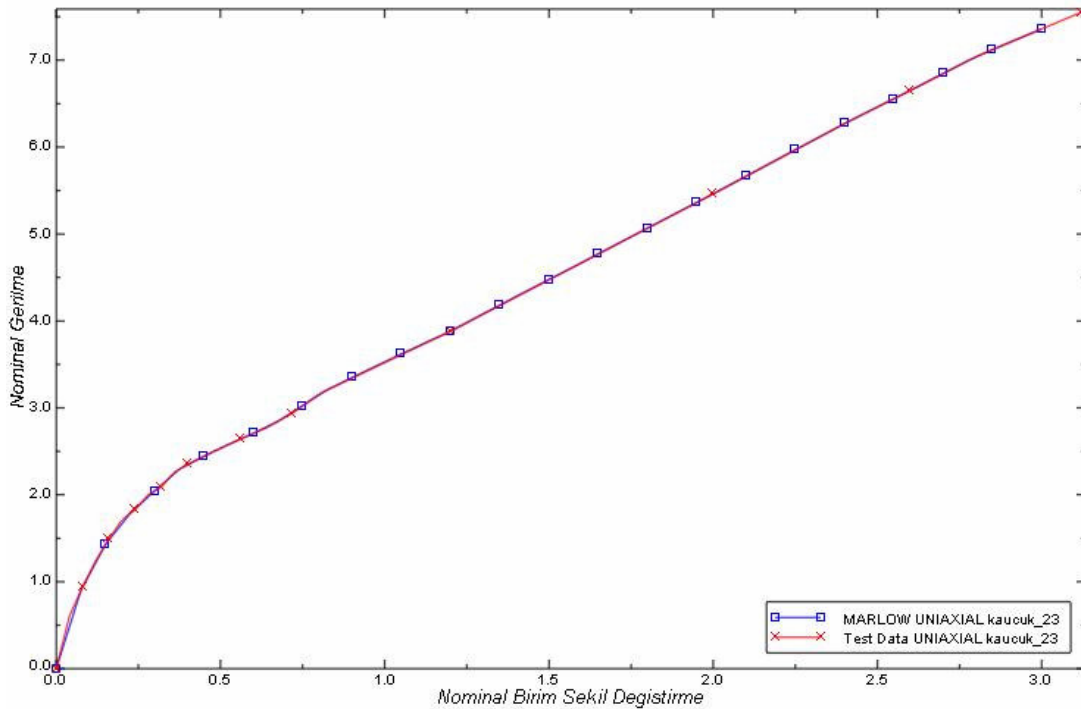
Test verileri Van Der Waals'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.69).

Tablo 5.69. W 750 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar

| μ | λ_m | A | β | D |
|-------|-------------|------|---------|---|
| 3,53 | 12,24 | 0,14 | 0,70 | 0 |

Van Der Waals modeli, tek eksenli çekme, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basma, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,9296 dan küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 2,77 den büyük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri Marlow'a uygulandığında aşağıdaki grafik elde edilmiştir (Şekil 5.35).

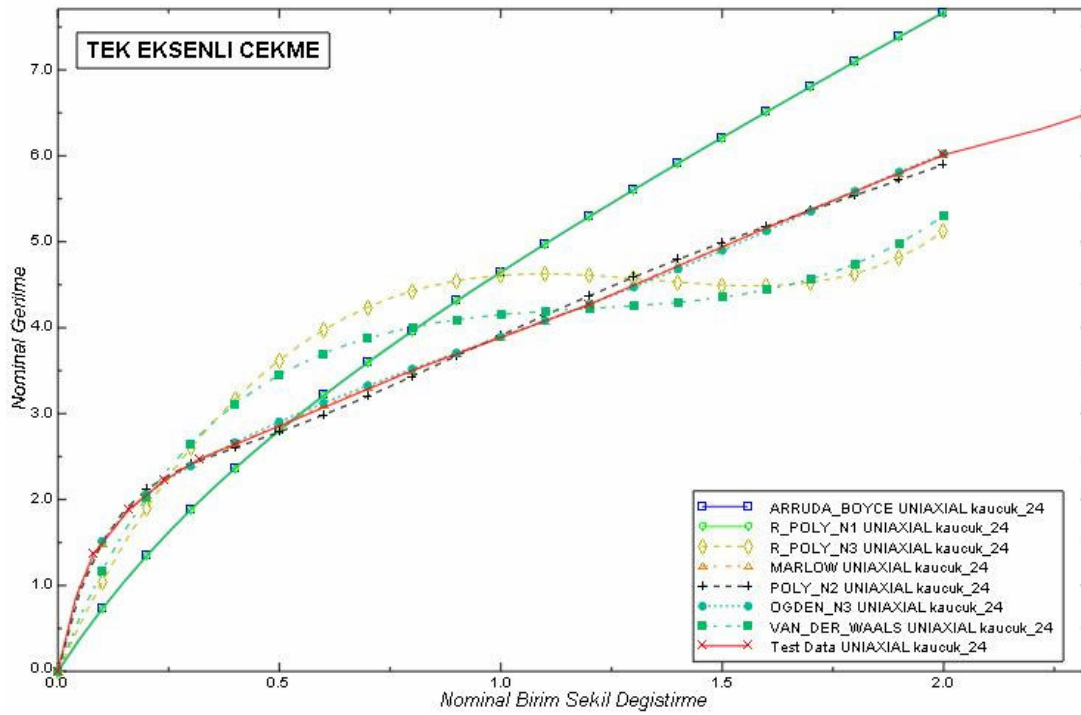


Şekil 5.35. W 750 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada

bütün birim şekil değıştirme değeri için kararlıdır. Malzememize en uygun olan form Marlow formudur çünkü yalnızca bir test veri seti (tek eksenli, eş iki eksenli ya da düzlemsel test verisi) mevcut olduğu zaman, literatürde Marlow formunun kullanılması tavsiye edilmektedir [37].

W 1000 için sonuçlar;



Şekil 5.36. W 1000 malzemesi için tüm formların değerlendirme sonuç grafiğı

Yukarıda Şekil 5.36'da, W 1000 malzemelerinin tüm formlar için değerlendirme sonuçları görülmektedir.

Test verileri 2. dereceden polynomial'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.70).

Tablo 5.70. W 1000 malzemesi için Polynomial N=2 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C10 | C11 | C20 | D1 | D2 |
|-------|------|--------|-------|------|----|----|
| 14,36 | 5,16 | -10,50 | -1,26 | 0,20 | 0 | 0 |

Bu model, tek eksenli çekme, eş iki eksenli basma, hacimsel çekme ve basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Ancak bu modelde bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1736 dan küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,1 den büyük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,23 ten büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1870 ten daha küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 3. dereceden Ogden'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.71).

Tablo 5.71. W 1000 malzemesi için Ogden N=3 formundan elde edilen katsayılar

| | μ_1 | α_1 | D1 |
|---|---------|------------|----|
| 1 | 2,99 | 0,46 | 0 |
| 2 | -6,29 | 7,33 | 0 |
| 3 | 12,65 | -14,65 | 0 |

Ogden modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 2,51 den büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,11 den küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,06 dan büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada birim şekil değiştirme değeri -0,4662 den küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değiştirme değeri 0,12 den büyük olması durumunda ve düzlemsel basmada birim şekil değiştirme değeri -0,1071 den daha küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri 1. dereceden Reduced Polynomial (Neo Hooke)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.72).

Tablo 5.72. W 1000 malzemesi için Reduced Polynomial (Neo Hooke) N=1 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C10 | D1 |
|------------|------------|-----------|
| 0 | 1,32 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri 3. dereceden Reduced Polynomial (Yeoh)'e uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.73).

Tablo 5.73. W 1000 malzemesi için Reduced Polynomial (Yeoh) N=3 formundan elde edilen katsayılar

| C01 | C02 | C03 | C10 | C11 | C12 | C20 | C21 | C30 | D1 | D2 | D3 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 0 | 0 | 0 | 1,91 | 0 | 0 | -0,18 | 0 | $1,03 \cdot 10^{-2}$ | 0 | 0 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değiştirme değerleri için kararlıdır. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

Test verileri Arruda - Boyce'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.74).

Tablo 5.74. W 1000 malzemesi için Arruda – Boyce formundan elde edilen katsayılar

| μ | μ_0 | λ_m | D |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------|
| 2,65 | 2,65 | 6106,70 | 0 |

Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada

bütün birim şekil değıştirme değeri için kararlıdır. Yani bu form da, hiperelastik malzeme için uygun bir form olabilir.

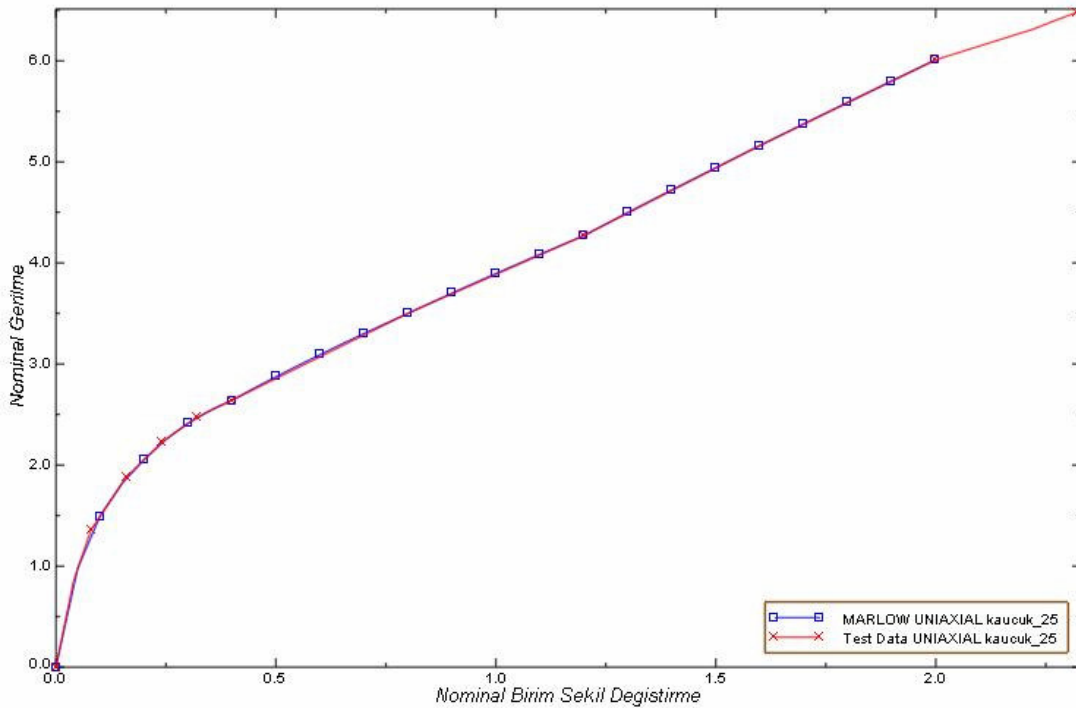
Test verileri Van Der Waals'a uygulandığında elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir (Tablo 5.75).

Tablo 5.75. W 1000 malzemesi için Van Der Waals formundan elde edilen katsayılar

| μ | λ_m | A | β | D |
|-------|-------------|------|---------|---|
| 4,59 | 5,58 | 0,84 | 0 | 0 |

Van Der Waals modeli, hacimsel çekme ve hacimsel basmada bütün birim şekil değıştirme değeri için kararlı olmasına rağmen diğer testler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Tek eksenli çekmede birim şekil değıştirme değeri 4,56 dan büyük olması durumunda, tek eksenli basmada birim şekil değıştirme değeri -0,9362 den küçük olması durumunda, eş iki eksenli çekmede birim şekil değıştirme değeri 2,96 dan büyük olması durumunda, eş iki eksenli basmada birim şekil değıştirme değeri -0,5759 dan küçük olması durumunda, düzlemsel çekmede birim şekil değıştirme değeri 4,5 ten büyük olması durumunda, düzlemsel basmada birim şekil değıştirme değeri -0,8182 den küçük olması durumunda kararlı değildir. Yani bu hiperelastik malzeme için uygun bir form değildir.

Test verileri Marlow'a uygulandığında aşağıdaki grafik elde edilmiştir (Şekil 5.37).

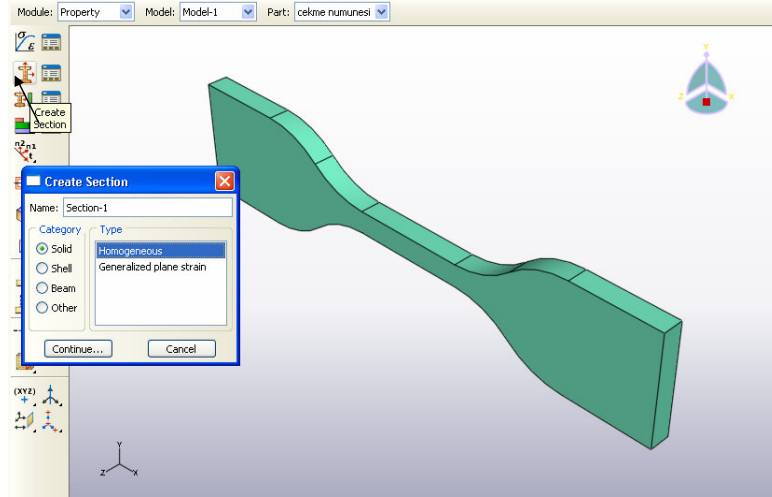


Şekil 5.37. W 1000 malzemesi için Marlow formu ile test verilerinin karşılaştırılması

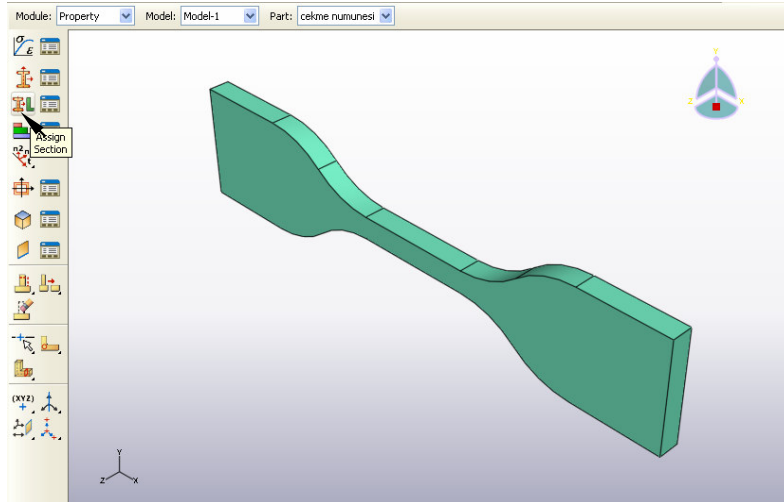
Bu model, hacimsel çekme, hacimsel basma, tek eksenli çekme, tek eksenli basma, eş iki eksenli çekmede, eş iki eksenli basma, düzlemsel çekme, düzlemsel basmada bütün birim şekil değıştirme değeri için karardır. Malzememize en uygun olan form Marlow formudur çünkü yalnızca bir test veri seti (tek eksenli, eş iki eksenli ya da düzlemsel test verisi) mevcut olduğu zaman, literatürde Marlow formunun kullanılması tavsiye edilmektedir [37].

5.4.4. Abaqus'te analiz

Tanımlanan malzememizin seçtiğimiz modele uygunluğunu Material Manager => Evaluate'den test ettikten sonra diğer adıma geçtik. Modellenen numunenin kesit özellikleri katı model ve homojen olarak tanımlandı (Şekil 5.38). Oluşturulan malzeme ve kesit özelliğini parçaya atamak için Assign Section komutu seçildi ve fare ile tüm model seçilerek kesit özelliği parçaya atandı. Bu aşamadan sonra parça yeşil renk aldı. Bunun anlamı artık bu parçaya bir kesit özelliği atanmış demektir (Şekil 5.39).



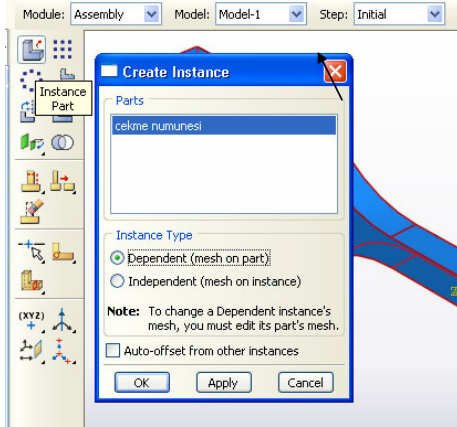
Şekil 5.38. Numunenin kesit özelliklerinin tanımlanması



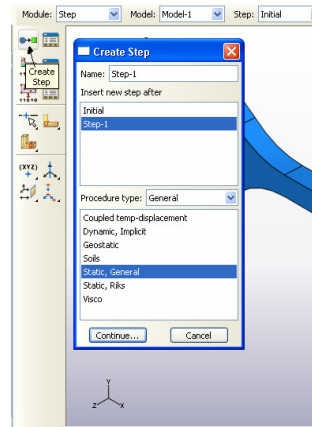
Şekil 5.39. Tanımlanmış kesit ve malzeme özelliklerinin numuneye atanması

Modül Assembly'ye getirildi. Create Instance komutuna gelip, parçanın ismi seçildi ve dependent olarak montaja atıldı (Şekil 5.40).

Statik genel bir çözüm adımı tanımlamak için, modül Step'e getirildi ve Create Step komutu seçildi. Static, General işlemi seçilip OK'e basıldı (Şekil 5.41).

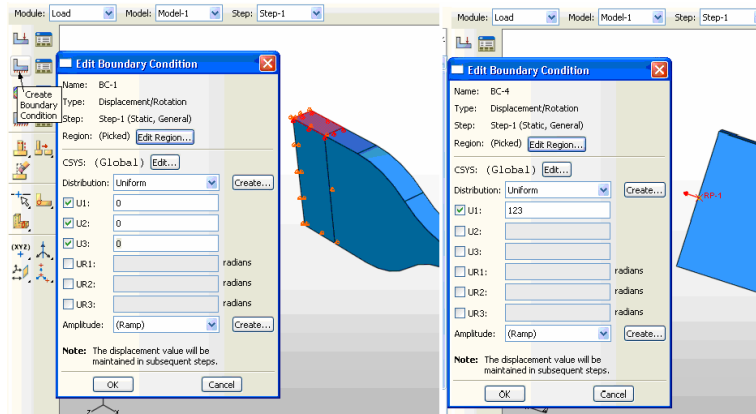


Şekil 5.40. Numunenin montaj sayfasına çağırılması



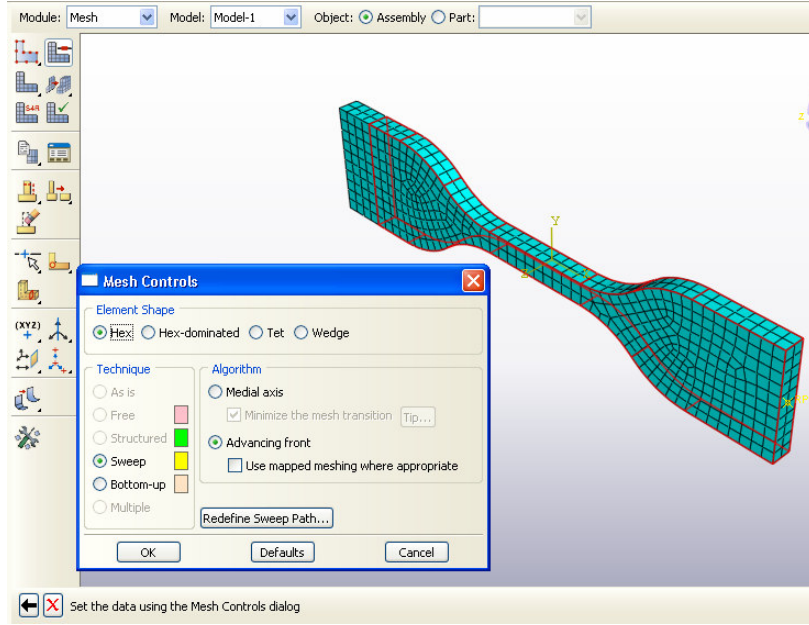
Şekil 5.41. Numuneye çözüm tanımlama

Sınır koşulları ve yüklemeler ise Load modülünden yapılmaktadır. Modelimizi bir ucundan x,y,z yönlerindeki uzama değerlerini sıfır vererek sınırlandırdık. Yani bu uç, çekme deneyinde sabit çeneye bağlanan kısımdır. Modelimizin diğer ucuna ise gerçek uzama verisi kadar tek eksen (x eksen) uzama değeri verdik. Yani bu uç, çekme deneyinde hareketli çeneye bağlanan kısmı temsil etmektedir (Şekil 5.42).

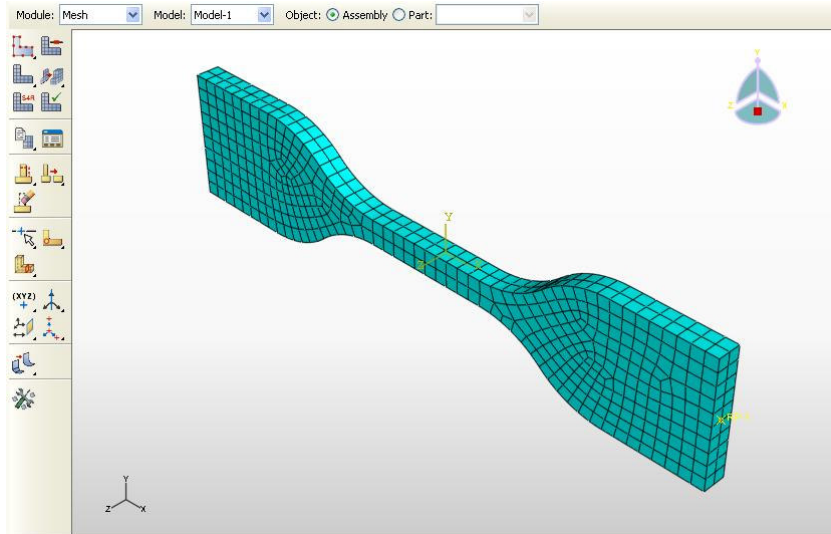


Şekil 5.42. Numuneye sınır koşulu atama

Modül mesh'e getirildi. Seed part instance, assign mesh part controls, element type pencerelerinden, mesh sayısı 748, element tipi Hex C3D20H (A20-node quadratic brick, hybrid, linear pressure) seçilerek mesh part instance'a basıldı ve parça meşlendi (Şekil 5.43, Şekil 5.44).

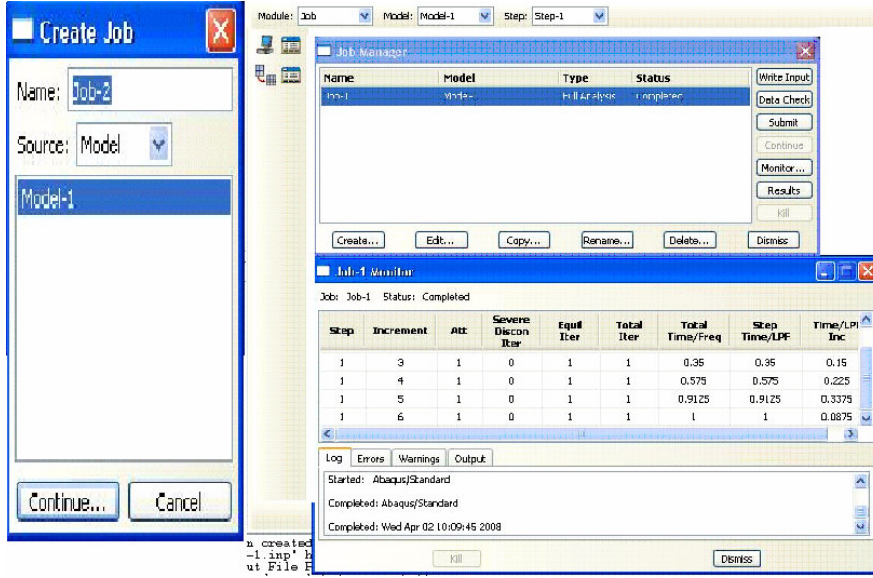


Şekil 5.43. Numunenin mesh tanımlamalarının yapılması



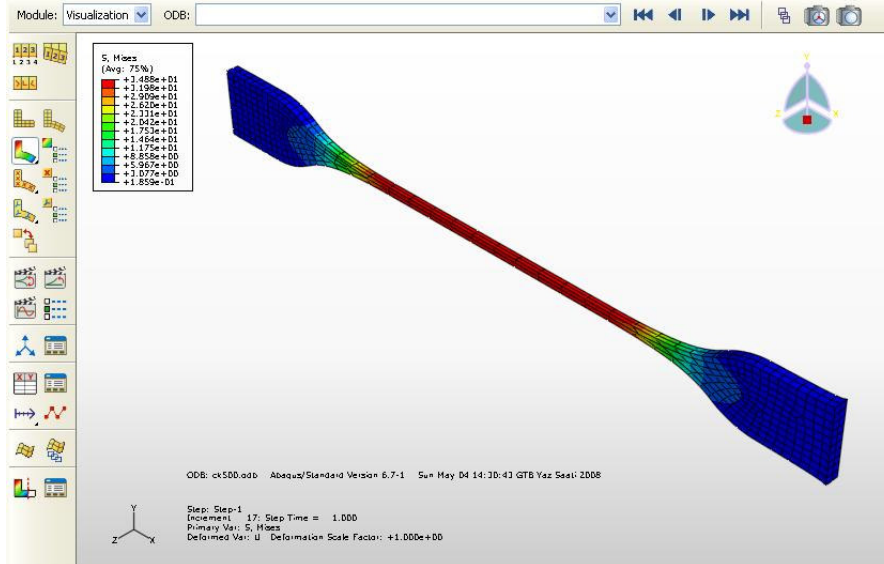
Şekil 5.44. Numunenin meshlenmesi

Analiz ismi, bilgisayar hafızası ile ilgili bazı ayarlar vs. seçimler Şekil 5.45'teki diyalog kutularından seçilerek submit'e basıldı ve analiz başladı. Çıkış kısmından da analizin aşamaları takip edildi.



Şekil 5.45. Analiz penceresi

Sonuç menüsünden, elde edilen analiz sonuçlarına ve çekme testinin simülasyonuna ulaşıldı (Şekil 5.46).

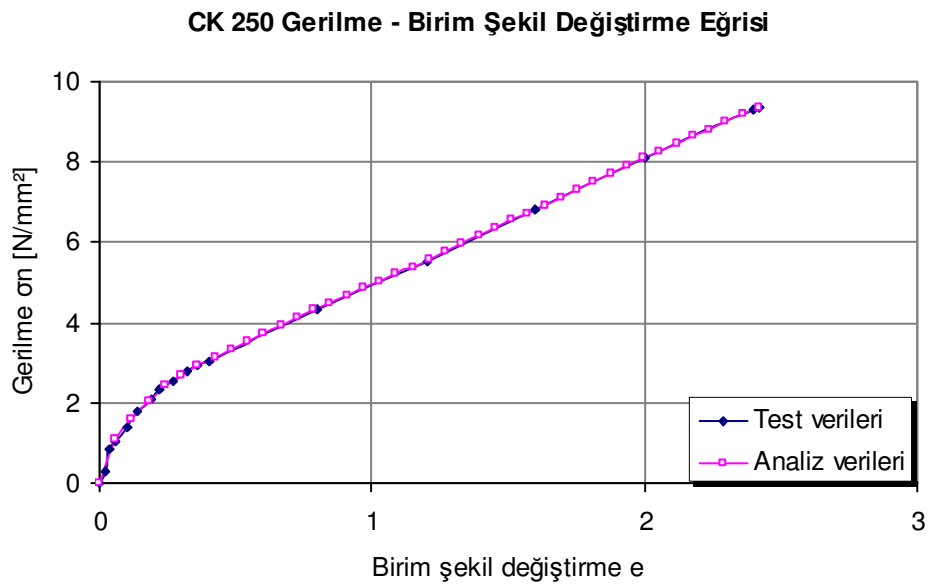


Şekil 5.46. Analiz sonucu ve simülasyon

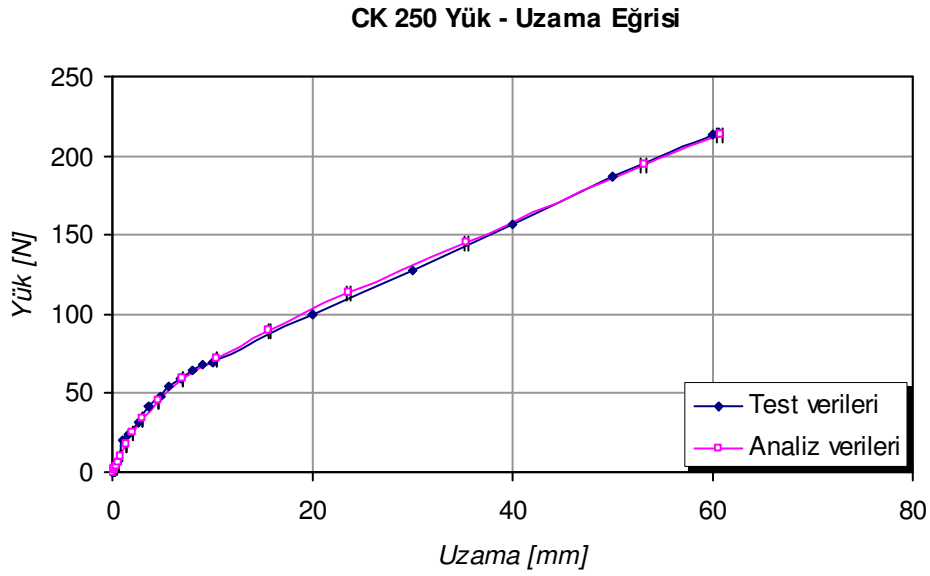
BÖLÜM 6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Yapılan çekme deneyi ve analizler sonucunda elde edilen veriler Excel'de grafik haline dönüştürülmüştür.

6.1. CK 250 Malzemelerinin Deney Sonuçları

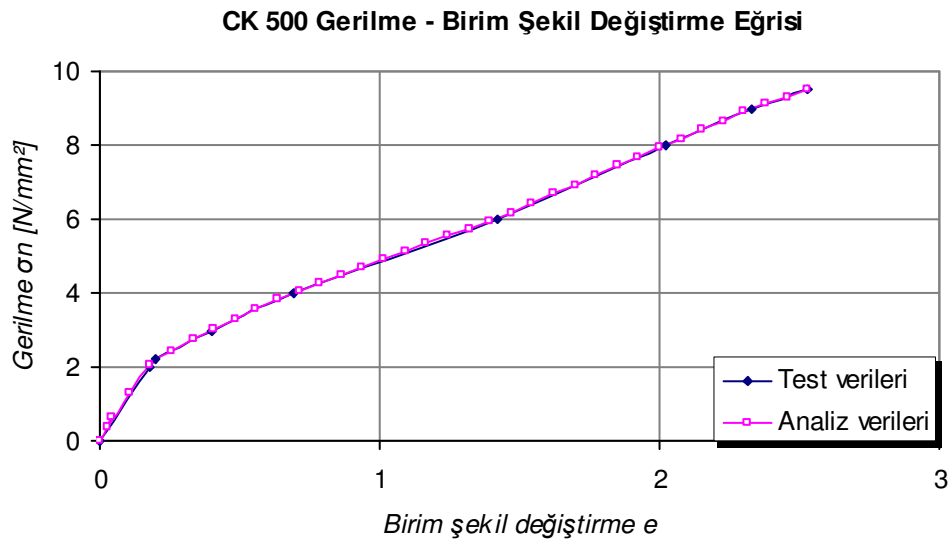


Şekil 6.1. CK 250 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme birim şekil değişirme grafiğinin karşılaştırılması

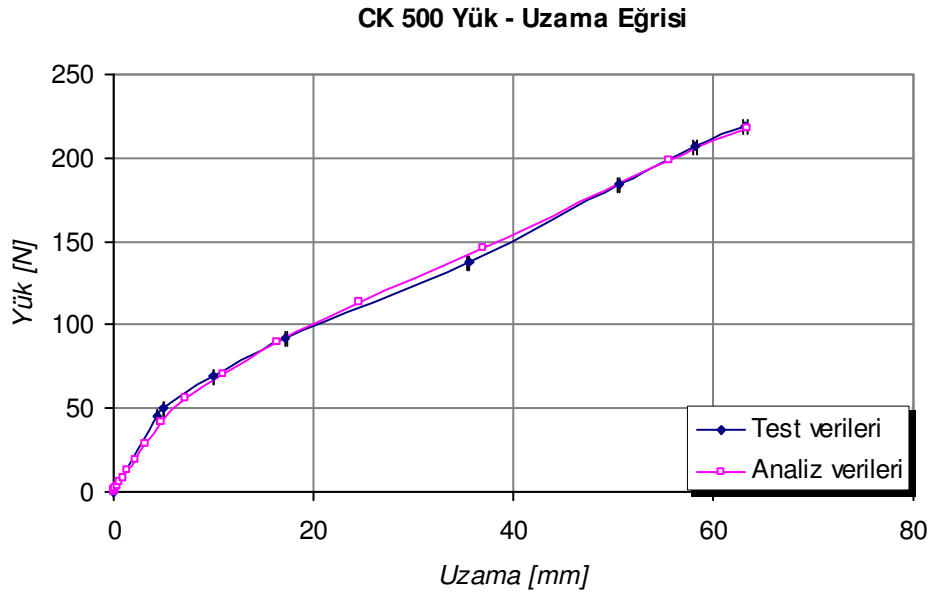


Şekil 6.2. CK 250 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması

6.2. CK 500 Malzemelerinin Deney Sonuçları

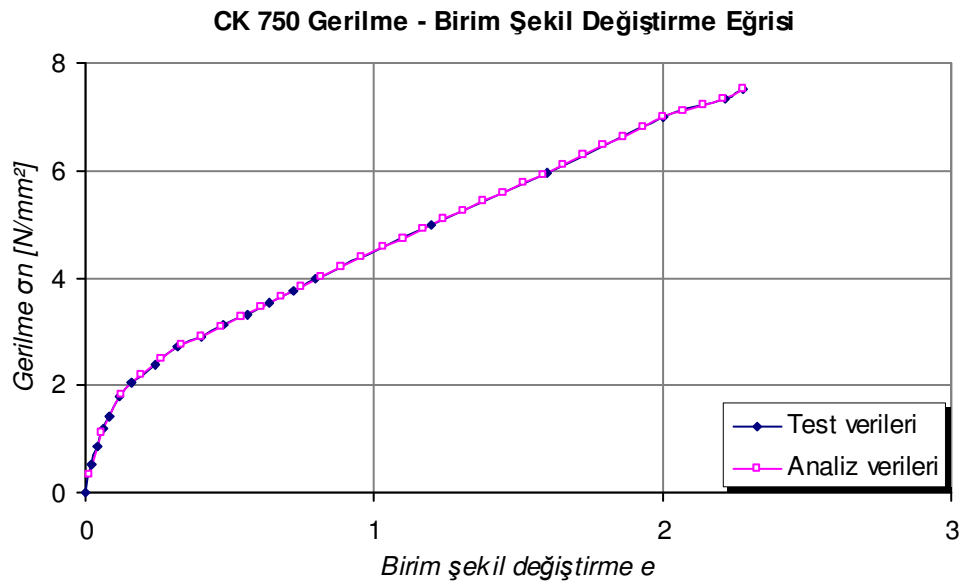


Şekil 6.3. CK 500 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değişirme grafiğinin karşılaştırılması

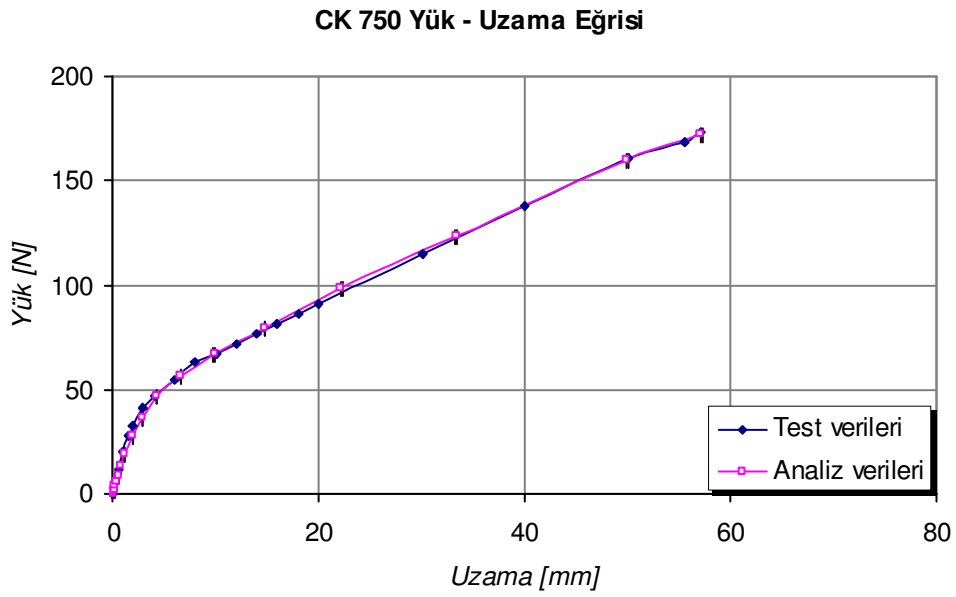


Şekil 6.4. CK 500 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması

6.3. CK 750 Malzemelerinin Deney Sonuçları

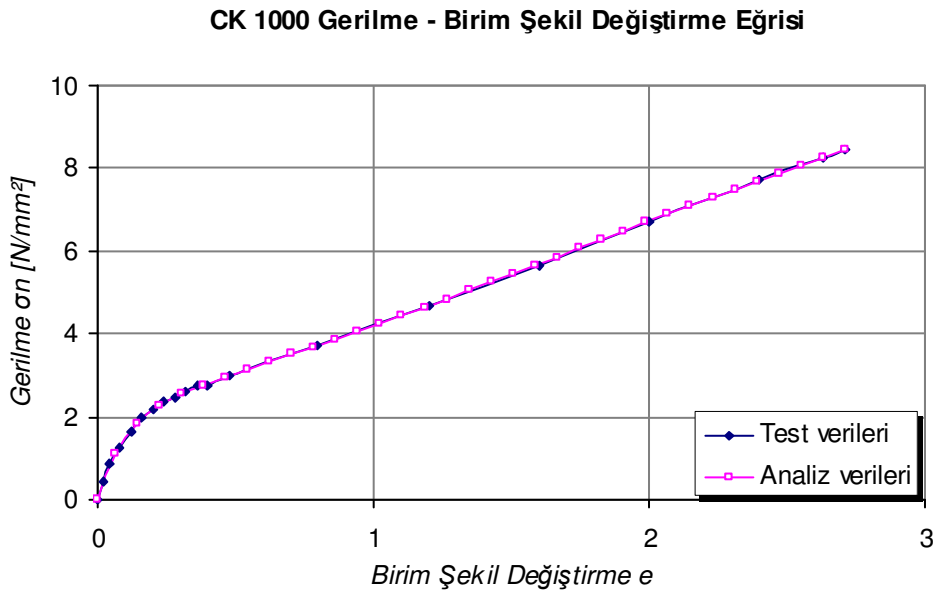


Şekil 6.5. CK 750 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme birim şekil değişirme grafiğinin karşılaştırılması

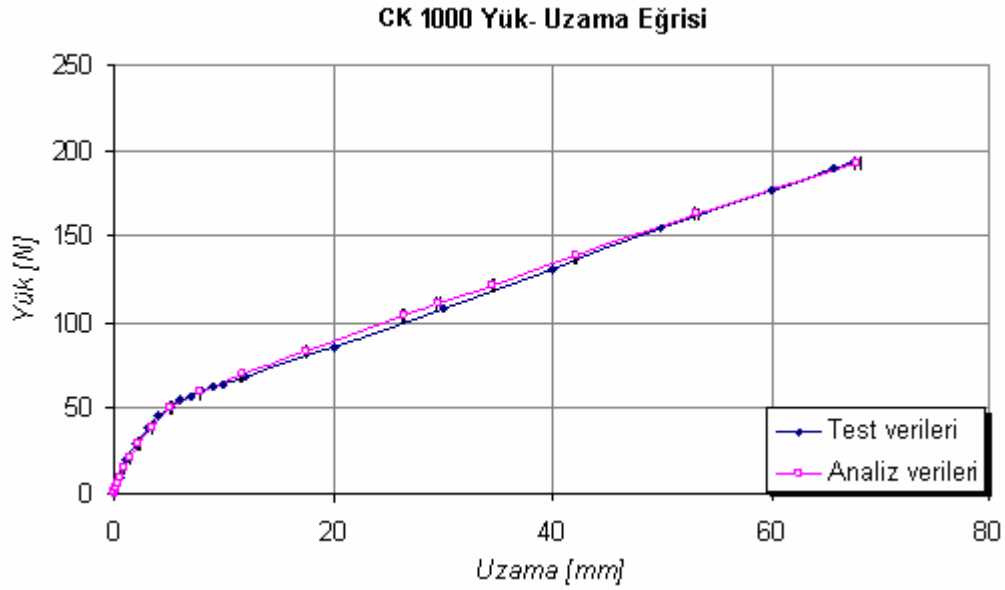


Şekil 6.6. CK 750 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması

6.4. CK 1000 Malzemelerinin Deney Sonuçları



Şekil 6.7. CK 1000 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değişirme grafiğinin karşılaştırılması

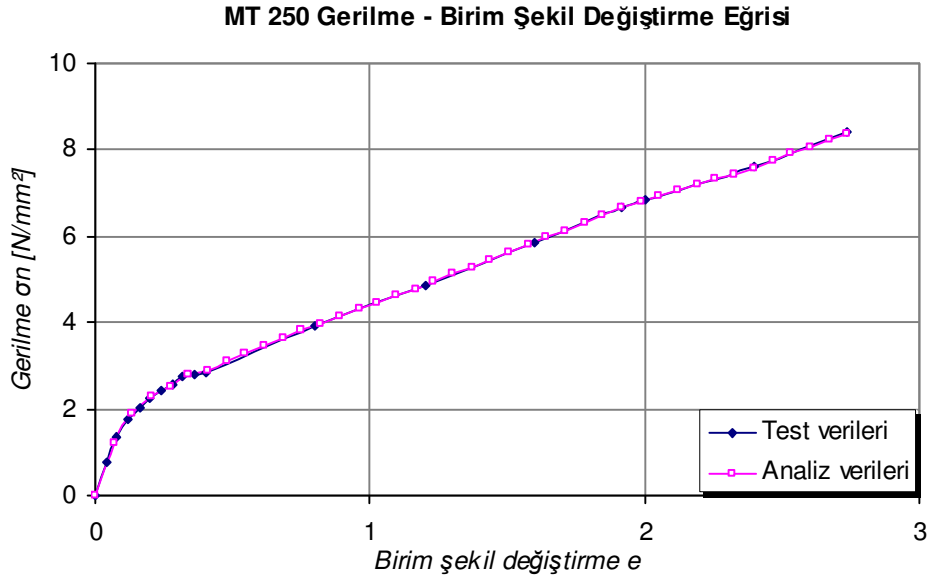


Şekil 6.8. CK 1000 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması

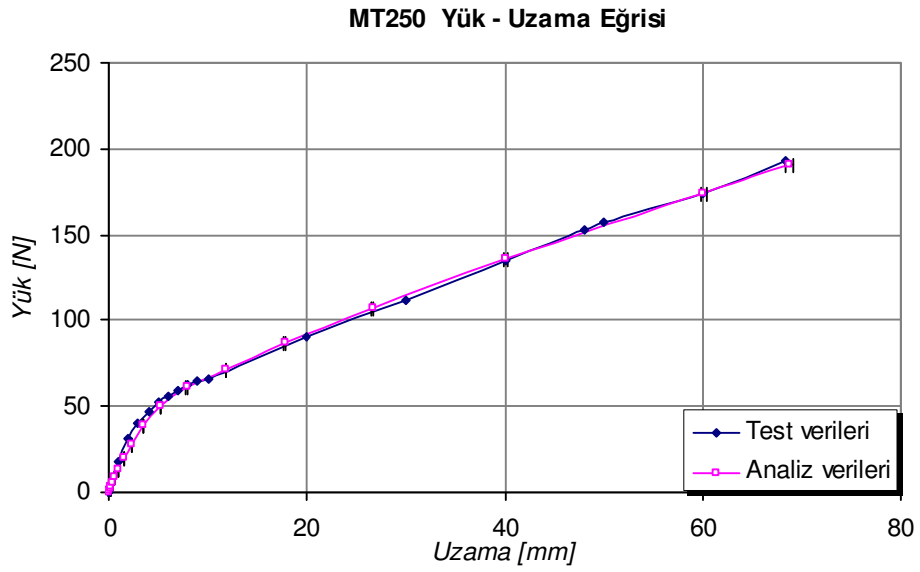
Cam küre dolgulu NR/SBR tipi elastomer esaslı kompozit malzemede çekme testi verileri ile Marlow formu analiz verilerindeki gerilme – uzama grafiği ve yük – uzama grafiği karşılaştırmaları yapılmış ve hata paylarının %0,25 ile %0,5 arasında olduğu görülmüştür.

Cam küre (CK) 250g, 500g, 750g, 1000g dolgulu malzemelerinin analiz verileri sırasıyla %0,5, %0,38, %0,25, %0,4 hata payı ile gerçeğe yakın bulunmuştur ve girilen veri sayıları sırasıyla 18, 19, 20 ve 20 dir. 3 Boyutlu gerilme analizi uygulanmıştır. CK malzemelerinde mesh sayısı 748, eleman türü Hex C3D20H (A20-node quadratic brick, hybrid, linear pressure).

6.5. MT 250 Malzemelerinin Deney Sonuçları

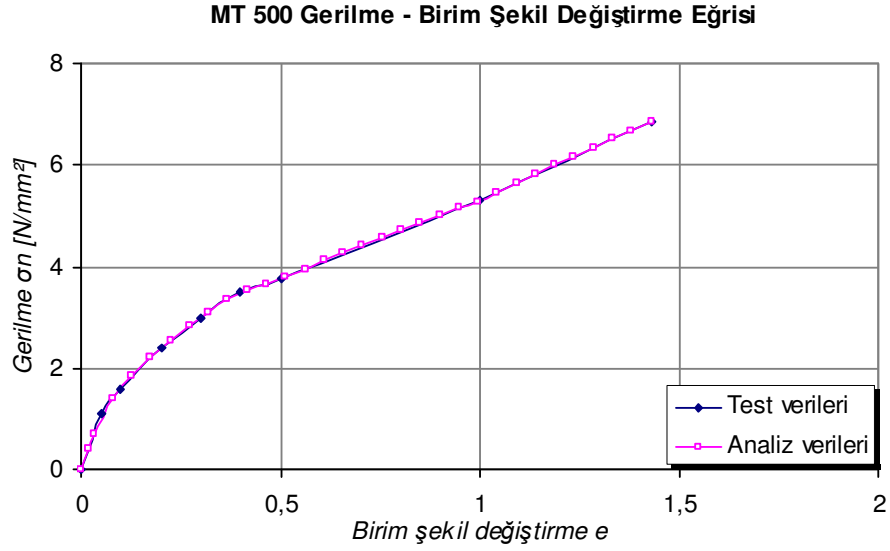


Şekil 6.9. MT 250 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değişirme grafiğinin karşılaştırılması

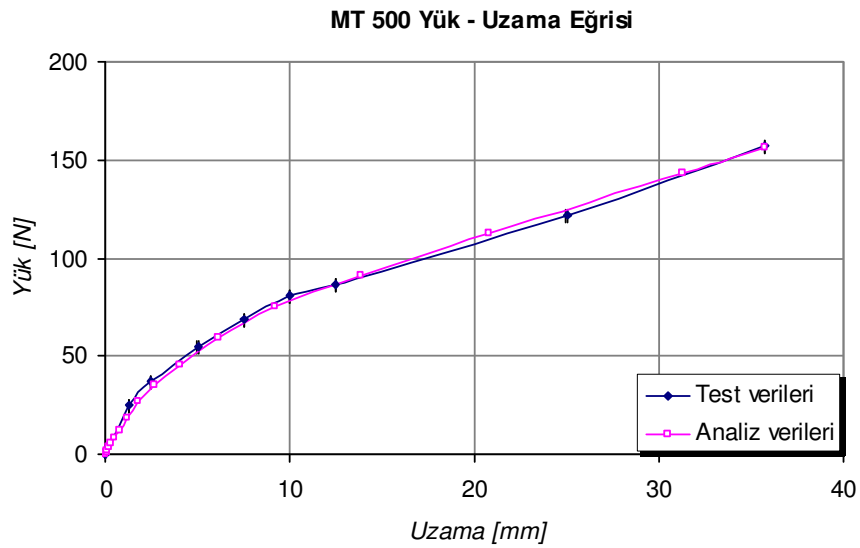


Şekil 6.10. MT 250 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması

6.6. MT 500 Malzemelerinin Deney Sonuçları

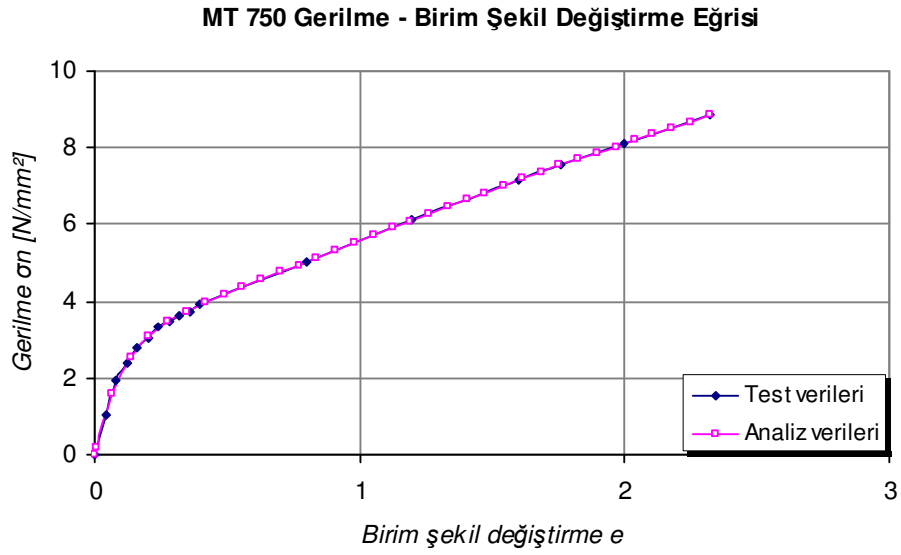


Şekil 6.11. MT 500 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin karşılaştırılması

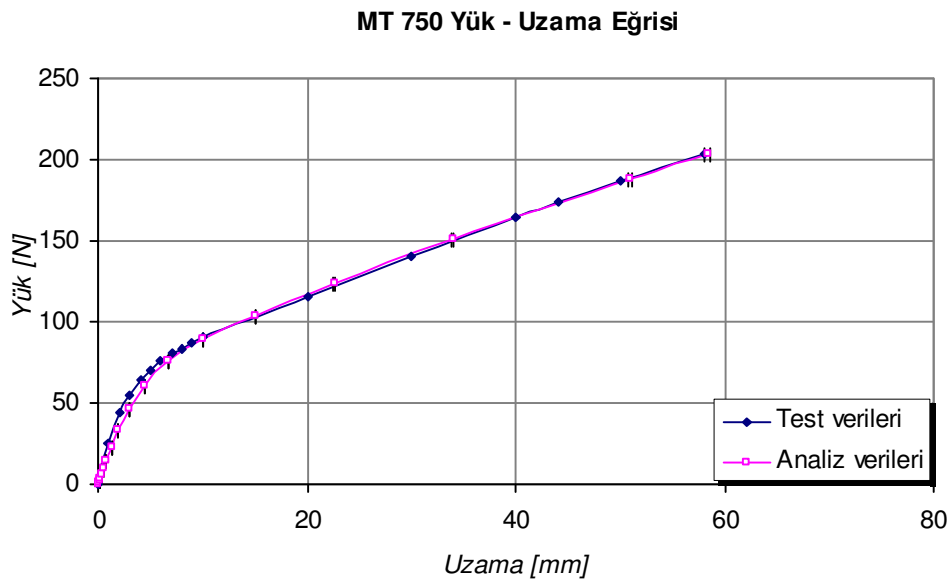


Şekil 6.12. MT 500 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması

6.7. MT 750 Malzemelerinin Deney Sonuçları

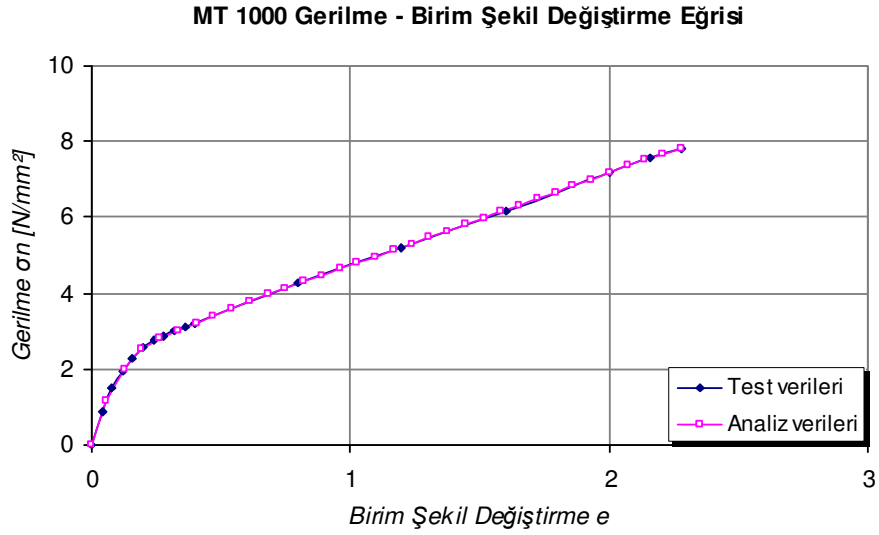


Şekil 6.13. MT 750 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değişirme grafiğinin karşılaştırılması

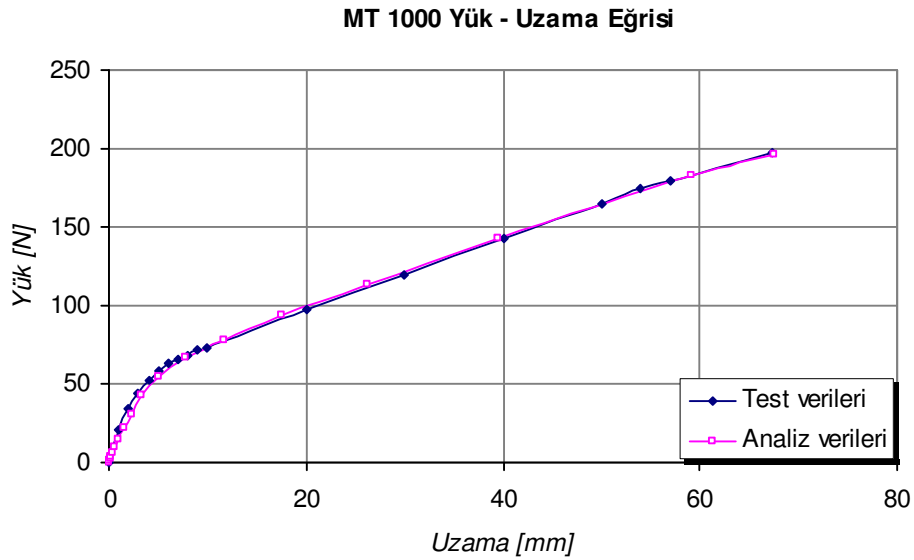


Şekil 6.14. MT 750 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması

6.8. MT 1000 Malzemelerinin Deney Sonuçları



Şekil 6.15. MT 1000 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değişirme grafiğinin karşılaştırılması

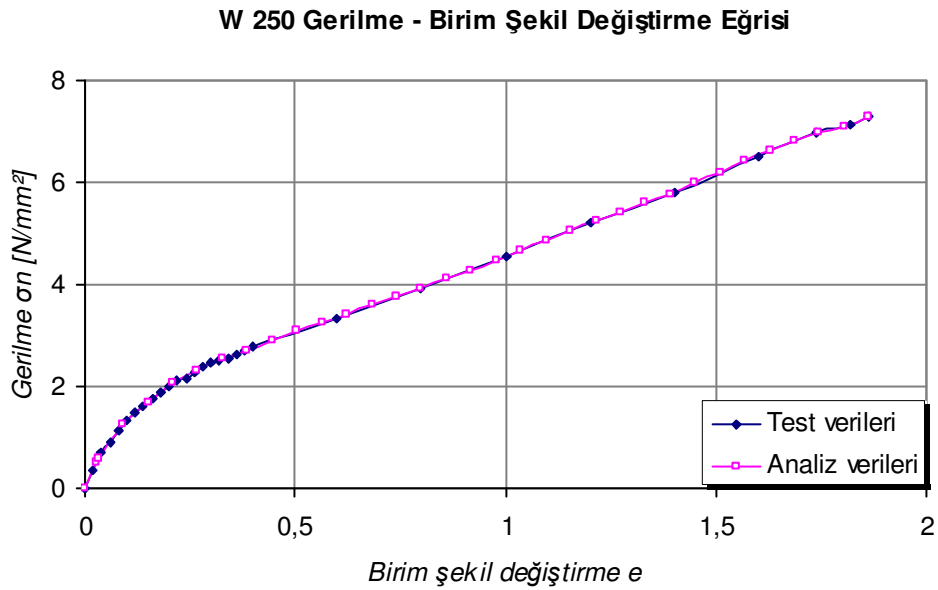


Şekil 6.16. MT 1000 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması

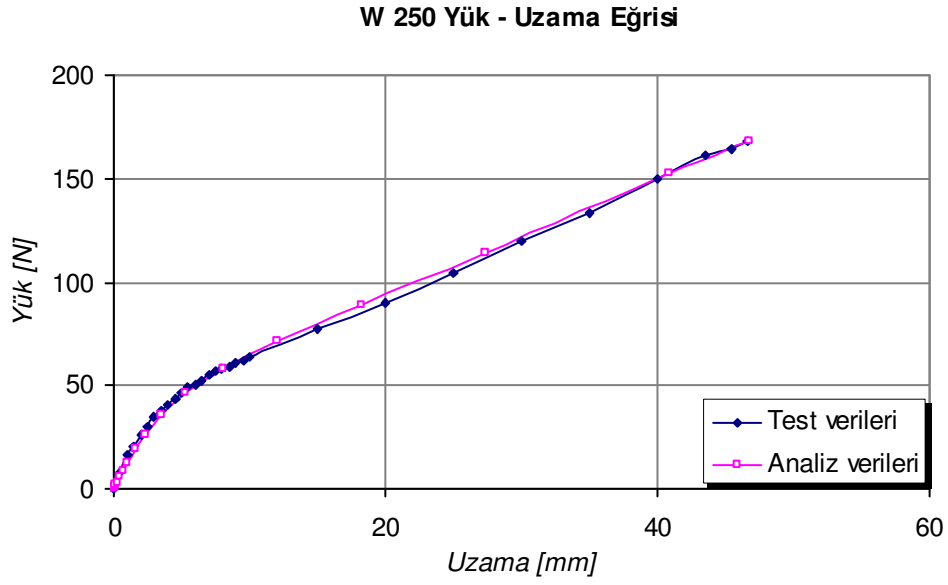
Mika tozu dolgulu NR/SBR tipi elastomer esaslı kompozit malzemede çekme deneyi (testi) verileri ile Marlow formu analiz verilerindeki gerilme – uzama grafiği ve yük – uzama grafiği karşılaştırmaları yapılmış ve hata paylarının %0,01 ile %0,5 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Mika tozu (MT) 250g, 500g, 750g, 1000g dolgulu malzemelerinin analiz verileri sırasıyla %0,5, %0,01, %0,36, %0,35 hata payı ile gerçeğe yakın bulunmuştur ve girilen veri sayıları sırasıyla 18, 25, 17 ve 17 dir. 3 Boyutlu gerilme analizi uygulanmıştır. MT malzemelerinde mesh sayısı 748, eleman türü Hex C3D20H (A20-node quadratic brick, hybrid, linear pressure).

6.9. W 250 Malzemelerinin Deney Sonuçları

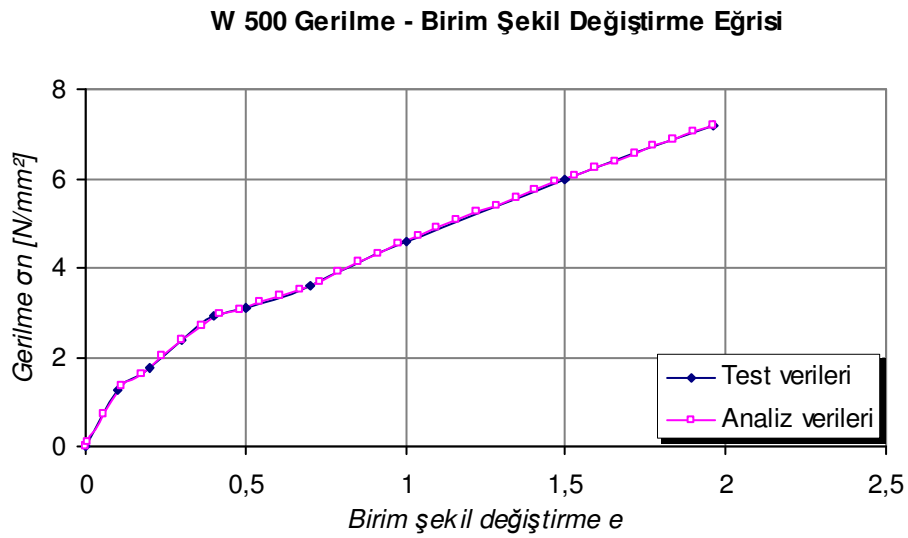


Şekil 6.17. W 250 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme- birim şekil değiştirme grafiğinin karşılaştırılması

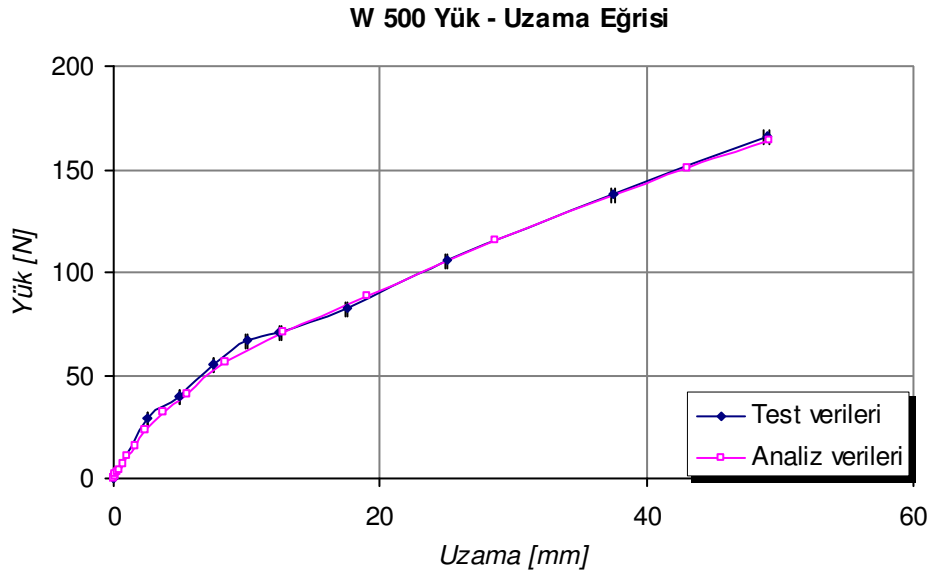


Şekil 6.18. W 250 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması

6.10. W 500 Malzemelerinin Deney Sonuçları

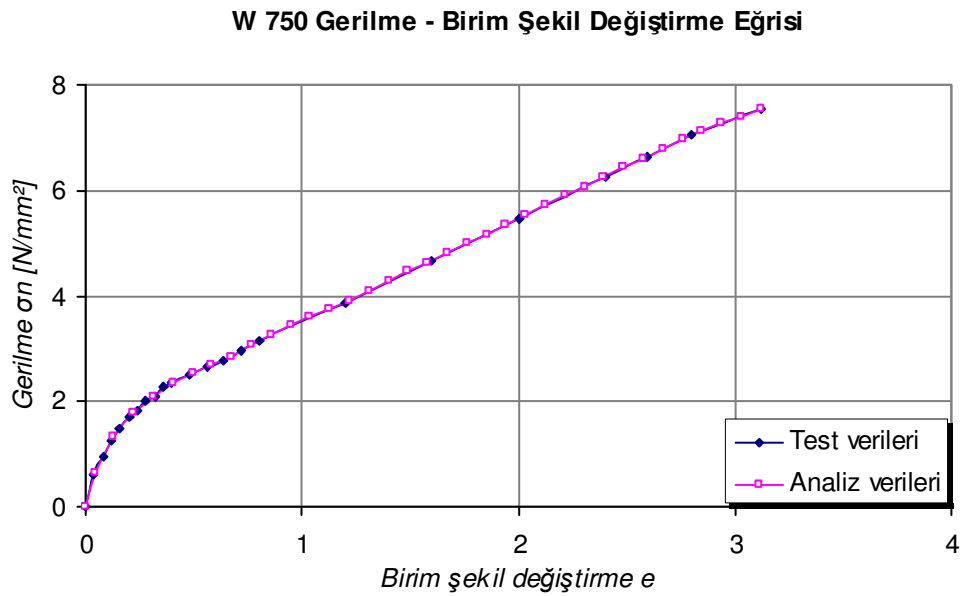


Şekil 6.19. W 500 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değişirme grafiğinin karşılaştırılması

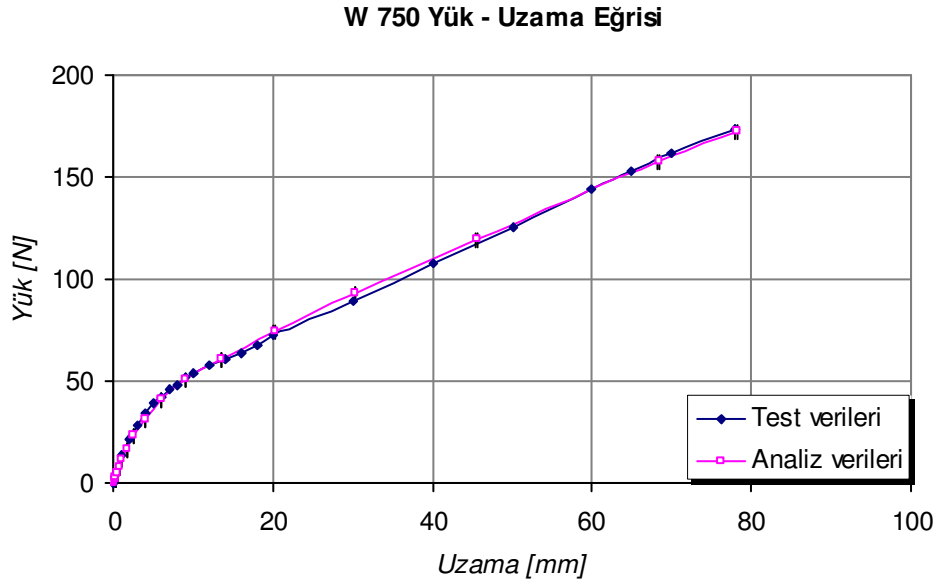


Şekil 6.20. W 500 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması

6.11. W 750 Malzemelerinin Deney Sonuçları

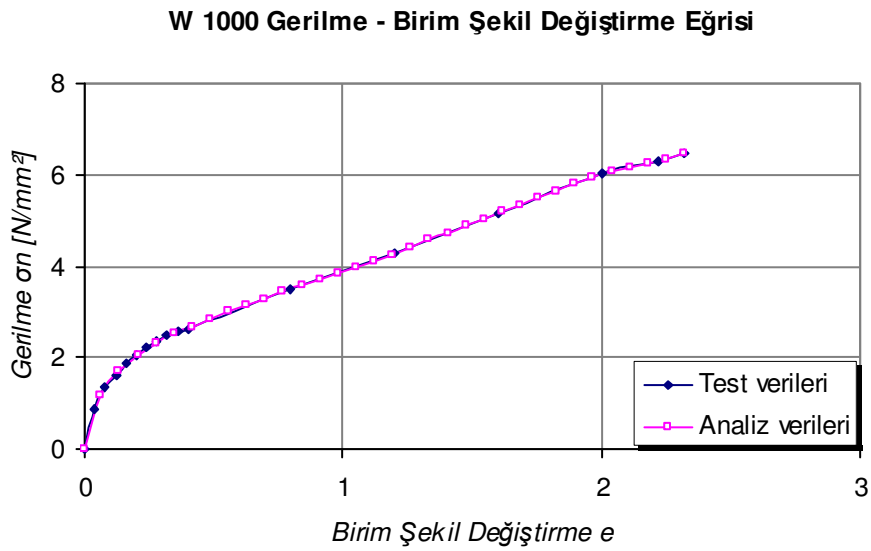


Şekil 6.21. W 750 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değişirme grafiğinin karşılaştırılması

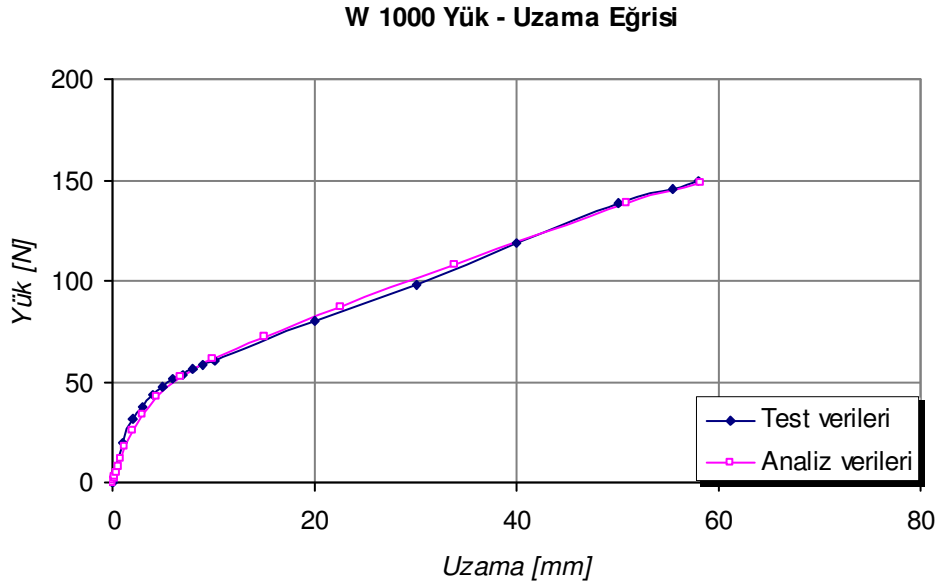


Şekil 6.22. W 750 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması

6.12. W 1000 Malzemelerinin Deney Sonuçları



Şekil 6.23. W 1000 malzemesinin Marlow formu analiz verileri ile çekme testi verilerindeki gerilme-birim şekil değişirme grafiğinin karşılaştırılması



Şekil 6.24. W 1000 malzemesinin çekme test verileriyle Analiz verilerindeki Yük – Uzama grafiğinin karşılaştırılması

Wollastonit dolgulu NR/SBR tipi elastomer esaslı kompozit malzemede çekme deneyi (testi) verileri ile Marlow formu analiz verilerindeki gerilme – uzama grafiği ve yük – uzama grafiği karşılaştırmaları yapılmış ve hata paylarının %0,2 ile %0,44 arasında olduğu görülmüştür.

Wollastonit (W) 250g, 500g, 750g, 1000g dolgulu malzemelerinin analiz verileri sırasıyla %0,44, %0,38, %0,2, %0,24 hata payı ile gerçeğe yakın bulunmuştur ve girilen veri sayıları sırasıyla 30, 19, 23 ve 17 dir. 3 Boyutlu gerilme analizi uygulanmıştır. W malzemelerinde mesh sayısı 748, eleman türü Hex C3D20H (A20-node quadratic brick, hybrid, linear pressure).

Hata payını etkileyen faktörler, mesh sayısı, node sayısı, eleman türü ve eleman sayısıdır. Bu faktörlerden biri olan mesh sayısı, daha da artırılarak mevcut hata oranlarını daha da küçültebilmek mümkündür.

Vahapoğlu [4], yapmış olduğu çalışmada karbon siyahı katılmış ve vulkanize edilmiş üç farklı numune kullanmıştır. Bu numunelerden ikisi, özel bir lastik firması

tarafından otomobil lastiğinin herhangi bir bölgesindeki karışımlardan dökülmüştür. Üçüncü numune ise otomobil iç lastiği malzemesinden hazırlanmıştır. Kauçuk türü bu malzemeleri eş-iki eksenli çekme deneylerine tabi tutmuştur. Sonlu elemanlar paket programına, elde edilen test verilerini girerek malzeme analizlerini yapmıştır. Deneyler sonunda Neo-Hooke malzeme modeli hariç diğer altı malzeme modelinin (Mooney-Rivlin, Signiorini, İkinci Dereceden İnvariant, Üçüncü Dereceden Deformasyon, Yeoh ve Üç Terimli Mooney-Rivlin) deneysel sonuçlarının üç numune için de çalışılan aralıkta iyi bir şekilde gerçekleştiğini gözlemlemiştir. Bizim çalışmamızda ise kauçuk türü malzemelerimiz tek eksenli çekme deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen test verileri sonlu elemanlar yöntemini kullanan paket programına girilip malzeme analizleri tamamlanmıştır. Bunun sonucunda Marlow modeli uygun olan form olarak belirlenip, analiz sonuçlarında reaksiyon kuvvetleri, gerilme, birim şekil değiştirme gibi değerler elde edilmiştir. Vahapoğlu'nun yapmış olduğu çalışmada [4] bizim çalışmamızda olduğu gibi, analiz sonucu elde edilen değerler gerçek deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış, kuvvet-uzama, gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri elde edilmiş ve sonuçların gerçeğe ne oranda yakın olduğu tespit edilmiştir. Vahapoğlu'nun çalışmasında [4], malzeme katsayılarının doğruluğu regresyon analizinde hesaplanan, eğrinin iyilik derecesini ifade eden R^2 terimiyle belirlenmiştir. Bu terimin 1'e yakın olması derecesinde test verileri ve analiz verilerinin uyumluluğunun arttığı söylenmektedir. Neo-Hooke malzeme modeli hariç diğer malzeme modellerinin 0,99 ile 0,96 arasında R^2 değerleri elde edilmiştir.

İslamoğlu [5], yapmış olduğu çalışmada ısı ışınımı problemlerini çözmek için sonlu elemanlarla çözüm yapan ANSYS yazılım programını kullanmıştır. ANSYS'ten elde ettiği sonuçları, analitik çözümle elde edilen değerlerle karşılaştırmıştır ve hata payının % 0,4'ten az olduğunu saptamıştır. Elde edilen sonuçlar ve hata oranı, ışınım problemlerinin sayısal çözümünde ANSYS yazılım programı kullanılmasının uygun olduğunu göstermiştir.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

NR/SBR tipi elastomer esaslı malzemenin farklı dolgu içerikli türlerinin çekme deneyine tabi tutularak elde edilen sonuçları, sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla karakterize edilmiştir. Bu analizlerin doğruluğu büyük ölçüde sonlu elemanlar paket programına girilen geometrik ve malzeme özellikleri ve yükleme durumunun gerçekliğine bağlı olmaktadır.

Yapılan çalışmanın ilk aşamasında NR+SBR kauçuk karışımı kompozit bir malzeme olan NR/SBR' den, aynı formülasyona %5,15 - %9,4 - %13,4 - %17,2 oranlarında yani 250g. - 500g. - 750g. – 1000g. ayrı ayrı cam küre, mika tozu ve wollastonit dolgu malzemesi ilave edilmiş elastomer karışımları ele alınmıştır. Alınan bu karışımlardan, TS 1398-2 ye göre çekme deneyi için papyon şeklinde numuneler hazırlanmıştır.

İkinci aşamada numuneler tek eksenli çekme deneyine tabi tutulmuştur. Deneylede her bir numunenin, uygulanan kuvvet altındaki uzaması ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar grafiklere aktarılarak karşılaştırılmıştır. Çekme değerleri Akçakale [16] nin bulduğu sonuçlar ile paralellik arz etmektedir.

Üçüncü aşamada çekme sonucunda elde edilen veriler ile gerilme ve uzama değerleri hesaplanmıştır. Programın ilk aşamasında numune modellenmiş ve Abaqus'te sonlu elemanlar analizinde malzemenin tanımlanması için malzeme özelliklerinin test edildiği "Material Evaluate" kısmına bu değerler girilmiştir. Girilen değerler ile İkinci dereceden Polynomial malzeme formu, Üçüncü dereceden Ogden malzeme formu, Birinci dereceden Reduced Polynomial (Neo-Hooke) malzeme formu, Üçüncü dereceden Reduced Polynomial (Yeoh) malzeme formu, Arruda-Boyce

malzeme formu, Van Der Waals malzeme formu ve Marlow malzeme formlarındaki katsayıları elde etmek için teste tabi tutulmuştur. Her bir numune için elde edilen malzeme modellerine ait Gerilme (σ_n), Birim şekil değiştirme (e), Yük (F)-Uzama (L) grafikleri çizilerek, test verileri ile kullandığımız analiz programından elde edilen analiz verileri karşılaştırılmıştır.

Yedi farklı malzeme formunun ele alındığı bu çalışmada, malzememize uygun olan formların Birinci dereceden Reduced Polynomial (Neo-Hooke), Üçüncü dereceden Reduced Polynomial (Yeoh), Arruda-Boyce ve Marlow malzeme modeli olduğu tespit edilmiştir. Diğer formlarda ise bazı sınırlamaların söz konusu olduğu görülmüştür. Malzememiz için uygun olan formlar arasından Marlow formu seçilmiştir. Çünkü yalnızca bir test veri seti (tek eksenli, eş iki eksenli ya da düzlemsel test verisi) mevcut olduğu zaman, literatürde Marlow formunun kullanılması önerilmiştir [37].

Yapılan çalışmamızda Cam küre (CK) dolgulu malzemelerde analiz sonucunda hata payları yaklaşık % 0,25 – 0,5, Mika tozu (MT) için yaklaşık % 0,01 – 0,5, Wollastonit (W) için ise yaklaşık %0,2 – 0,44 arasında olduğu tespit edilmiştir.

7.2. Öneriler

- 1) Yapılan çalışmalar oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Farklı sıcaklıklarda çalışmalar yapılarak kauçuk türü malzemelerin davranışı incelenebilir. Malzeme karakteristiklerinin daha doğru değerler vermesi için ve özellikle kauçuk türü malzemelerin farklı sıcaklıklardaki çalışma şartlarına uygun tasarım analizleri için önemlidir.
- 2) Çalışmamızda numuneler yalnızca tek eksenli çekme deneyine tabi tutulmuştur. Sonraki çalışmalarda eş iki eksenli, düzlemsel ve hacimsel çekme ve basma deneyleri yapılarak malzeme karakteristiğinin daha kolay ve kesin değerler vermesinde yardımcı olabilir.

- 3) Malzeme numuneleri, farklı mekanik deneylere tabi tutularak daha fazla veri elde edilebilir ve deney sonuçları analiz programı yardımıyla karşılaştırılarak tespit edilen malzeme katsayılarının doğruluğu olumlu yönde etkilenir.
- 4) Aşınma deneyi yapılarak sürtünme katsayısı belirlenebilir ve karakteristik değerlere katkıda bulunulabilir.
- 5) Sonlu Elemanlar Metodu ile malzemelerin temas analizleri yapılarak çeşitli çalışma şartları için sınanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] KARATAŞ, A., Elastomer Malzemelerin Statik ve Dinamik Özellikleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2001.
- [2] <http://www.kaucuk.org>, Nisan, 2008.
- [3] SAVAŞÇI, Ö.T., UYANIK, N., AKOVALI, G., Ana Hatları ile Plastikler ve Plastik Teknolojisi, Çantay Kitabevi, İstanbul 1998.
- [4] VAHAPOĞLU, V., Kauçuk Türü Malzemelerin Malzeme Sabitlerinin Eş-İki Eksenli Çekme Deneyi İle Belirlenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon, 1998.
- [5] İSLAMOĞLU, Y., Sonlu Eleman Yöntemiyle Isı Işınımı Problemlerinin Çözümü, İ.T.Ü., Y.Lisans Tezi, İstanbul, 1997.
- [6] MALAC, J., Initial Tensile Behaviour of Elastomers, Polymer Testing 25, 650-655, 2006.
- [7] SMITTHIPONG, W., NARDIN, M., SCHULTZ, J., SUCHIVA, K., Adhesion And Self-Adhesion of Rubbers, Crosslinked By Electron Beam Irradiation, International Journal of Adhesion & Adhesives 27, 352-357, 2007.
- [8] BERGSTRÖM, J.S., BOYCE, M.C., Large Strain Time-Dependent Behavior of Filled Elastomers, Mechanics of Materials 32, 627-644, 2000.
- [9] KARADERELİGİL, S., Bir Çekme Deney Cihazının Tasarımında Konstrüktif Yenilikler, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, Sakarya, 1997.
- [10] MISIRLIOĞLU, K. M., CTP Malzemelerde Cam Elyaf Takviyenin Mekanik Özelliklere Etkisi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi Sakarya, 1996.
- [11] ADIGÜZEL, M., Bir Laboratuvar Çekme Cihazının Tasarımı, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, Sakarya, 1997.
- [12] ÖZGİRGİN, M.C., Sürekli Elyaf Sarım Teknolojisi İle Üretilen Cam Elyaf Takviyeli Plastik Kompozitlerin Kısa Ve Uzun Dönemli Performanslarının

- İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya, 2001.
- [13] VAHAPOĞLU, V., Kauçuk Türü Malzemelerin İnelastik Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, 2006.
- [14] MEVLAT, A., Doğal Kauçuk Kompozit Sistemlerinin Hibrit Takviyesi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2000.
- [15] ÇIRA, A., Zwick Çekme Deney Cihazının Parametrelerinin Belirlenmesi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli, 1998.
- [16] AKÇAKALE, N., NR/SBR Tipi Elastomer Esaslı Ayakkabı Taban Malzemelerinin Mekaniksel Özelliklerine Bazı Dolgu Maddelerinin Etkilerinin İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya, 2008.
- [17] BAŞBUDAK, SENRES, M., Isıyla Oluşan Plastikler ‘Termosetler’, Plastik ve Ambalaj Teknolojisi Dergisi, Sf. 66-70, Mart 1997.
- [18] SAÇAK, M., Polimer Teknolojisi, Gazi kitapevi, Ankara, Ağustos 2005.
- [19] [http:// www.remexport.com](http://www.remexport.com), Nisan, 2008.
- [20] <http://www.okks.com.tr>, Nisan, 2008.
- [21] TAŞDEMİR, M., Nitril Kauçuk (NBR), Plastik ve Ambalaj Teknolojisi Dergisi, Sf. 54-59, Ocak 1992.
- [22] ŞEN, C., Kauçuk Teknolojisi -1, Kauçuk Derneği, 1989.
- [23] GÜRER, Ç., Termoplastik Elastomerler: Yapı ve Özellikleri, Plastik ve Ambalaj Teknolojisi Dergisi, Sf. 10-12, Mart 1996.
- [24] ANONİM, Termoplastik Kauçuk, PAGEV Plastik Dergisi, Sf.82-91, Kasım-Aralık 1999.
- [25] CÖBEK, M., EZDEŞİR, A., ERBAY, E., TAŞKIRAN, İ., YAĞCI, M. A., BİLGİÇ, T., PAGEV Yayınları, Polimerler 1, Petkim Araştırma Merkezi, İstanbul 1999.
- [26] SİREL, T., Kloropren Kauçukların Karışım Özellikleri, Plastik Ve Ambalaj Teknolojisi Dergisi, Sf. 43-44, Kasım 1998.
- [27] ANONİM, Therban/Tornac (HNBR) Otomotiv Endüstrisinde Geleceğin Elastomeri, Plastik Ve Ambalaj Teknolojisi Dergisi, Sf. 17-18, Ocak 1992.

- [28] DEMİRKIRAN, E., Polimerlerde Dolgu Maddesi Olarak Kullanılan Silikat Bileşikleri, PAGEV Plastik Dergisi, Sayfa 156-162, İstanbul, Kasım Aralık 2005.
- [29] ANONİM, Plastiklerde Kullanılan Dolgu ve Takviye Malzemeleri, Plastik ve Ambalaj Teknolojisi Dergisi, Eylül 1996.
- [30] <http://www.fetasmetalurji.com>, Nisan, 2008.
- [31] <http://www.metalurji.org.tr>, Nisan, 2008.
- [32] <http://www.maden.org.tr>, Nisan, 2008.
- [33] BROWN, R., Physical Testing of Rubber, Springer Science-I-Business Media, Inc., Printed in The United States of America., Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2006.
- [34] <http://www.testometric.co.uk>, Nisan, 2008.
- [35] ANONİM, Kauçuğun Lisansı, Plastik Ve Ambalaj Teknolojisi Dergisi, Sayı: 4-5, Sf. 7, Ağustos 1992.
- [36] ANONİM, Kauçuğun Lisansı, Plastik Ve Ambalaj Teknolojisi Dergisi, Sayı: 3, Sf. 5-8, Ocak 1992.
- [37] Abaqus 6.7.1. Documentation, 2008.
- [38] KÖKSAL, E., KÖKSAL, M. K., Kabuk Ve Plakların Statik Stabilite ve Dinamik Analizi Örnek Çözümler ve Tablolar, Çevik Matbaacılık Literatür Yayıncılık 1.Baskı, İstanbul, Ekim 2003.
- [39] NASCHIE, M. S. E., Stress, Stability And Chaos In Structural Engineering: An Energy Approach , Mcgraw-Hill Book Company (Uk), Newyork Usa, 1990.
- [40] <http://serc.carleton.edu>, Nisan, 2008
- [41] DEMİRER, A., SOYEL D., Plastiklere Katılan Mukavemet Arttırıcı Katkı Maddeleri, Sayı: 126, Sf. 130-136, Haziran 2007. Plastik Ve Ambalaj Teknolojisi Dergisi

ÖZGEÇMİŞ

Deniz SOYEL, 23.03.1982 yılında Sakarya'da doğdu. İlkokulu Mehmet Akif Ersoy İlkokulu'nda, Ortaokul ve Lise öğrenimini Sakarya İmam Hatip Lisesi'nde tamamladı.

2002 yılında Sakarya Üniversitesi Hendek Meslek Yüksekokulu Bilgisayar Destekli Tasarım bölümünü bitirdi.

2003 yılında DGS ile kazandığı Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Tasarım ve Konstrüksiyon Öğretmenliği'nden 2006 yılında mezun oldu.

2006 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Bölümü'nde yüksek lisansı kazandı ve halen Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Bölümü'nde yüksek lisans öğrencisi olarak öğrenimine devam etmektedir.