

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

**TARIMSAL İLAÇLAMADA TÜP TİPİ LİNEER
SENKRON MOTOR İLE PÜSKÜRTÜCÜ YÜKSEKLİK
KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Ahmet ILICA

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR
EĞİTİMİ**
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ali Fuat BOZ

Aralık 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARIMSAL İLAÇLAMADA TÜP TİPİ LİNEER
SENKRON MOTOR İLE PÜSKÜRTÜCÜ YÜKSEKLİK
KONTROLÜ

DOKTORA TEZİ

Ahmet ILICA

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRONİK VE
BİLGİSAYAR EĞİTİMİ

Bu tez 13 / 12 /2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
İbrahim ÖZSERT
Jüri Başkanı



Prof. Dr.
Ali Fuat BOZ
Üye



Prof. Dr.
Rüştü GÜNTÜRKÜN
Üye



Doç. Dr.
Cüneyt BAYILMIŞ
Üye



Doç. Dr.
Sezgin KAÇAR
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ahmet ILICA

13/12/2018

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini aldığım, araştırma çalışmasının tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen ve beni yönlendiren tez danışmanım Prof. Dr. Ali Fuat Boz'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez İzleme Komitesi toplantılarında, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım Prof. Dr. İbrahim ÖZSERT ve Doç.Dr. Cüneyt BAYILMIŞ'a teşekkür ederim. Tez çalışmamdaki çok değerli katkılarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Ferhat YILDIRIM'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince her zaman gösterdiği anlayış ve desteği için eşim Nurdan'a ve kendilerine zaman ayıramadığım çocuklarım İlayda, Erva ve Berat'a teşekkür ederim. Ayrıca üzerimde büyük emekleri olan annem ve babama teşekkür ederim.

Bu çalışma da kullanılan sistemin temin edilmesinde maddi açıdan destek sağlayan Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2013-25) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
BÖLÜM 3.	
MATERYAL.....	31
3.1. Laboratuvar Deney Düzenegi	31
3.1.1. Konveyör bant sistemi.....	32
3.1.2. Ultrasonik mesafe sensörleri	33
3.1.3. Veri algılama kartı	33
3.1.4. Sabit mıknatıslı tüp tipi lineer senkron motorlar.....	34
3.1.5. Servo sürücü.....	39
3.1.5.1. Yamuk/üçgen hareket profili	40
3.2. Arazi Çalışması Deney Düzenegi	43
3.2.1. Suya Duyarlı Kağıtlar.....	44

BÖLÜM 4.	
YÖNTEM.....	46
4.1. Simülasyon Modeli.....	46
4.2. Laboratuvar Deneyleri.....	52
4.2.1. Ultrasonik mesafe sensörü kalibrasyonu.....	55
4.2.2. Sensör ayrı konumlu laboratuvar çalışması.....	56
4.2.3. Sensör üst konumlu laboratuvar çalışması.....	58
4.2.3.1. PID kontrol.....	59
4.2.3.2. Püskürtücü sistemin PID kontrolü.....	67
4.2.3.3. Bulanık PID kontrol.....	68
4.2.3.4. Püskürtücü sistemin Bulanık PID kontrolü.....	73
4.3. Arazi Deneyleri.....	78
BÖLÜM 5.	
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	82
5.1. Simülasyon Çalışması Bulguları.....	82
5.2. Laboratuvar Deneyleri Bulguları.....	88
5.2.1. Sensör ayrı konumlu laboratuvar deneyleri.....	89
5.2.2. Sensör üst konumlu laboratuvar deneyleri.....	95
5.2.2.1. PID kontrol sonuçları.....	95
5.2.2.2. Bulanık PID kontrol sonuçları.....	102
5.2.3. Laboratuvar deneylerinden elde edilen bulguların karşılaştırılması.....	108
5.3. Arazi Deneyleri Bulguları.....	112
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	122
KAYNAKLAR.....	125
EKLER.....	137
ÖZGEÇMİŞ.....	150

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ANOVA	: Varyans analizi
CV	: Varyasyon katsayısı
DAQ	: Veri toplama kartı
GPS	: Küresel konumlama sistemi
NdFeB	: Neodyum-demir-bor
PID	: Oransal integral türevsel
PMTLSM	: Sabit mıknatıslı tüp tipi lineer senkron motor
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu
RMS	: Kare ortalama karekök
WSP	: Suyu duyarlı kâğıt

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Bom püskürtücü için püskürtme yüksekliği kontrolünün şematik diyagramı	11
Şekil 2.2. Püskürtücü bumu ve elektronik devre	12
Şekil 2.3. Laboratuvar püskürtme testleri	13
Şekil 2.4. Ölçüm ekipmanı ve düzenlemesi	14
Şekil 2.5. Bum üzerine monte edilmiş sensörler ve şematik gösterim.....	16
Şekil 2.6. Hareketli test platformu	16
Şekil 2.7. Otomatik bum yükseklik kontrol sistemi prensip şeması ve test tezgahının hedef alan birimi	17
Şekil 2.8. Yükseklik kontrol modunda, en iyi ve en kötü yükseklik kontrol sistemi için, hedef alanın (profil) ve sol yan yükseklik sensörünün pozisyonundaki püskürtme bumunun yer değiştirmeleri birimi.	18
Şekil 2.9. Yavaş aktif pendulum ve kablolu süspansiyon	19
Şekil 2.10. Pendulum tip aktif bum sistemi.	20
Şekil 2.11. İki kollu hidrolik silindirle tahrik edilen aktif bum sistemi.	21
Şekil 2.12. Bum dengeleme sistemi blok diyagramı.....	21
Şekil 2.13. Prototip bum sistemi genel görünümü	22
Şekil 2.14. Hidrolik silindirle tahrik edilen üç sensörlü aktif bum sistem.	23
Şekil 2.15. Bum püskürtücü seviye dengeleme sisteminin prototipi	24
Şekil 2.16. Bom bölümlerinin şeması	25
Şekil 2.17. Ticari olarak geliştirilmiş bum yükseklik kontrol sistemi şematik gösterimi ve resmi.	26
Şekil 2.18. Çeyrek araç modeli aktif süspansiyon deney düzeneği	27
Şekil 2.19. Aktif süspansiyonlu çeyrek araç modeli.....	28
Şekil 3.1. Püskürtücü yükseklik kontrol sistemi laboratuvar deney düzeneği.....	32

Şekil 3.2. Oluklu statorlu dönen motordan doğrusal stator oluşumu ve dönen sabit mıknatıslı rotordan tüp şeklindeki doğrusal konfigürasyonun elde edilmesi.....	36
Şekil 3.3. PMTLISM'nin yapısı.....	39
Şekil 3.4. PMTLISM yamuk/üçgen hareket profili (25 cm yerdeğiştirme için, 2,3 m/s hız, 20 m/s ² ivme).....	42
Şekil 3.5. Farklı ivme değerleri için yamuk/üçgen hareket profili için yerdeğiştirme (Referans girişi, 0.45 Hz kare dalga sinyal).....	43
Şekil 3.6. Arazi çalışması deney düzeneği.....	43
Şekil 3.7. Arazi deney düzeneği parçaları.....	44
Şekil 3.8. Arazi deneylerinde kullanılan suya duyarlı kağıt püskürtme sonrası görünümü	45
Şekil 4.1. Rotor hareket yönüne göre kuvvetler.....	50
Şekil 4.2. PMTLISM sisteminin simülasyon modeli şematik gösterimi	50
Şekil 4.3. İki fazlı PMTLISM alan yönlendirmeli kontrolü Simulink simülasyon modeli.....	51
Şekil 4.4. Püskürtücü yükseklik kontrol sistemi işaret akışı blok şeması.....	52
Şekil 4.5. Ultrasonik mesafe sensörü kalibrasyon karakteristiği	55
Şekil 4.6. Sensör ayrı konumlu deney düzeneği şematik gösterimi.....	56
Şekil 4.7. Yüksekliğe göre servo sürücünün analog kontrol sinyal karakteristiği.....	57
Şekil 4.8. Sensör üst konumlu deney düzeneği şematik gösterimi	58
Şekil 4.9. Kapalı çevrim kontrol sistemi.....	59
Şekil 4.10. Tipik bir kapalı çevrim basamak cevabı.	61
Şekil 4.11. Yamuk yaklaşımı ile sayısal integral işlemi.	65
Şekil 4.12. Sayısal türev işlemi.	66
Şekil 4.13. PID kontrolör ayar osilasyon grafiği.....	67
Şekil 4.14. Basit bir bulanık mantık sistem yapısı	68
Şekil 4.15. Bulanık PID kontrolör blok gösterimi	72
Şekil 4.16. Kapalı çevrim Bulanık PID kontrolör sistemi yapısı.....	73
Şekil 4.17. Kural tablosu için çıkışlar	75
Şekil 4.18. Hata ve hatanın değişiminin üçgen üyelik fonksiyonu ile gösterimi...	75

Şekil 4.19. Arazi çalışmaları traktör adaptasyon platformu şematik gösterimi	78
Şekil 4.20. Traktör hızının ölçülmesi	79
Şekil 5.1. Dört farklı konveyör hızı ve üç farklı PMTLSM ivmesi için simülasyon modeli ve yükseklik kontrol deney sisteminin referansı izleme performansları.....	83
Şekil 5.2. Dört farklı hız değeri için PMLSM ivmesi sınırlandırılmadığında motor akım değerlerinin simülasyon sonuçları	84
Şekil 5.3. İlerleme hızı 2 km/h iken iki farklı PMTLSM ivmesi için motor akımlarının simülasyon ve deney sonuçları	85
Şekil 5.4. İlerleme hızı 4 km/h iken iki farklı PMTLSM ivmesi için motor akımlarının simülasyon ve deney sonuçları	86
Şekil 5.5. Farklı ilerleme hızlarında, PMTLSM ivmesi ve RMS akımı arasındaki ilişkinin simülasyon ve deney sonuçları	87
Şekil 5.6. Toplam yol boyunca püskürtücü ve yapay bitkiler arasında ölçülen mesafe (yapay bitki profili).....	88
Şekil 5.7. Sensör ayrı konumlu çalışmada püskürtücü yükseklik kontrolü	90
Şekil 5.8. Sensör ayrı konumlu çalışmada PMTLSM ivmesi ve konveyör hızı ile CV arasındaki ilişki.....	91
Şekil 5.9. Sensör ayrı konumlu çalışmada PMTLSM ivmesi ve konveyör hızı ile PMTLSM RMS akımı arasındaki ilişki	93
Şekil 5.10. Sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında püskürtücü yükseklik kontrolü	96
Şekil 5.11. Sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında PMTLSM ivmesi ve konveyör hız ile CV arasındaki ilişki.....	97
Şekil 5.12. Sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında PMTLSM ivmesi ve konveyör hızı ile PMTLSM RMS akımı arasındaki ilişki	100
Şekil 5.13. Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol çalışmasında püskürtücü yükseklik kontrolü.....	103
Şekil 5.14. Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol çalışmasında PMTLSM ivmesi ve konveyör hızı ile CV arasındaki ilişki	104

Şekil 5.15. Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol çalışmasında PMTLISM ivmesi ve konveyör hızı ile PMTLISM RMS akımı arasındaki ilişki.....	106
Şekil 5.16. Laboratuvar deneylerinde uygulanan üç farklı kontrol yöntemi için, PMTLISM ivmesi ve CV arasındaki ilişki.....	109
Şekil 5.17. Laboratuvar deneylerinde uygulanan üç farklı kontrol yöntemi için, PMTLISM ivmesi ve PMTLISM RMS akımı arasındaki ilişki	111
Şekil 5.18. Arazi deneyleri referans bitki profili.....	113
Şekil 5.19. Simülasyonun modelinin üç farklı hız değeri için, arazi bitki profilini izleme performansı.....	114
Şekil 5.20. Arazi bitki profili için üç farklı hız değerinde simülasyon modeli PMTLISM RMS akımları.....	114
Şekil 5.21. Simülasyonun modelinin üç farklı hız değeri için arazi bitki profilini izleme performansı.....	115
Şekil 6.1. Gerçek bir ilaçlama makinası üzerinde geliştirilmesi önerilen püskürtücü yükseklik kontrol sistemi.....	124

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Doğrusal aktüatör olarak hidrolik sistemlerin ve tüp tipi lineer motorların karşılaştırılması	37
Tablo 3.2. PMTLSM parametreleri.....	39
Tablo 4.1. Oransal, integral ve türev parametreleri artışının sistem cevabına etkisi	62
Tablo 4.2. Frekans cevabına dayalı Ziegler-Nichols ayarlama kuralları	63
Tablo 4.3. Püskürtücü yükseklik sistemi bulanık kontrolör kural tablosu.....	75
Tablo 5.1. Sensör ayrı konumlu çalışmada CV değerlerine ilişkin varyans analizi sonuçları.....	91
Tablo 5.2. Sensör ayrı konumlu çalışmada CV ortalama değerleri ve önem derecesi grupları	92
Tablo 5.3. Sensör ayrı konumlu çalışmada ortalama yükseklik değerleri	93
Tablo 5.4. Sensör ayrı konumlu çalışmada PMTLSM RMS akım ortalama değerlerine ilişkin varyans analizi sonuçları	94
Tablo 5.5. Sensör ayrı konumlu çalışmada PMTLSM RMS akımının ortalama değerleri ve önem derecesi grupları	95
Tablo 5.6. Sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında CV ortalama değerlerine ilişkin varyans analizi sonuçları	97
Tablo 5.7. Sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında CV ortalama değerleri ve önem derecesi grupları	98
Tablo 5.8. Sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında ortalama yükseklik değerleri.....	99
Tablo 5.9. Sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında PMTLSM RMS akım ortalama değerlerine ilişkin varyans analizi sonuçları	100
Tablo 5.10. Sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında PMTLSM RMS akımının ortalama değerleri ve önem derecesi grupları	101

Tablo 5.11. Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol çalışmasında CV ortalama değerlerine ilişkin varyans analizi sonuçları	104
Tablo 5.12. Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol çalışmasında CV ortalama değerleri ve önem derecesi grupları	105
Tablo 5.13. Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol çalışmasında ortalama yükseklik değerleri	106
Tablo 5.14. Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol çalışmasında PMTLSTM RMS akım ortalama değerlerine ilişkin varyans analizi sonuçları.....	107
Tablo 5.15. Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol çalışmasında PMTLSTM RMS akım ortalama değerleri ve önem derecesi grupları.....	107
Tablo 5.16. Arazi deneylerinde farklı ilerleme hızları için püskürtücü yüksekliğinin ortalama ve CV değerleri.....	116
Tablo 5.17. Arazi deneylerinde ıslak alan ortalaması ve farklı ilerleme hızları için dağılım düzgünlüğü.....	118

ÖZET

Anahtar kelimeler: Tarımsal ilaçlama, püskürtücü yükseklik kontrolü, sabit mıknatıslı tüp tipi lineer senkron motor

Tarımsal ilaçlama işleminde, püskürtme yüksekliğini doğru değerde tutmak ilaç sürüklenmesini azaltmakta ve hedef bitki üzerinde eşit dağılımlı ilaç birikimi sağlamaktadır. Bu çalışmada, üçgen hareket profiline sahip sabit mıknatıslı tüp tipi lineer senkron motor (PMTLSM) kullanılarak püskürtücü (nozül) ile bitki arasındaki yüksekliği ayarlayabilen bir tarımsal ilaçlama yükseklik kontrol sistemi geliştirilmiştir. Sistemde, ultrasonik mesafe sensöründen gelen yükseklik bilgisine bağlı olarak, püskürtücü yüksekliği ayarı PMTLSM tarafından gerçekleştirilmektedir. Sistemde ultrasonik sensör iki farklı şekilde konumlandırılmıştır. Birinci yapıda PMTLSM'dan önce ve ikinci yapıda ise motor rotoru ucuna olacak şekilde bir yerleştirme yapılmıştır. Geliştirilen sistem, laboratuvar ortamında ve arazi şartlarında test edilmiştir. Laboratuvar deneyleri, üzerinde yapay bitkiler bulunan konveyör bant sisteminde kimyasal sıvı kullanılmadan yapılmıştır. Deneylerde üç farklı kontrol yöntemi ile PMTLSM'nin altı farklı ivme değeri (2,5, 5, 10, 20, 40, 60 m/s²) ve konveyör bandın dört farklı ilerleme hızı (1, 2, 3, 4 km/h) için püskürtücü yüksekliği, püskürtücü yüksekliği varyasyon katsayısı (CV) değeri ve PMTLSM RMS akım değeri hesaplanmıştır. Arazi deneylerinde aktif püskürtücü kullanılmış ve üç farklı traktör ilerleme hızı (4, 8, 12) için CV değeri, ıslak alan yüzdesi (kaplama oranı) ve ilerleme yönündeki sıvı dağılım düzgünlüğü hesaplanmıştır.

Laboratuvar deneylerinde minimum CV ve minimum RMS akım kriterine göre en uygun ivme değeri 20 m/s² olarak bulunmuştur. Arazi deneylerinden alınan sonuçlara göre, püskürtücü yükseklik kontrolü uygulandığında en yüksek ilerleme hızı 12 km/h için CV değeri %16,77'den %5,17 azalırken, ilerleme yönündeki sıvı dağılım düzgünlüğü %56,57'den %86,11'e yükselmiştir.

Geliştirilen sistem, farklı boylardaki bitkiler ile püskürtücü arasındaki mesafeyi test koşulları altında ayarlanan set değerinde minimum hata ile tutmuş ve ilerleme yönündeki sıvı dağılım düzgünlüğünü arttırmıştır.

NOZZLE HEIGHT CONTROL WITH TUBULAR TYPE LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR IN AGRICULTURAL SPRAYING

SUMMARY

Keywords: Agricultural spraying, nozzle height control, permanent magnet tubular linear synchronous motor

In agricultural spraying, keeping the height of the spraying at the correct value reduces pesticide drift and provides uniformly distributed pesticide accumulation on the target plant. In this study, an agricultural nozzle height control test system was developed that can adjust the spraying height between spraying nozzle and the plant using a permanent magnet tubular linear synchronous motor (PMTLSM), which has the triangle motion profile. In the test bench, the nozzle height adjustment is performed by the PMTLSM, depending on the height data from the ultrasonic distance sensor. Ultrasonic sensor has been located in two different position. In the first construction, it has been located before the PMTLSM and in the second construction, it has been located on the rotor of the PMTLSM. The developed system was experimentally tested in the laboratory environment and under field conditions. Laboratory experiments were carried out without the use of chemical fluids in the conveyor belt system with artificial plants. In the experiments, the nozzle height coefficient of variation (CV) and the PMTLSM RMS current value were calculated for six different acceleration values (2.5, 5, 10, 20, 40, 60 m/s²) of PMTLSM and four different speeds (1, 2, 3, 4 km/h) of conveyor belt. In the field tests, the active nozzle was used and the CV value for the three different tractor speed (4, 8, 12), percentage wetted area and the uniformity of distribution in the forward direction was calculated.

In the laboratory experiments, the optimum acceleration value according to minimum CV and minimum RMS current criterion was found as 20 m/s². According to the experimental results, when nozzle height control was applied, the CV value decreased from 16.77% to 5.17%, while the uniformity of distribution in the forward direction increased from 56.57% to 86.11% at 12 km/h under field conditions.

Under the test conditions, the developed system has kept the distance between the different sized plants and the nozzle with the minimum error at the set value and also increased the uniformity of distribution in the forward direction.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Tarımsal üretimde, büyük kayıplara neden olan hastalık ve zararlılarla mücadele edilmesi gerekmektedir. Birçok farklı yöntem olmasına rağmen, tarım ilaçları ile yapılan kimyasal mücadele yöntemi, uygulamasının kolay olması, etkinliğinin yüksek olması, kısa sürede sonuç vermesi ve daha az işgücü gerektirmesi gibi nedenlerle tercih edilmektedir. Tarım ilaçları, ortaya çıkması muhtemel kalite kayıpları olmaksızın ürün verimliliğini arttırmaktadır, diğer taraftan tarım ilacı kullanılmadan, sadece mevcut teknolojilerle aynı kalite ve verimlilikte üretim yapılması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle tarımsal üretim için kritik girdilerden biri olan tarım ilaçları, tarım ürünlerini hastalık ve zararlılardan korumak, yabancı ot kontrolünde işgücü gereksinimini azaltmak, ürün miktarı ve kalitesini arttırmak için dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer taraftan tarım ilaçlarının ekolojik ve ekonomik olarak kabul edilebilir miktar ve sıklıkla, doğru miktarda uygulanması gereklidir. Yeterli miktarda uygulanmaması ilaç etkinliğini azaltıp hastalık ve zararlıların olumsuz etkilerinin devam etmesine neden olurken, fazla uygulanması ise, su, hava, toprak, ürün kirliliğine, çevre ve insanları uzun yıllar tehdit eden ilaç kalıntılarına neden olmaktadır. İlaçlama kalitesini, hedef yüzeylerde toplanan damlaların ortalama çapları, tekdüzelikleri, dağılım düzgünlüğü, damla sıklığı ve kaplama oranı gibi karakteristikler belirlemektedir. Her ilaçlamada bitki üzerinde yüksek birikim miktarı ve kaplama oranı olması istenirken, hedef dışına giden ilaç miktarının da mümkün olduğunca düşük olması istenmektedir. İlaç sürüklenmesi riskini püskürme kalitesi, ilaçlama yüksekliği, ilerleme hızı, püskürme basıncı, püskürtülen sıvı özellikleri, rüzgâr, sıcaklık, nem gibi faktörler etkilemektedir. İlaçlama uygulamalarında, yüksek akış oranlı ve büyük boyutlu damlacık üreten püskürtücü (nozül) kullanılması, uygulama basıncının düşürülmesi, ilaçlama yüksekliğinin azaltılması, ilerleme hızının yavaş olması, tampon bölgeler

oluşturulması, sürüklenme azaltıcı yeni teknolojilerin kullanılması gibi önlem ve uygulamalar ilaç sürüklenmesini azaltabilmektedir.

İlaç ve uygulama girdi maliyetlerini en aza indirmek, optimum verim elde etmek, olumsuz çevresel etkileri azaltmak için; tarım ilaçlarının doğru zamanda, tek seferde ve yeterli miktarda, sadece hedeflenen alana olmak üzere en uygun yöntemlerle etkili bir şekilde uygulanması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle düzgün dağılımlı bir ilaçlama gerçekleştirmek, kullanılan kimyasal miktarını ve ilaç sürüklenmesini azaltmak için; ilaçlama yüksekliğinin hedef alan boyunca, belirlenen en uygun değerde sabit kalmasının sağlanması gerekmektedir. Bu amaçla tarımsal ilaçlamada, püskürtücü titreşimlerini azaltan, püskürtücünün ayarlanan yükseklikte kalmasını sağlayan pasif ve aktif süspansiyon sistemleri geliştirilmiştir. Pasif sistemler yaylar ve amortisörler ile titreşimleri azaltırken, aktif sistemler sürekli yüksekliği ölçerek, püskürtücüleri taşıyan bumun, ayarlanan bir yükseklikte kalmasını sağlamaktadır. Aktif süspansiyon sistemlerinde genel olarak zemine veya bitki kanopisine olan bum yüksekliği, hidrolik silindirlerle üretilen doğrusal hareket ile sağlanmaktadır. Pasif süspansiyon sistemleri, düşük fiyat ve dayanıklılıklarından dolayı yaygın kullanılmakla birlikte, modern bir süspansiyon sistemi performansında istenen önemli iyileşmeler ancak aktif sistemler tarafından sağlanabilmektedir.

Endüstriyel uygulamalarda doğrusal hareket, hidrolik ve pnömatik silindirler yanında dönme hareketini doğrusal harekete dönüştüren mekanik sistemler ve lineer elektrik motorları ile sağlanabilmektedir. Hidrolik/pnömatik aktüatörler, kamlar, bilyeli vidalı yollar ve kramayer dişli sistemler ile lineer motorlar karşılaştırıldığında, verimlilik, düşük bakım maliyeti, sessiz çalışma, hız ve kuvvet kontrolü, düşük enerji ihtiyacı, konum doğruluğu ve güvenilirlik açısından bu motorlar önemli avantajlar sunmaktadır. Sabit mıknatıslı tüp tipi lineer motorlar, yapıları kompakt olduğundan ve manyetik alan üretmede yüksek enerjili neodymium-iron-boron (NdFeB) mıknatısları kullanıldığından endüstriyel robotlar, enerji üretim sistemleri, takım tezgâhları, paketleme sistemleri, otomobil aktif süspansiyon sistemleri gibi yüksek performanslı uygulamalarda tercih edilmektedirler.

Bu tez çalışmasında, sabit mıknatıslı tüp tipi lineer senkron motorların tarımsal ilaçlama yükseklik kontrolünde kullanılabilirliği, laboratuvar ortamında ve arazi şartlarında araştırılmıştır. Bu amaçla, püskürtücünün dikey olarak PMTLSM ile hareket ettirildiği yükseklik kontrol deney düzeneği geliştirilmiştir. Geliştirilen düzene ile laboratuvar ortamında, üzerinde yapay bitkilerin bulunduğu bir hareketli konveyör bant üzerinde herhangi bir sıvı kullanılmadan, farklı konumlandırılmış ultrasonik mesafe sensorü ile yükseklik kontrol deneyleri yapılmıştır. Geliştirilen deney düzeneği daha sonra bir traktöre adapte edilerek, laboratuvar deneylerinden elde edilen en uygun ivme değerine göre arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Arazi deneylerinde sistemin ıslak alan yüzdesi ve ilerleme yönünde dağılım düzgünlüğüne etkisi araştırılmıştır.

Tezin birinci bölümünde, tarımsal ilaçlama, tarımsal ilaçlama da yükseklik kontrolünün önemi hakkında genel bilgiler verilmekte ve çalışmanın içeriğine değinilmektedir.

Tezin ikinci bölümünde ise, tarımsal ilaçlama yükseklik kontrolünde pasif ve aktif süspansiyon sistemleri, bum yükseklik kontrol sistemleri, sabit mıknatıslı tüp tipi lineer motorun süspansiyon sistemi uygulamaları ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar özetlenmektedir. Ayrıca çalışmanın amacı, kapsamı, özgün değeri sunulmuştur.

Üçüncü bölümde, çalışmada geliştirilen, laboratuvar deneylerinde ve arazi deneylerinde kullanılan püskürtücü yükseklik kontrol sistemi deney düzeneği tanıtılmaktadır. Deney düzeneğinde, aktüatör olarak kullanılan yüksek performanslı PMTLSM yapısı, PMTLSM'un hidrolik sistemlere göre üstünlükleri ve maksimum hız sınırlandırılmış ivme interpolasyon (VAI-yamuk/üçgen hareket profili) yöntemi anlatılmaktadır. Ayrıca püskürtücü yükseklik kontrol sisteminin arazi deneyleri için bir traktöre uyarlandığı sistem yapısı tanıtılmaktadır.

Dördüncü bölümde, PMTLSM matematik modeli ve bu model kullanılarak elde edilen simülasyon modeli verilmekte, ultrasonik mesafe sensörünün kalibrasyon

yapılışı açıklanmaktadır. Ayrıca laboratuvar deneylerinde, sensör konumuna göre sensör ayrı konumlama sistemi ve yükseklik profiline göre analog kontrol sinyalinin üretilmesi açıklanmaktadır. Yine, sensör üst konumlu çalışma sistem yapısı, PID ve Bulanık PID denetleyiciler ile kontrol yöntemleri ve bu yöntemlerin püskürtücü yükseklik kontrol sistemine uygulanması açıklanmaktadır. Bu bölümde ayrıca, sistemin arazi deneylerine adapte edilmesi, yapay hedef olarak kullanılan suya duyarlı kâğıtların püskürtücü altında konumlandırılması, ortalama traktör hızının test edilmesi, ıslak alan yüzdesi (kaplama oranı) ve dağılım düzgünlüğünün hesaplama yöntemleri açıklanmaktadır.

Tezin beşinci bölümünde öncelikle simülasyondan elde edilen sonuçlar, laboratuvar deneyleri sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra ise PMTLISM tarafından sürülen püskürtücü yükseklik kontrol sisteminde, konveyör bandın dört farklı hız ve PMTLISM'nin altı farklı ivme değeri için laboratuvar deney çalışmalarının sonuçları verilmiş ve literatürle tartışılmıştır. Püskürtücü yükseklik kontrol sisteminin laboratuvar deneylerinde elde edilen en iyi değerler kullanılarak gerçekleştirilen arazi deneyleri sonuçları verilmiştir. Arazi deneyleri, yükseklik kontrol performans testleri ve aktif püskürtme testlerinde oluşmaktadır. Püskürtme testlerinde, püskürtücü yükseklik kontrolü uygulamasının suya duyarlı kâğıtlardan oluşan yapay hedeflere püskürtülen sıvının kaplama alanı ve ilerleme yönündeki ilaç dağılım düzgünlüğüne etkisi ve katkısı test edilmiştir. Bölümde ayrıca arazi deneyleri sonuçları literatürle tartışılmıştır.

Tezin altıncı bölümünde, püskürtücü yükseklik kontrol sisteminin laboratuvar deneyleri ve arazi deneylerinden elde edilen genel sonuçlar verilerek, öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Dünya nüfusundaki hızlı artış, yüksek kaliteli gıda talebi ve ulaşılabilir tarım alanlarında maksimum verim elde edilmesi beklentisi daha yoğun tarım uygulamalarına yol açmaktadır (Matthews, 2000). Nüfusun 9 milyardan daha fazla olacağının öngörüldüğü (Bongaarts, 2009) 2050 yılına kadar, küresel gıda üretiminin %70, tarımsal verimliliğin %60 oranında artması gerektiği tahmin edilmektedir (FAO, 2009; Miles, 2018). Tarımsal hastalıklar ve zararlılar, ürün verimini, tane boyutunu, depolama süresini ve kalitesini azaltmakta, aynı zamanda hastalıkların hızlı bir şekilde yayılmasına neden olmaktadır (Bisesi ve Koren, 2003). Dünyada bu hastalık ve zararlılarla yeterli mücadele yapılmadığında toplam ürünün yaklaşık üçte biri kayba uğramaktadır (Matthews, 2000). Ülkemizde tarımı yapılan bitkiler, sayıları beşyüzden fazla hastalık ve zararlı tarafından tehdit edilmektedir (Kansu, 1994). Bu nedenle, ürün kalitesini ve miktarını arttırmak için hastalıklara, zararlılara ve yabancı otlara karşı mücadele etmek gerekmektedir (Çilingir ve Dursun, 2002).

Hastalık, zararlı ve yabancı otların neden olduğu kayıpları azaltmak için tarımsal mücadele yöntemleri; kimyasal, biyolojik, biyoteknolojik, fiziksel, mekanik, kültürel mücadele, tahmini ve erken uyarı sistemleri, karantina ve sertifikasyon önlemlerini içermektedir. Ancak, hastalık, zararlı ve yabancı otlarla mücadelede uygulama kolaylığı, etkinliğinin yüksek olması ve etkisinin kısa zamanda görülmesi nedeniyle kimyasal mücadele yöntemi diğer yöntemlere göre daha çok tercih edilmektedir (Matthews, 2000). Bu nedenle tarım ilaçları, yüksek verim ve yüksek kaliteli gıda için kullanılması kaçınılmaz bir araç olmaktadır. (De Schampheleire ve ark., 2007). Tarımsal üretimde hastalık ve zararlılara karşı önlem alınması üretim artışı sağlamaktadır (Oerke ve ark., 1997). Tarım ilaçları tarımsal üretimin gelişmesinde önemli bir etkiye sahipken, insanlar, hayvanlar ve çevre üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır (Belforte ve ark., 2011). Kimyasal mücadelede uygulanan

kimyasalların %90'nını oluşturan pestisitlerin hedefe uygulanamayan ve kaybolan kısmı ekonomik kayıplar yanında, havanın, suyun, toprağın kirlenmesine neden olmaktadır. Tarım ilaçlarının etkinliğini hedefteki birim alan için kullanılan kimyasal miktarı, hedef alandaki kimyasal birikimi ve ilaç alan hedef alanın yüzdesi etkilemektedir. İlaçlamadan maksimum verim elde edebilmek için, uygulama ekipmanlarının, kullanılan kimyasalın büyük bir kısmını hedeflenen ürüne uygulaması için kullanılması gerekmektedir (Gholap, 2012).

İlaçlama uygulaması esnasında, tüm alan boyunca gerekli dozun hedefe doğru olarak uygulanması gerekmektedir. Eksik uygulama, tarım ilacı etkinliğini azaltarak yabancı otların ve zararlı böceklerin zararlı etkilerinin devam etmesine neden olurken, aşırı uygulama ise, toprak ve yüzey sularının kirlenmesine ve bitki üzerinde aşırı pestisit kalıntılara neden olmaktadır. Pestisitler yoğun aktif maddeler içerdiğinden, bitkiler üzerindeki aşırı pestisit kalıntıları üretimi yapılan ürünlere de zarar vermektedir (Ozkan ve Reichhard, 1993; Marck ve Luycx, 1993). İlaçlama kalitesi, hedef yüzeylerde toplanan damlacıkların ortalama çapları, tekdüzeliği, dağılımın düzgünlüğü, damla sıklığı ve kaplama oranı gibi özelliklere göre belirlenmektedir. Her bir uygulama için hedef bitki üzerinde yüksek birikim ve kaplama oranı oluşması istenirken, hedef dışı bölgelere ilaç sürüklenmesinin mümkün olduğunca az olması arzu edilmektedir (Ozkan, 1995; Gil ve Badiola, 2007). İlaç sürüklenmesi komşu bitki ve ürünlerin zarar görmesine, su ve çevre kirliliğine, insan ve hayvan sağlığının tehdit altında olmasına, ilaç etkinliğinin azalmasına, sürüklenme kayıplarını karşılamak için aşırı doz uygulanmasına ve ekonomik kayıplar gibi birçok olumsuzluğa neden olmaktadır (Nuyttens, 2007).

Yapılan birçok çalışmada, sürüklenme ve ilaçlama yüksekliği arasında büyük ilişki olduğu bulunmuştur (Kaul ve ark., 1996; Holterman ve ark., 1997; Smith ve ark., 2000; Taylor ve ark., 2004; Nuyttens ve ark., 2007). Yüksek kaliteli bir püskürtme için, püskürtücü ile hedef bitki arasındaki mesafeyi ifade eden püskürtme yüksekliğinin sürekli olarak uygun değerde sabit tutulması gereklidir (Yoshida ve Maybank, 1971; Nalavade ve ark., 2008). İlaçlama uygulamasında aşırı seviyedeki yüksek püskürtücü konumu, damlacıkların dışarıdan gelen kuvvetlere daha fazla

maruz kalması sonucu püskürtülen sıvının büyük bir bölümünün sürüklenmesine, bazı bölgelerin farklı püskürtücüler tarafından aşırı ilaçlanmasına, asıl hedefin ise eksik ilaçlanmasına neden olmaktadır. Aşırı düşük püskürtücü konumu ise, püskürtücünün altındaki hedef alanın bazı bölümlerinde aşırı püskürtme şeritleri oluştururken, püskürtücüler arasında eksik ilaçlama şeritleri oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, hedefe doğru daha kısa mesafedeki damlacık hareketi nedeniyle, büyük damlacıkların daha yüksek hızlarda hedefe çarpması sonucu, damlacık sıçraması ve parçalanması oluşabilmektedir (Yoshida ve Maybank, 1971; Crease ve ark., 1991). Toplam etki ise çok düşük bir birikim ve dağılım bütünlüğünde bozulma şeklinde ortaya çıkmaktadır (Yoshida ve Maybank, 1971).

Çalışmalar tarımsal ilaçlamada kullanılan kimyasalların verimliliğinin, ilaç dağılımının düzgünlüğü ile yüksek oranda ilişkili olduğunu göstermektedir (Debrez ve ark., 2003). İlaçlama işleminde düzgün dağılım elde edebilmek için, ilaçlama yüksekliğinin optimum değere ayarlanması gerekmektedir (Jeon ve ark., 2004). Uygun yükseklik ayrıca ilaç sürüklenmesi kontrolü sağlamaktadır (Miller ve ark., 2008; Nuyttens ve ark., 2010). Bu nedenle tarım ilaçlarının sürüklenmesini azaltmak, ilaç dağılımını daha iyi bir hale getirmek, püskürtme desenini bozmamak, yeterli kapsama sağlamak ve tek seferde tedavi sağlamak için ilaçlama yüksekliğinin uygun bir değere ayarlanması gerekmektedir (Wang ve ark., 1993; Womac ve ark., 2001; Wen ve Kidd, 2005; Qasem, 2011).

Tarımsal ilaçlamada ilk olarak 1900 yıllarda bumlu püskürtücüler kullanılmaya başlanmış, 1940'lı yılların ortalarında ise traktörlerin üç nokta askı sistemine bağlanan ve kuyruk mili tahriki ile çalışan püskürtücüler geliştirilmiştir (Combella, 1981). Kuyruk mili ile tahrik edilen bumlu püskürtücüler sıvı tankı, pompa, sprey bumları, püskürtücüler ve filtrelerden oluşmaktadır (Jones, 2006). Tahrik faktörüne dayanan bumlu püskürtücülerin traktöre bağlanan çekilir tipine ve traktöre monte edilen asılır tipine ek olarak, sadece ilaçlama amacı ile üretilen kendinden tahrikli tipleri de bulunmaktadır (Tahmasebi, 2014). Hassas püskürtme teknolojilerine sahip bumlu püskürtücüler, 1980'li yılların sonlarında imalatçı firmalar tarafından tanıtılmaya başlanmıştır (Bode ve Bretthauer, 2008).

Bumlu püskürtücülerde, püskürtme sıvısı pompa aracılığıyla bum boyunca yan yana monte edilmiş nozullara iletilmektedir. Literatürde, yan yana iki nozul (püskürtücü) arasındaki mesafe ve nozul açısını dikkate alarak uygun ilaçlama yüksekliği referans olarak verilmektedir. Geniş açılı püskürtücüler için daha düşük bir püskürtme yüksekliği tercih edilmektedir. Örneğin, 50 cm'lik nozul aralığı ve 110° nozul açısı için 50 cm'lik bir püskürtme yüksekliği önerilmektedir (Langenakens ve ark., 1999; Wilson ve ark., 2008). Ancak, ilaçlama uygulaması yapılırken, arazi yapısı dalgalanmaları, tepecikler, lastiklerin ve düşey titreşimlerin dalgalanmaları nedeniyle ilaçlama yüksekliğinin sürekli değişmesi sonucu püskürtme kalitesi olumsuz etkilenmektedir (Langenakens ve ark., 1995; Ramon ve ark., 1997; Langenakens ve ark., 1999). Bum hareketleri ilaç dağılım düzgünlüğündeki değişimleri önemli ölçüde arttırmaktadır. Yükseklik değişimleri aşırı ve eksik uygulamaya neden olabilmektedir. Langenakens ve arkadaşları (1999) dikey hareketlerin püskürtme deseni üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmalarında, bumun dikey hareketlerinin ilaç dağılımının geniş bir aralıkta değişmesine neden olduğunu görmüşlerdir. Nation (1978) çalışmasında, istenmeyen bum hareketlerinin düzgün olmayan bir spreylendirme modeline neden olduğuna ve spreylendirme dağılımının %0 ile %800 arasında değişen birikime yol açtığına işaret etmektedir. Langenakens ve arkadaşları (1995) tarafından yapılan bir çalışmaya göre, dikey bum titreşimleri sonucu ilaç birikimi %0 ile %1000 arasında değişebilmektedir. İlaçlama yüksekliğini ayarlayan bumun yüksekliğini optimum değerde tutmak için pasif ve aktif süspansiyon sistemleri kullanılmaktadır. Pasif ve aktif süspansiyon sistemleri kullanıldığında, dikey bum titreşimleri ve yükseklik hataları azaltılarak püskürtme kalitesi artırılabilir (Ramon ve ark., 1997) ve ilaç dağılım düzgünlüğündeki bozulmalar azaltılabilir (Sinfort ve ark., 1994). Pasif süspansiyon sistemleri denge, merkezi dönüş ve sönümleme sistemlerine dayanmakta ve herhangi bir güç kaynağı gerektirmemektedir. (Frost, 1984; O' Sullivan, 1988; Klein ve Kruger, 2011). Aktif süspansiyon sistemlerinde ise bum kolunun yüksekliğini ayarlamak için sensörler ve aktüatörler kullanılmaktadır. Bum kanatları, aç-kapa ya da oransal valfler ile tahrik edilen hidrolik aktüatörlerle birbirinden bağımsız olarak hareket ettirilebilmektedir. Aktif süspansiyon sistemlerinde, bum üzerine yerleştirilen ve bum ile hedef bitki ya da zemin arasındaki mesafeyi ölçen bir sensör, aktüatörü sürmek için ise bir güç

kaynağı gerekmektedir. Bu sistemlerde, uygulama esnasında bir yükseklik sapması sensör tarafından algılandığında, hidrolik aktüatör bumu aşağı veya yukarı yönde hareket ettirerek ayar noktasına gelmesini sağlamaktadır (O' Sullivan, 1986; Klein ve Kruger, 2011).

Pasif ve aktif süspansiyon sistemi uygulamaları üzerine birçok teorik ve deneysel çalışma yapılmıştır (Musillami ve ark., 1982; Frost, 1984; O'Sullivan, 1986; Frost ve O'Sullivan, 1986; Marchant ve Frost, 1989; Kennes ve ark., 1999; Deprez ve ark., 2002; Deprez ve ark., 2003; Anthonis ve ark., 2005; Sun ve Miao, 2011; Koç ve Keskin, 2011; Pontelli ve Mucheroni 2012; Herbst ve ark., 2015; Herbst ve ark. 2018). Bum yükseklik kontrolü ile ilgili ilk patent başvurusu 1994 yılında yapılmıştır. Bum kanatları yanında bum çerçevesinin şasiden dönmesini sağlayan geliştirilmiş bir yapı ise 2004 ve 2006 yıllarında geliştirilmiştir. Daha sonra on-off valfler yerine oransal valfler kullanılarak hidrolik silindirlerin farklı hızlarda hareket ettirilmesi sağlanmıştır. Günümüzde ticari olarak çoğu arazi ortamında yüksekliği ölçmek için ultrasonik sensörlerin kullanıldığı ve aktüatör olarak hidrolik silindirlerle bumun hareket ettirildiği farklı bum yükseklik kontrol sistemleri sunulmaktadır (Miles, 2018). Bu sistemler, püskürtücüleri taşıyan bumun tamamının ya da bum kanatlarının dikey yüksekliğini kontrol etmekte veya bumu zemine paralel tutmaya çalışmaktadır.

Speelman ve Jansen (1974) püskürtme bumunun üzerindeki titreşim miktarının bumun yapısında, zemin yüzey düzensizliklerinden ve ilerleme hızından etkilendiğini belirlemiştir. Başlangıç püskürtme yüksekliğinin 0,5 m olarak ayarlandığı koşul altında, bum dikey hareketinin genliği arttığında sprej dağılımının eşitliğinin azaldığını gözlemlemişlerdir.

Frost (1984), dikey dönme hareketi oluşan bir aktif bum süspansiyon sistemi için matematik model geliştirmiştir. Çalışmasında bu modelin süspansiyon tasarımında nasıl kullanılabileceğini de göstermiştir. Modelin süspansiyona yapılan modifikasyonla pasif süspansiyonun yaptığı yüksek frekans izolasyonunu kaybetmeden, düşük frekans performansını önemli ölçüde artırabildiğini ve bunun,

araçtan elde edilebilecek göz ardı edilebilir miktarda güç kullanılarak yapılabileceğini göstermek için kullanılabileceği belirtilmiştir.

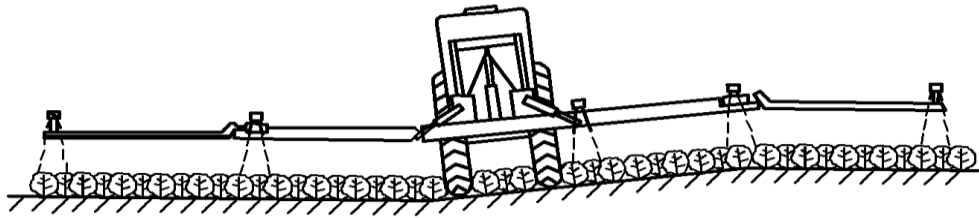
Frost ve O'Sullivan (1986) gerçekleştirdikleri deneysel çalışma sonucunda, genişletilmiş matematiksel modeli elde edilen bir pasif süspansiyon sisteminde, tahmin edilen sonuçları deneysel olarak doğrulamışlardır. Matematiksel modelin, uygulanan yatay ve dikey girişlere göre performansı doğru olarak tahmin etmek için kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

O'Sullivan (1986) çalışmasında, hem pasif hem de aktif süspansiyon için matematiksel bir model oluşturmuştur. Yine, sarkaç tipi süspansiyon sisteminin tasarım kriterlerini ve matematiksel model kullanılarak nasıl tasarlandığını göstermiş ve dinamik modellemesini gerçekleştirmiştir. Model daha sonra süspansiyonda aktif bir elementi içerecek şekilde genişletilmiş ve bunun performans üzerindeki etkisi tahmin edilmiştir. Bunu eğimli zemine paralel olarak tutmak için bir aktüatör kullanılarak bir pasif sarkaç süspansiyonunun düşük frekans yanıtının önemli ölçüde geliştirilebileceği öngörülmüştür. Çalışmada, az miktarda güç tüketimi için çok daha pahalı ve hidrolik olarak çalışan güçlü bir sistem yerine, elektrikli vidalı mil tipi bir aktüatör kullanılabileceği belirtilmiştir. Aktif süspansiyonun az miktarda güç tüketerek zemin eğimindeki düşük frekans değişimlerini bunun takip etmesi sağlanmıştır. Aktif süspansiyonda ultrasonik sensörün önerildiği çalışmada, aktif elemanın süspansiyonun performans üzerindeki etkisi öngörülmüştür. Sistemin 0,32 Hz'den daha küçük uyarım frekanslarına karşı kontrol performansının iyi olduğu simülasyon yoluyla bulunmuştur.

O'Sullivan (1988), pasif süspansiyon sistemi ve yerden yüksekliği ölçmek için bum uçlarına ultrasonik mesafe sensörlerinin monte edildiği pendulum türü hidrolik silindirli aktif süspansiyon sistemi için matematiksel model geliştirmiştir. Sisteme test düzeneğinde 0,016 ile 1,6 Hz arasında değişen frekanslarda uyarım girişleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlara göre ölçülen ve simüle edilen veriler arasında yüksek korelasyon bulunmuştur. Modelden ve titreşim testinin uygulandığı deneyden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak modeller doğrulanmıştır. Sistemin düşük

frekanslarda iyi tepki verdiği ve elde edilen modelin pendulum tipi süspansiyon tasarımı için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Satow ve ark. (1994), traktöre monte edilen 15 metrelik bir bum püskürtücüyü beş parçaya bölerek, parçaları sahip oldukları toplam beş adet ultrasonik sensörden gelen yükseklik bilgisine göre ayrı ayrı hidrolik silindirlere aç-kapa yöntemiyle kontrol etmişlerdir (Şekil 2.1.). Bum parçalarının püskürtme yüksekliği, ayarlanan yükseklik ile tespit edilen püskürtme yüksekliği arasındaki sapmaya karşılık gelen yön ve solenoid valfin maniplüle edilen değişkeni tarafından kontrol edilmiştir. Denemelerde ilerleme hızı 0,94 m/s (yaklaşık 3,38 km/h) ve mesafe 15 m olarak seçilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, bum parçalarının zemin yüksekliğine uygun şekilde kontrol edilebildiği bildirilmiştir.



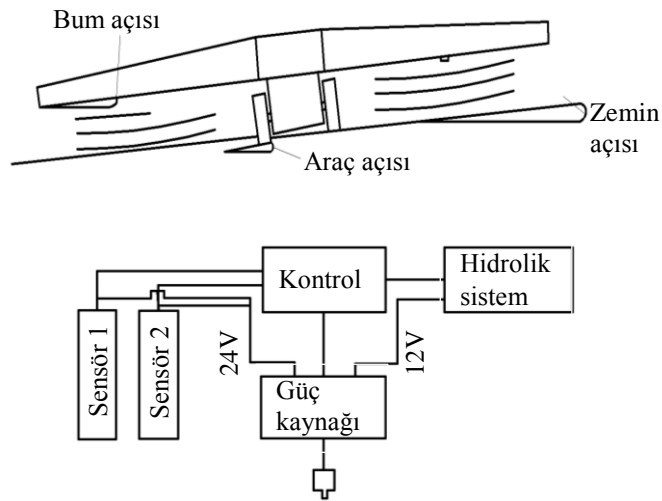
Şekil 2.1. Bom püskürtücü için püskürtme yüksekliği kontrolünün şematik diyagramı (Satow ve ark., 1994).

Sinfort ve Herbst (1996), bum hareketini ve püskürtme paternini pratik kullanım açısından incelemişlerdir. Püskürtme bumunun hareketleri, hidrolik silindirli bir simülasyon ile değerlendirilmiş ve sprej paterni yazılım ile simüle edilmiştir. Sıvı uygulamasının büyük tekdüzeliğinin bozulmasının en büyük nedeninin, bumun dönme hareketinden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır.

Ramon ve arkadaşları (1997) geliştirdikleri deney düzeneğinde, 15 m uzunluğundaki her biri 5 cm kesitinde oluklardan oluşan sıvı biriktirme paternatörünün üzerinde belirli bir yükseklikte bulunan yatay çubuğa püskürtücü monte etmişlerdir. Yatay çubuk ray üzerinde hareket ettirilmiştir. Nozulun konumu ise 0-15000 mm mesafeye karşılık 0-10 V çıkış veren yer değiştirme sensörü tarafından belirlenmiştir. Geliştirdikleri matematik model ile yapılan simülasyonlar, bumun kontrol edilmeyen dönme hareketinin neden olduğu eksik ve aşırı uygulamanın istenen dozun 0 ile 10

katı arasında olduğunu göstermiştir. Geliştirilen model (simülasyon) ve deney düzeneği arasındaki fark %7'den daha küçük bulunmuştur. Çalışmada, yuvarlanma (dönme) hareketinde en küçük iyileşmelerin aşırı ve eksik uygulamayı önemli ölçüde azalttığı belirtilmektedir.

Nielsen ve Sørensen (1998) pasif süspansiyon ve aktif süspansiyon sistemini karşılaştırmak için yaptıkları simülasyon çalışmasında, aktif süspansiyonun sistem performansını önemli ölçüde geliştirdiğini bulmuşlardır. İki ultrasonik sensörlü ve bum hareketinin oransal valf ile kontrol edildiği hidrolik silindirlerle tahrik edilen bir aktif süspansiyonlu bum püskürtücü üzerinde (Şekil 2.2.) gerçekleştirdikleri denemelerde, sistemin bumu stabilize edebildiği ve zemine paralel tutabildiğini tespit etmişlerdir. Çalışmada ayrıca daha iyi performans elde edebilmek için aktif ve pasif sistemlerinin birlikte kullanılması gerektiğini ve aktif süspansiyonun püskürtme sonucunu iyileştirdiğini ve operatörün görevini kolaylaştırabileceğini bildirmişlerdir.

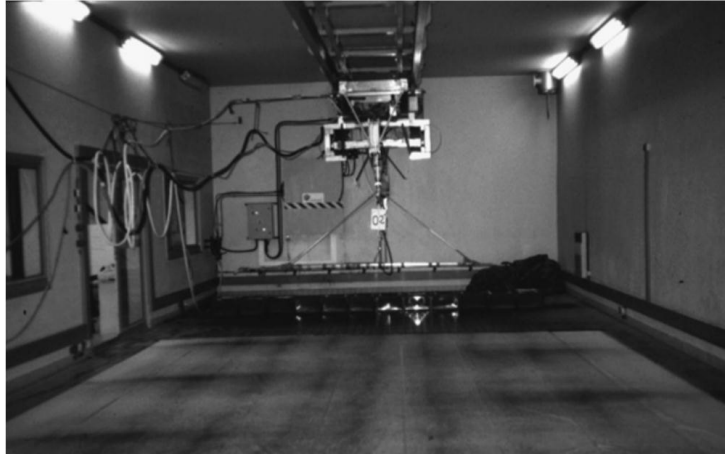


Şekil 2.2. Püskürtücü bumu ve elektronik devre

Kennes ve ark. (1999) iki farklı pasif süspansiyonu (pendulum ve trapez) sonlu elemanlar yöntemi ile tasarladıktan sonra, hidrolik aktüatörlü sistem aracılığıyla engebeli bir araziye temsil eden girişleri sallanma hareketleri olarak kontrollü bir şekilde uygulamışlardır. Her iki süspansiyon için elde ettikleri simülasyon sonuçlarına göre, dikey bum titreşiminin sabit bumla karşılaştırıldığında yarıya kadar

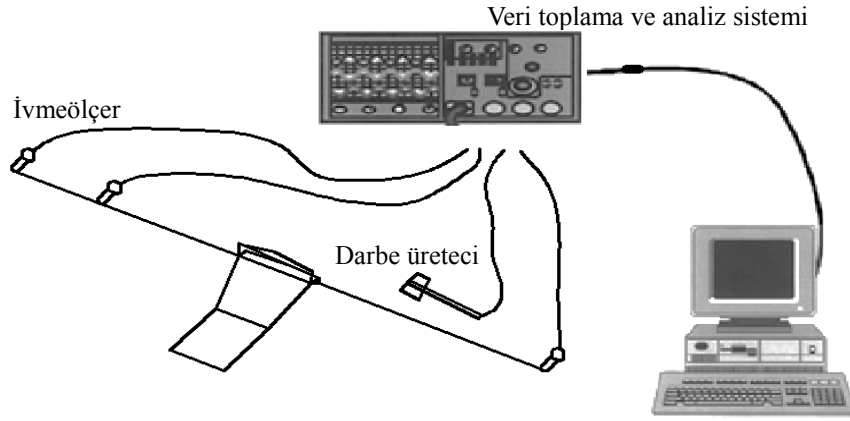
azaldığını tespit etmişlerdir. Çalışmada, denge konumu etrafında dikey bum ucu standart sapmaları sabit bum için 0,44 m, pendulum süspansiyonlu bum için 0,25 m ve trapez süspansiyonlu bum için 0,2 m bulunmuştur.

Lardoux ve ark. (2007), laboratuvar ortamında (Şekil 2.3.) gerçekleştirdikleri deneyde, sallama platformu ile her yönde kontrollü hareketler oluşturmuşlardır. Çalışmada, sabit bumda elde edilen statik ilaç dağılımı ölçümleri ile hareketli bumda bum yüksekliği, bum hızı ve püskürtücü etkileri görüntü analizi yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada gerçekleştirilen yöntemle, buma farklı mekanik uyarımlar verilerek bum hareketlerinin zemindeki ilaç dağılımı üzerindeki etkisinin gözlemlenebileceği ve görüntü analiz yönteminin hızlı ve kabul edilebilir sonuçlar verdiği belirtilmektedir.



Şekil 2.3. Laboratuvar püskürtme testleri (Lardoux ve ark., 2007)

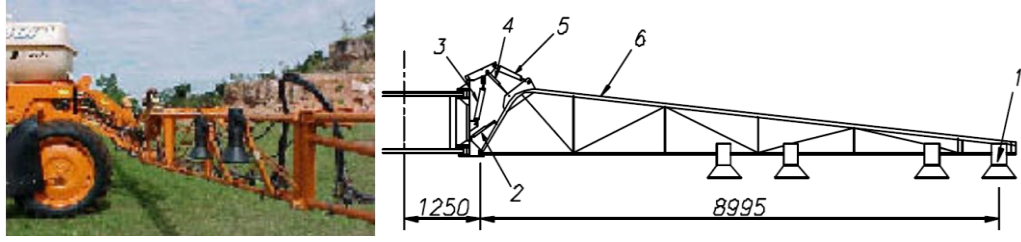
Langenakens ve ark. (1999) deneysel bir model üzerinde (Şekil 2.4.) bum hareketleri üreterek ilaç dağılımını simüle etmişlerdir. Arazi yapısı, lastik tekerlekler ve traktör ivmelenmesinden kaynaklanan bum hareketlerinin ilaç dağılımını çok fazla olumsuz etkilediği görülmüştür. İlerleme hızı artışının ve lastik basıncının bum dikey hareketlerini arttırdığı tespit edilmiştir. Araç hareketinden kaynaklanan bum dönüş hareketlerinin neden olduğu uygulanan sıvı hacim varyasyon katsayısı %2 ile %173 arasında elde edilmiştir.



Şekil 2.4. Ölçüm ekipmanı ve düzenlemesi (Langenakens ve ark., 1999)

Sartori ve ark. (2002) otomatik bir bum yükseklik kontrol sistemi geliştirmiş (Şekil 2.5.) ve performansını, yüksekliği manuel olarak kontrol eden operatöre karşı analiz etmişlerdir. Çalışmalarında bum bölümlerinin yüksekliğini kontrol etmek için sağ ve sol bum üzerine dörder adet ultrasonik sensör yerleştirerek bir elektronik sistem geliştirmişler ve bir pülverizatöre monte etmişlerdir. Sisteminin performansını test etmek için değişen test parametreleriyle farklı test alanlarında çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bum ile zemin veya bum ile bitki arasındaki mesafe ultrasonik sensörler ile ölçülmektedir. Saha denemeleri, yükseklik kontrolü için tecrübesi farklı iki operatör ile manuel kontrol ve geliştirilen otomatik kontrol sistemi ile otomatik olarak üzerinde bitkinin bulunmadığı ve bulunduğu, üç farklı uzunlukta ve zemin yapısında 16 ve 19 km/h yüksek hızlarda yapılmıştır. Test için otomatik kontrol sistemi, bum yüksekliğini manuel olarak kontrol eden tecrübeli ve tecrübesiz operatör ile karşılaştırılmıştır. Ayarlanan yükseklik ve gerçek püskürtme yüksekliği arasındaki sapma değerleri ile hedeflenen yükseklik aralığında ($\pm\%20$) kalıcılığı manuel ve otomatik kontrol işlemleri için karşılaştırılmıştır. Herhangi bir tarafın sensörler ile ölçülen yüksekliği ayarlanan değerden küçük ya da büyük ise, kontrol bilgisayarı elektrohidrolik sistemi aktive ederek ayarlanan değere getirmektedir. Program, hatanın büyüklüğü ile orantılı olarak karar vermektedir. Ölçülen yükseklik, ayarlanan değerlerin $\%10$ 'u kadar farklılık gösteriyorsa kontrol sistemi bum yüksekliğinin ayarlanan değerde olduğuna karar vermektedir. Ölçülen yükseklik $\%10$ ile $\%25$ arasında ise, bir gecikme ile bum aktive edilerek ayarlanan değere yavaşça getirilmiştir. $\%25$ ile $\%50$ arasında ise daha küçük bir gecikme zamanı ile kontrol

gerçekleştirilmiştir. Eğer %50'den büyükse yazılım elektrohidrolik sistemi gecikmesiz olarak hatanın ortadan kaldırılması yönünde aktive etmiştir. Karar mekanizması ile saha şartlarında çok iyi kontrol stabilitesi elde edilmiştir. Gerçekleştirilen denemelerde, her bir durum için yükseklik ortalamaları, standart sapma, varyasyon katsayısı ve önceden ayarlanan yükseklik değerine göre (100 cm) ortalama hata değerleri hesaplanmıştır. Ortalama toplam sapma, ortalama hatanın mutlak değerinin ve varyasyon katsayısının toplamı olarak hesaplanmıştır. Bum uçlarında yüksekliğin 80 ile 120 cm aralığında, bum ortasında ise 90-110 cm arasında olduğu gösterilmiştir. 16 km/h hız için ortalama toplam sapma, bitkisiz ve düz yolda %18 ve %20 olurken, hedef 80-120 cm aralığında kalıcılığı %75 ve %79 bulunmuştur. Sistem aktive edilmediğinde ise kalıcılığı %70'de kalmıştır. Bitkisiz ve düz arazide otomatik sistem sapması %18,4 ve kalıcılığı %78,6 iken, manuel sistemde sapma %26,8 ve kalıcılığı %66,8 olarak bulunmuş ve otomatik sistemin manuel sistemden daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Bitkisiz düzgün olmayan arazide yine 16 km/h ilerleme hızında otomatik ve manuel sistem değerleri yaklaşık çıkmıştır. Arazide bitki bulunduğunda ise manuel ve otomatik sistem sonuçları daha kötü çıkmıştır. Bitkisiz ortama göre karşılaştırıldığında, 16 km/h hız için manuel sistemin kalıcılığı %52,8'den %41,5'e otomatik sistemin kalıcılığı %49,6'dan %44,3'e düştüğü görülmüştür. Diğer taraftan 19 km/h hız için manuel sistem %51,6'dan %38,5'e otomatik sistem %46,0'dan %33,1'e azalmıştır. Bu nedenle 19 km/h hızın, uygulama için fazla olduğu kabul edilmiştir. Hedef yüksekliğinin $\pm\%10$ 'u içindeki zamanın yüzdesi, bumun kabul edilebilir bir aralıkta olduğunu göstermenin bir yolu olarak değerlendirilmiştir. Bitkilerin bulunduğu denemelerde manuel operasyon daha da zorlaşmıştır, zira bitkilerin bulunduğu denemelerde operatörün hem sıralar arasını hizalamaya çalışmasının hem de bumu uygun yükseklikte tutmaya çalışmasının, bum yüksekliğinde sapmalar meydana gelmesine neden olduğu vurgulanmıştır. Yükseklik kontrolünün otomatik olarak gerçekleşmesinin, operatörün sadece sıra aralarını takip ederek sürüş yapmasına olanak sağladığı belirtilmiştir.



- | | | |
|------------------------------------|----------------------|-------------------|
| 1. Ultrasonik mesafe sensörü | 3. Hidrolik silindir | 5. Esneme yayı |
| 2. Doğrusal yer değişim algılayıcı | 4. Şok sönümleyici | 6. Püskürtme bumu |

Şekil 2.5. Bum üzerine monte edilmiş sensörler ve şematik gösterim (Sartori ve ark., 2002)

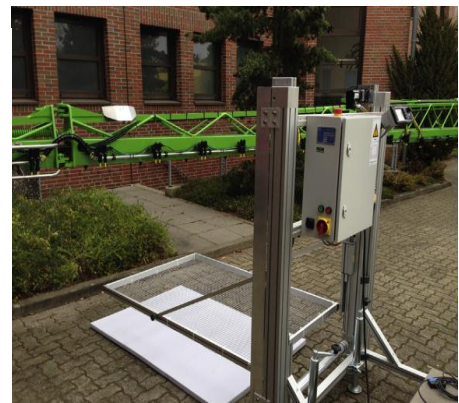
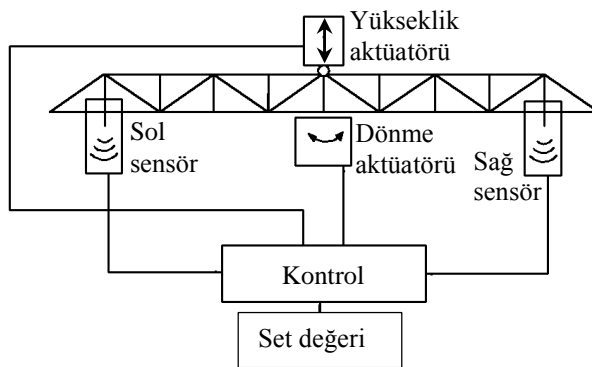
Herbst ve ark. (2015), bum yükseklik kontrol sistemlerini daha kontrollü bir ortamda karşılaştırmak için sabit bir deney düzeneği oluşturmuştur (Şekil 2.6.). Bu sistemde, aynı anda bumun her iki tarafındaki değişen zemin yüksekliğini simüle etmek için iki adet motor tahrikli lineer kaldırma ve indirme platformlu bir test tezgahı kullanılmıştır. Platform yükseltildiğinde veya alçaltıldığında, ultrasonik sensörden platforma olan mesafe, bum yükseklik kontrol sisteminin tepki vermesine ve seviye yüksekliğini korumaya çalışmak için bum kanatlarının ayarlanmasına neden olmaktadır. Bu platform, test sırasında kanatların altındaki değişen araziye simüle etmek için bir tahrik sinyali ile farklı hızlarda ve yüksekliklerde yükseltilip ve alçaltılarak, yapay bir sprej hedef alanı oluşturulmuştur. İki farklı test, beş tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk testte, makinenin her iki tarafındaki platformlar yükseklik kontrolünü değerlendirmek için aynı anda yükseltilip, alçaltılmıştır. İkinci testte ise platformlar, eğim kontrolünü değerlendirmek için zıt yönlerde yükseltilmiş ve alçaltılmıştır.



Şekil 2.6. Hareketli test platformu (Herbst ve ark., 2015).

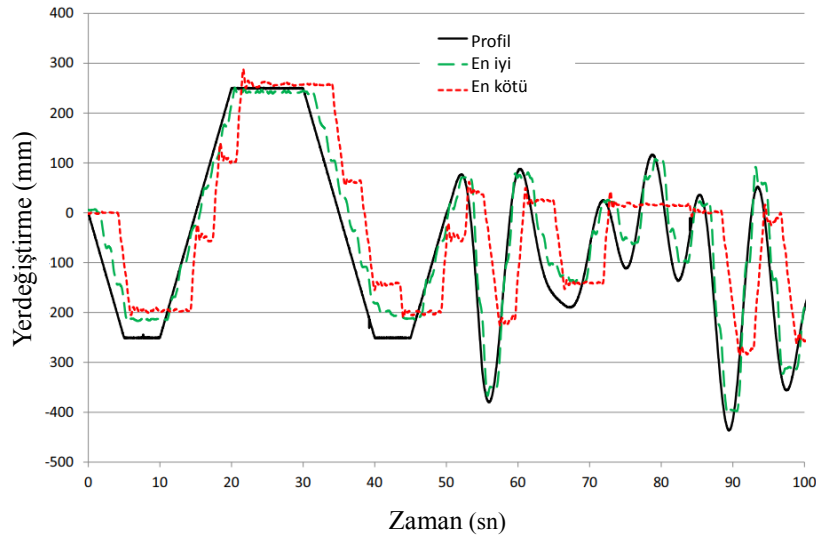
Platformun üzerindeki bumun yüksekliğini kaydetmek için ultrasonik sensör ile aynı konuma lazer sensörü monte edilmiştir. Bum yüksekliği verilerini analiz etmek ve sistemin genel performansını test etmek için, standart sapma ve varyans katsayısı değerleri yükseklik verilerinin sapmasından hesaplanmıştır. Ayrıca, hedef yüksekliğin %20'sinden daha az sapan veri noktası yüzdesi hesaplanmıştır. Son olarak hedef yüksekliğin %10'undan daha az sapan, %10-%30 arasında sapan, %30-%50 arasında sapan, %50 ve daha fazla sapan veriler kullanılarak değiştirilmiş Hockley Endeksi (Griffith ve ark., 2012) hesaplanmıştır. Ancak Hockley Endeksinin varyasyon katsayısına benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Farklı test tekrarlarından, sistemin sabit ve tekrarlanabilir sonuçlar ürettiği belirtilmiştir.

Herbst ve ark. (2018), otomatik bum yükseklik kontrol sistemlerinin performansını değerlendirmede nesnel bir test yöntemi geliştirmek için çalışma gerçekleştirmişlerdir. Püskürtücü bumun yükseklik sensörlerinin altına, zemin veya bitki yüzey kanopisini temsil eden hedef alanlardan oluşan ve sabit test düzeneğine dayanan bum yükseklik kontrol sistemlerinin, kontrol doğruluğunu değerlendirmek için bir protokol geliştirilmiştir. Deney düzeneğinde (Şekil 2.7.) bulunan püskürtme yapay hedef alanlardan her biri, programlanabilir kontrolör tarafından aktive edilen bir adım motoru tarafından tahrik edilen doğrusal kılavuz üniteleri yardımıyla dikey yönde hareket ettirilebilmektedir.



Şekil 2.7. Otomatik bum yükseklik kontrol sistemi prensip şeması ve test tezgahının hedef alan birimi (Herbst ve ark., 2018)

Test tezgahı ve geliştirilen protokol, bum yükseklik kontrol sistemlerinin tanımlanmış koşullar altında sabit bir testte (Şekil 2.8.) performansını değerlendirmek için uygun olduğunu kanıtlamıştır. Test tekrarları tutarlı sonuçlar vermiştir.

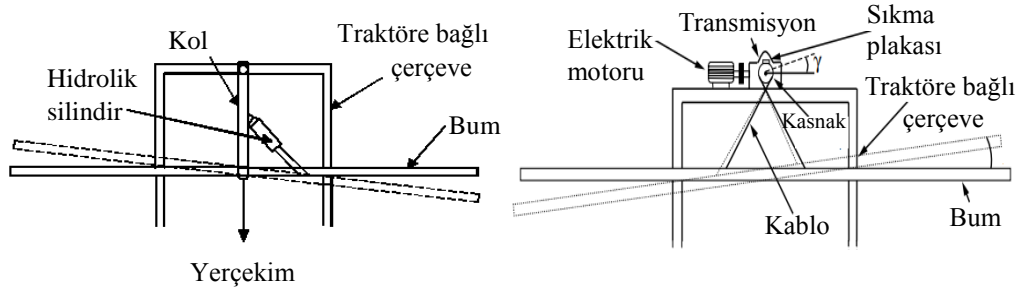


Şekil 2.8. Yükseklik kontrol modunda, en iyi ve en kötü yükseklik kontrol sistemi için, hedef alanın (profil) ve sol yan yükseklik sensörünün pozisyonundaki püskürtme bumunun yer değiştirmeleri birimi (Herbst ve ark., 2018).

Sistem performansını karakterize etmek için birkaç istatistiksel parametre uygun bulunmuş, ancak en iyi seçicilik set noktasından standart sapma ile sağlanmıştır. Geliştirilen test tezgâhının, performans sınırlarının tanımlanmasının yanı sıra bum yükseklik kontrol sistemlerinin değerlendirmesinde standartlaştırılmış bir protokolün potansiyel temeli olabileceği belirtilmektedir.

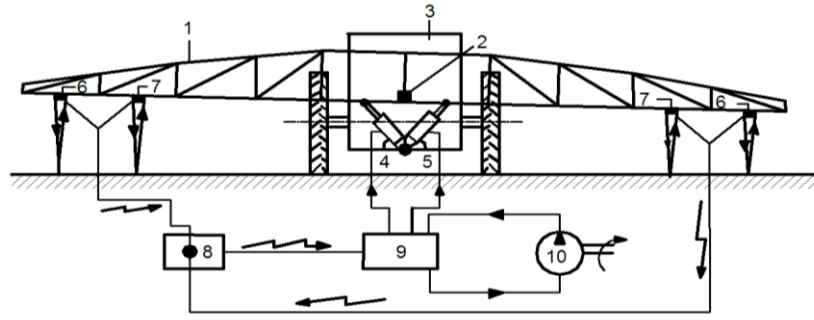
Arazideki dalgalanmaları izleyen matematik modellerin geliştirildiği bazı çalışmalar Deprez ve ark. (2002; 2003) gerçekleştirmiştir. Tamamlanan çalışmalarda, model yapıları dört farklı süspansiyon tipi için de aynı çıkmıştır. Analitik olarak belirlenen modeller doğrulanmıştır. Yavaş aktif süspansiyon oluşturmak için kontrolör tasarlanmıştır. Arazi yapısı dalgalanmalarında bumun yere paralel tutulmasını sağlamak için küçük güçlü (70W) DC motor ile sürülen, sağ ve sol bum kollarına birer adet ultrasonik sensör yerleştirilmiş kablolu süspansiyon sisteminin (Şekil 2.9.) simülasyon modeli oluşturulmuş, simülasyonda farklı kontrol teknikleri (P ve PI) ile denemeler gerçekleştirilmiştir. Sistemi doğrulama için sallama platformunda

laboratuvar deneyleri yapılmış ve arazi koşullarında sisteme giriş uygulanarak sönümleyicili ve sönümleyicisiz pasif süspansiyon ve düşük frekanslı uyarımlara cevap veren düşük hızlı aktif süspansiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sistemde, elektrik motoru çalıştırılmadığında pasif süspansiyon çalışmakta, eğer sistem eğimli arazide çalışıyorsa bumun açısı elektrik motoru aracılığıyla düzeltilmektedir. Sistemde motorun sürdüğü kasnağın açısını ölçmek için potansiyometre, bum açısını ölçmek için iki adet ultrasonik sensör kullanılmıştır. Sadece yavaş aktif sistem bumu yere paralel tutabilmiştir. Saha denemelerinde düşük motor gücüne rağmen aktif süspansiyon ile bum hareketlerinin önemli miktarda azaldığı, sönümleme oranının arttığı görülmüştür.



Şekil 2.9. Yavaş aktif pendulum ve kablolu süspansiyon (Deprez ve ark., 2002; 2003)

Musillami ve ark. (1982) ve Bondesson (1986), aktif süspansiyonu, salınım sisteminin dış kuvvetlere ve bum hareketlerine karşı kuvvetler üretecek şekilde harici enerjiyle çalışan bir kontrol sistemi olarak tanımlamışlardır. Bumun zemine veya bitkilere göre konumlandırma için, mikroişlemci ile kontrol edilen pendulum tip aktif bum kontrol sistemi yapısı gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir (Şekil 2.10.).

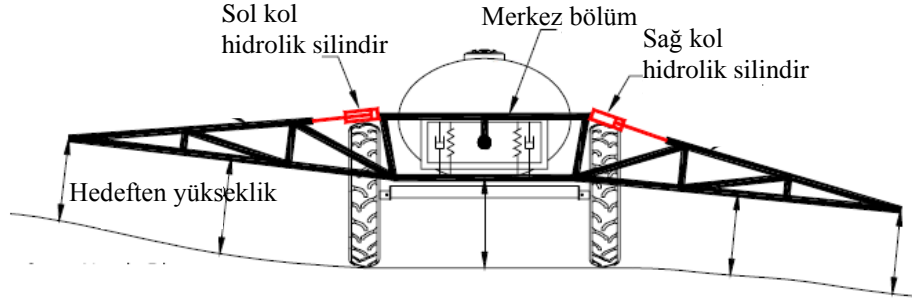


- | | | |
|-----------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 1. Bum | 4,5. Hidrolik silindirler | 9. Elektrohidrolik servo valfler |
| 2. Süspansiyon aksı | 6,7. Ultrasonik sensörler | 10. Traktör tahrikli hidrolik pompa |
| 3. Bağlantı çerçevesi | 8. Mikrodenetleyici | |

Şekil 2.10. Pendulum tip aktif bum sistemi (Musillami ve ark., 1982; Bondesson, 1986).

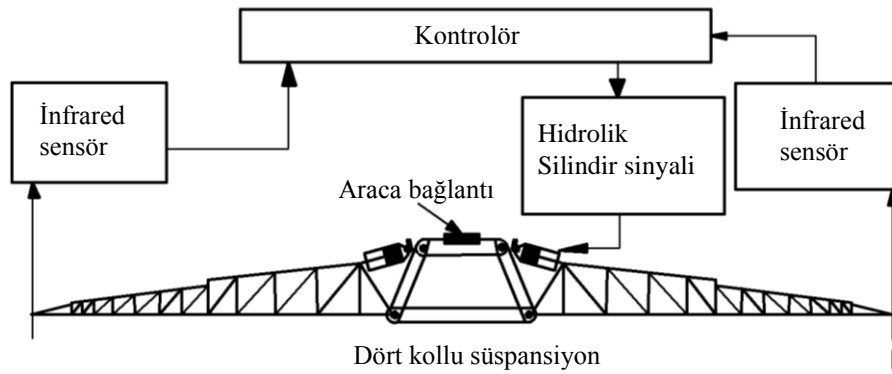
Hicks (2005)'in bu çalışmasında, Şekil 2.11.'de görülen ve üzerinde pasif süspansiyon ve sağ-sol kolları hidrolik silindirle tahrik edilen ve aktif süspansiyonlu üç bölümden oluşan bir ilaçlama makinesi bumunun dinamik simülasyon modeli oluşturulmuştur. Çalışmada, bum hareketlerini sınırlandırmak için yapılan pasif süspansiyon sistemlerinin optimizasyonu ve bum yapısının bir bütün olarak yönlendirmesini gerçekleştiren çalışmalardan farklı olarak, pasif süspansiyonun sağ ve sol taraflarında bulunan ve birbirinden bağımsız hareket eden aktif süspansiyon sistemindeki hareketlerin birbirlerine olan olumsuz etkiler araştırılmıştır. Bu amaçla kinetik, kinematik, trigonometrik ve akışkan güç ilişkileri kullanılarak püskürtücü sistemin simülasyon modeli oluşturulmuştur. Aktif süspansiyonda bağımsız olarak hareket eden bir taraftaki kanadın on/off valf ile kontrolü gerçekleştirildiğinde, ortaya çıkan negatif etkileri azaltmak için oransal valf ve PWM valf ile aktif süspansiyonun hızlanma oranının kontrol edilmesinin sonuçları değerlendirilmiştir. Model gerçek sistemi kısmi olarak temsil etmektedir. Modeli doğrulamak için deneysel doğal frekans, birinci salınımın genliği ve salınım süresi simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Model kabul edilebilir bulunmuştur. Sistemin bir tarafında bulunan aktif süspansiyonun uygulanan uyarıcılara karşı düzeltme tepkisinde, on/off tahrikli aktüatörde büyük basınç artışları büyük kütleli bumda hızlanma oranını sınırlayamadığı için, hareketsiz bölümlerde hedeften sapma miktarı ve süresinin fazla olduğu görülmüştür. Oransal valf kullanıldığında ise hareketsiz bölümlerdeki sapma büyüklüğü ve süresi azalırken, aktive edilen bölümde ise valfin düzeltme süresi uzun olduğundan sapma büyüklüğü artmıştır. Ancak toplam sapma

büyüklüğü ve süresi azalmıştır. PWM tahrikli on/off valf kullanıldığında ise akış ve basınç darbeleri azalmış daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 2.11. İki kollu hidrolik silindire tahrik edilen aktif bum sistemi (Hicks, 2005).

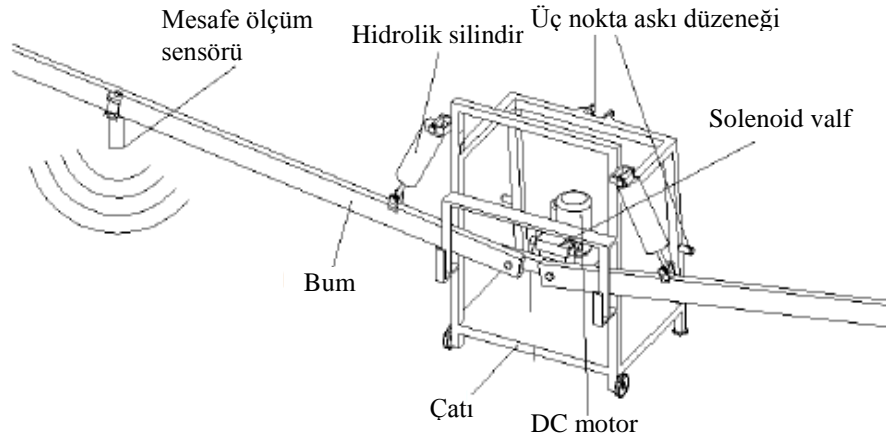
Sun ve Miao (2011), önerdikleri simülasyon modelinde dört kol bağlantılı pasif süspansiyon ve iki kollu aktif süspansiyon sisteminde bum ile bitki arasındaki mesafeyi ölçmek için infrared mesafe sensörü, bumu hedef mesafeye yaklaştıran aktif süspansiyonu tahrik etmek için ise oransal valfle sürülen hidrolik silindir kullanmışlardır (Şekil 2.12.). Dinamik simülasyon analizleri sonucu, sistemin küçük eğim aralıklarında çok iyi performans gösterdiği belirtilmektedir.



Şekil 2.12. Bum dengeleme sistemi blok diyagramı (Sun ve Miao, 2011)

Koç ve Keskin (2011), Şekil 2.13.'de görülen prototip bir model üzerinde yaptıkları çalışmada, hidrolik silindire tahrik edilen, birbirinden bağımsız hareket edebilen ve iki koldan oluşan bir fiziksel modelde, her iki buma ultrasonik sensör yerleştirilmiştir. Ultrasonik sensörden gelen yükseklik bilgisine göre on/off kontrol yöntemi kullanılarak, hidrolik aktüatörlerle laboratuvar ve arazi koşullarında bum

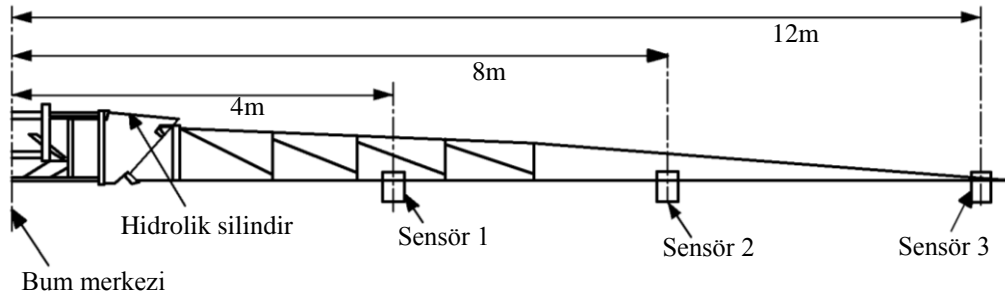
yükseklik kontrolü gerçekleştirilmiştir. Arazi deneylerinde üç farklı hız (3,5, 4,5, 6 km/h), üç farklı arazi zemini (anızlı, tırmıklı, yoncalı) ve üç farklı yükseklik (60, 80, 100 cm) ayar değeri kullanılmıştır. Sistemde on/off gerçekleştiren rölelerin kısa aralıklarla devreye girmesi sonucu zarar görmemesi, hidrolik ve mekanik kısımların uyumlu çalışması için ± 3 cm bant genişliği bırakılmıştır. Sistemin zemin koşullarından ve hız farklılıklarından etkilendiği görülmüştür. Ayrı ayrı kontrol edilen her iki bumun benzer karakteristikleri gösterdiği ve sistemin bumları ayarlanan yükseklik değerinde aktif olarak tuttuğu görülmüştür.



Şekil 2.13. Prototip bum sistemi genel görünümü (Koç ve Keskin, 2011).

Pontelli ve Mucheroni (2012), pasif ve aktif kontrol (PID ve Bulanık kontrol) simülasyon denemeleri için bum süspansiyon modeli geliştirmişlerdir (Şekil 2.14). Bum üzerine farklı uzaklıklarda yerleştirilen ve her birinin yükseklik bilgisi farklı katsayılarla çarpılarak ağırlıklandırılmış üç konum sensörünün mesafe bilgileri toplanarak zemine olan yükseklik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar pasif süspansiyon, aktif bir PID kontrollü süspansiyon ve aktif bulanık kontrollü süspansiyonu değerlendirmek için yapılmıştır. Geliştirdikleri modele 50 cm referans yükseklik için sırasıyla, iki farklı adım sinyali, iki farklı genlikli ve iki farklı frekanslı sinüs sinyali, üç farklı ilerleme hızı (5, 7,5, 10 km/h) için düz ve pürüzlü standart traktör titreşim sinyali uygulamışlardır. Adım sinyalleri maksimum aşma, yerleşme zamanı ve güç tüketimi için, sinüs sinyalleri bum salınım koşullarını ve her bir kontrol yöntemi için harcanan gücü ölçebilmek için, standart sinyaller ise her bir

kontrol yöntemi için bum salınımı ve harcanan gücü ölçmek için değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre pasif süspansiyon ile aktif süspansiyonu karşılaştırmışlar ve aktif süspansiyon uygulandığında bum yüksekliğinin referans değere yakın değerlerde tutulabildiği sonucuna varmışlardır. Simülasyon çalışması sonucunda farklı uyarıcı tiplerine karşı PID kontrollü aktif süspansiyon sistemi ile bulanık kontrollü aktif süspansiyon sisteminin benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.



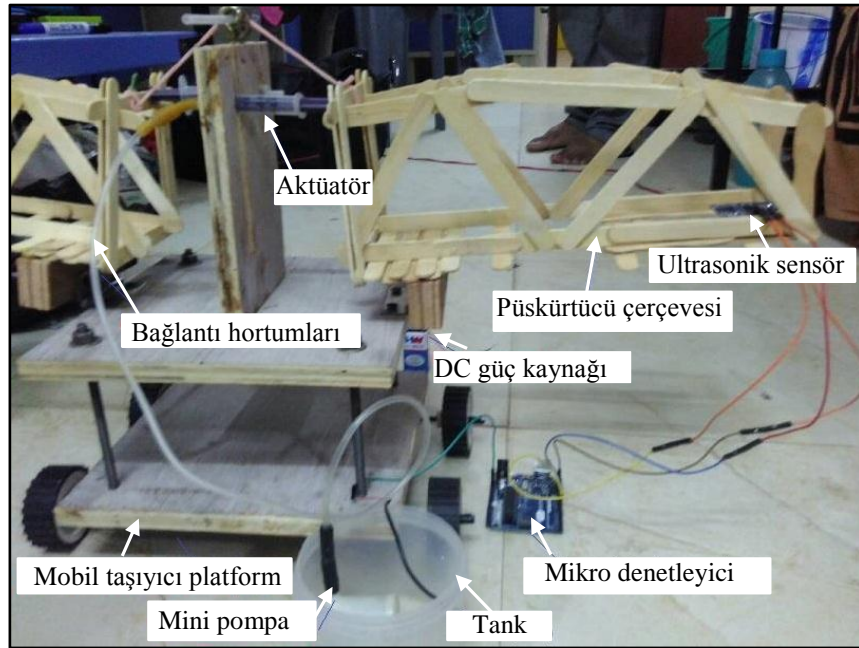
Şekil 2.14. Hidrolik silindire tahrik edilen üç sensörlü aktif bum sistem (Pontelli ve Mucheroni, 2012).

Tahmasebi ve ark. (2013), pendulum tip aktif bum süspansiyon sisteminde istenmeyen dikey hareketleri kontrol etmek için aktif kuvvet kontrolü tabanlı sistem tasarlamış ve simüle etmişlerdir. Simülasyon modelinde oransal-türev (PD) kontrolörün kazanç değerlerini ayarlamak ve bumun kütsel atalet momentini tahmin etmek için yapay sinir ağları kullanılmıştır. Simülasyon sonucunda bum titreşiminin ve dikey hareketlerin azaltılmasında büyüklüğü 5 cm ve frekansı 2,2 ve 4,4 Hz sinüzoidal arazi profili için yapay sinir ağları tabanlı aktif güç kontrolü yönteminin, geleneksel PD ve geleneksel aktif güç kontrollü PD yöntemine göre daha iyi performans gösterdiği, performanstaki en önemli iyileşmenin 4,4 Hz arazi profilinde olduğu görülmüştür.

Wei ve ark. (2015) püskürtme bum yüksekliğini kontrol etmek için tasarladıkları aktif süspansiyon sisteminde, bum yüksekliği ultrasonik sensörle ölçülmüş, bumun hareketi ise hidrolik silindire sağlanmıştır. Zemin testi ve saha testi gerçekleştirmişlerdir. Zemin testinde, sistemin basamak uyarma tepkisi ± 3 cm içinde kontrol edilebilmiştir. Saha testinde ise bitki dalları ve yapraklarından kaynaklanan yükseklik karışımını filtreleyip, bum yükseklik kontrolünün gerçekleştirilebildiği gösterilmiştir.

Wang ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada, zemin profili üç adet temas sensörü kullanılarak belirlenmiş ve bum yükseklik kontrolü gerçekleştirilmiştir. Püskürtme yüksekliğinin değişimi ve saha profilinin etkisi deneylerle araştırılmıştır. Bum yüksekliğinin 45 ile 53,3 cm aralığında korunabildiği ve ilerleme hızı 4,02 km/h den düşük olduğunda sistemin profil izleme performansının arttığı görülmüştür.

Suresh ve Manikanta (2017) çalışmalarında, küçük bir dört bağlantı mekanizmalı tarımsal ilaçlama makinası prototipi geliştirmişler (Şekil 2.15.), hidrolik devreyi simüle etmişler ve dinamik analizini yapmışlardır. Çalışmanın ana amacı mikro denetleyici ile kontrol edilen hidrolik sistem ile bum titreşimlerinin ve seviye farkının ortadan kaldırılması olarak belirtilmiştir. Çalışmada bum kollarının uzun olması nedeniyle küçük açı değişimlerinin sprey paternini çok büyük oranda etkilediği vurgulanmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, kompanzasyon sistemlerinin etkin bir şekilde çalıştığının prototip sistemde gösterildiği, sistemin gerekli sonuçları ve sistem cevabını verebildiği belirtilmiştir.

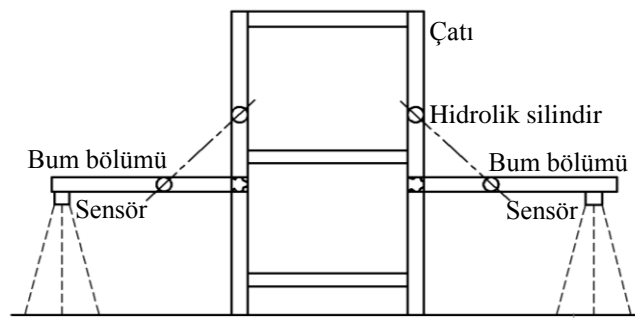


Şekil 2.15. Bum püskürtücü seviye dengeleme sisteminin prototipi (Suresh ve Manikanta, 2017).

Liu (2017)'nin gerçekleştirdiği çalışmada, bumun zeminden yüksekliği ultrasonik sensörle ölçülmüş, bum çubuğunun yüksekliği ise elektrik motorunun dönme hareketini doğrusal harekete dönüştürdüğü bir aktüatör kullanılarak

gerçekleştirilmiştir. Denemelerde motorun hızı PWM yöntemiyle kontrol edilmiş, bum çubuğunun yüksekliği referans değerden uzak olduğunda motor hızı artırılmış, yükseklik hatası az olduğunda ise motorun daha düşük hızlarda çalışması sağlanmıştır. Zemine göre referans yüksekliğin 50 cm alındığı denemelerde, ultrasonik sensörün ölçtüğü yükseklik 49-51 cm aralığında olduğunda aktüatör bum çubuğunu hareket ettirmemiştir. Başlangıç yüksekliği 75 ile 35,2 cm aralığında sekiz farklı değere ayarlandığında, bum çubuğunun 48-52 cm aralığına 2,2 ile 2,8 sn. süre aralığında ulaştığı belirtilmiştir.

Karadöl ve ark. (2017) laboratuvar ortamında gerçekleştirdikleri çalışmada, ilaçlama makinası bumlarını temsil eden bir deney düzeneği (Şekil 2.16.) kullanarak bum kollarının yüksekliğini ayarlamak için PID kontrolörle kontrol edilen oransal valf kullanmışlardır. Deney düzeneğinde bum kolları elektrohidrolik sistemle tahrik edilmekte, bum yüksekliği ultrasonik mesafe sensörü ile ölçülmektedir. On/off kontrolde hidrolik valflerin aniden açılmasının oluşturduğu osilasyonun, kararsız çalışmaya neden olduğu belirtilmektedir. PID kontrolde kazancın %100 artırılmasının on/off kontrole benzer kararsız çalışmaya neden olduğu belirtilmektedir. Düşük kazanç değerleri kullanıldığında ise hidrolik silindire verilen yağın oransal valfler ile daha doğru ayarlanabilmesi sonucu, daha yumuşak bum hareketleri elde edilmiştir.

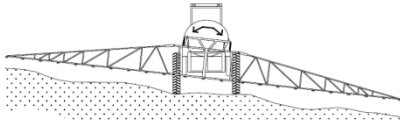


Şekil 2.16. Bom bölümlerinin şeması (Karadöl ve ark., 2017)

Miles (2018) çalışmasında, üç farklı sistem, iki farklı hedef yüksekliği (yaklaşık 88,9, 114,3 cm) ve iki farklı hız (yaklaşık 16,9, 24,14 km/h) için üç tekrarlı denemeler gerçekleştirmiştir. Denemelerde ultrasonik sensörlerden elde ettiği verileri

kullanarak standart sapma ve ortalama yükseklik değerlerini esas alan ve farklı yükseklik kontrol sistemlerinin performanslarını ölçebilen bir performans kriteri geliştirmiştir. Geliştirilen performans kriterinin arazi yapısı ve bum yüksekliği hatası arasındaki ilişkiyi açıklayan nicel bir kriter olarak, sistemin performansı hakkında bilgi verebildiği belirtilmektedir. Ayrıca hız artışıının standart sapmayı arttırdığı belirtilmiştir.

Günümüzde elektronik ve bilgisayar teknolojilerini kullanan aktif süspansiyonlu otomatik bum yükseklik kontrol sistemleri birçok bumlu püskürtücü üreticisi tarafından kullanıma sunulmaktadır (Şekil 2.17.).



Şekil 2.17. Ticari olarak geliştirilmiş bum yükseklik kontrol sistemi şematik gösterimi ve resmi (Norac, 2015).

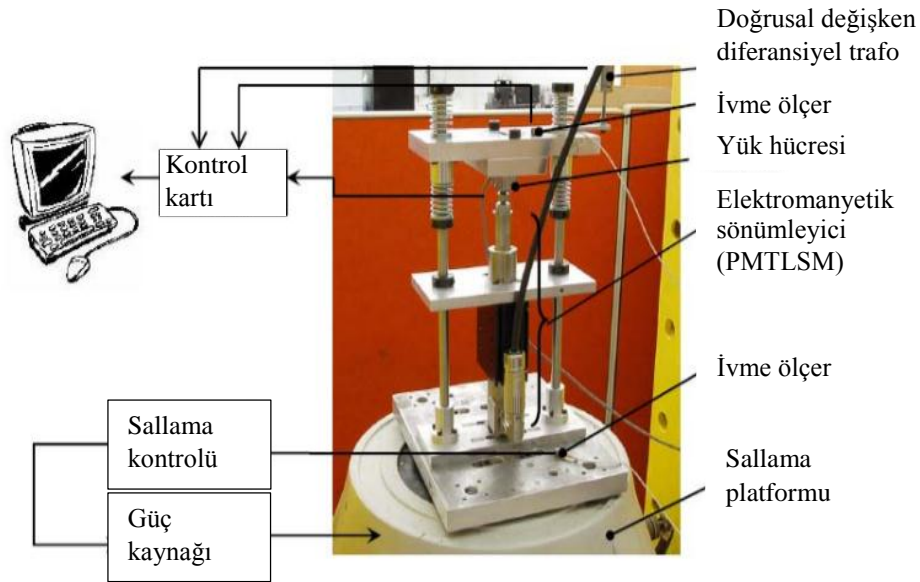
Bu sistemler arazi yapısı dalgalanmasından ve bumun dönme hareketinde bağımsız olarak, püskürtücü ile hedef bitki ya da zemin arasındaki mesafeyi korumak için tasarlanmıştır. Bilinen tüm sistemlerde bumun hedeften yüksekliği ultrasonik sensörler ile ölçülmekte ve referans değer ile karşılaştırılarak tolerans değeri aşıldığında, ilaçlama yüksekliğinin ayarlanan değerden sapmasını en aza indirmek için, bum hidrolik aktüatörler ile etkinleştirilmektedir. Bu sistemlerde, püskürtücüleri taşıyan bum kanatlarının yükseklik kontrolü ve bumun dönme hareketi kontrolü gerçekleştirilmektedir.

Lineer motorlar araç (otomobil) modellerinde aktif süspansiyon kontrolü için literatürde bazı çalışmalarda kullanılmıştır. Martins ve ark. (2006) gerçekleştirdikleri çalışmada, otomobil aktif süspansiyonu için hidrolik ve elektromanyetik sistemleri karşılaştırmışlardır. Çalışmada, süspansiyon performansında önemli gelişmelerin aktif süspansiyon sistemleri tarafından sağlandığı ancak hidrolik ve pnömatik sistemlerle gerçekleştirilen süspansiyon sistemlerinin araç salınım problemlerini

tatmin edici şekilde çözemediği belirtilmektedir. Deney ve analizler sonucunda elektromanyetik süspansiyon sistemlerinin araçlarda kullanılabileceğini kanıtlayan sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir.

Wang ve ark. (2011), tüp tipi daimi mıknatıslı lineer motor ile aktif süspansiyon sistemi gerçekleştirmiş ve motor üzerinde yapılan ölçümlerle tasarım ve performans tahminleri doğrulanmıştır. Lineer elektromanyetik motor bazlı aktif süspansiyonun, üstün kontrol edilebilirlik ve bant genişliğine sahip olduğu, yük yalıtımı sağladığı ve bu nedenle büyük bir potansiyeli bulunduğu, aynı zamanda, pasif sistemlerde amortisörde dağıtılan enerjiyi geri kazanma ve daha enerji verimli bir süspansiyon sistemi ile sonuçlanma olanağına sahip olduğu belirtilmektedir.

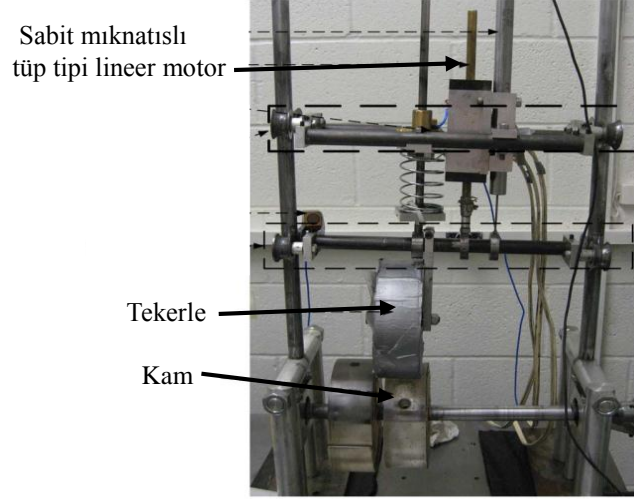
Ebrahimi (2009), sabit mıknatıslı tüp tipi lineer senkron motor ile yarı aktif ve aktif araç süspansiyon sistemlerini karşılaştırmak için deney düzeneği tasarlamıştır (Şekil 2.18.).



Şekil 2.18. Çeyrek araç modeli aktif süspansiyon deney düzeneği (Ebrahimi, 2009).

Lee ve Kim (2010) yaptıkları çalışmada, aktif süspansiyon sistemi kontrolünde kuvvet üreten bileşen olarak doğrudan tahrikli sabit mıknatıslı tüp tipi lineer senkron motorun kullanıldığı, çeyrek araba test düzeneği geliştirmişlerdir (Şekil 2.19.).

Dönen bir kam sistemi ile yapay referans üretilmiştir. Aktif süspansiyon kontrolü farklı kontrol yöntemleri ile test edilmiştir. Kontrol metodolojilerinin etkinliğini göstermek için hem simülasyon hem de deney sonuçları sunulmuştur. Kontrol performansına göre, geliştirilen aktif süspansiyon uygulaması için en uygun kontrol metodolojisi olarak bulanık kontrol bulunmuştur.



Şekil 2.19. Aktif süspansiyonlu çeyrek araç modeli (Lee ve Kim, 2010).

Literatürde ayrıca, tek bir nozulun püskürtme kontrolünün gerçekleştirildiği çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalardan biri Zaman ve ark. (2011) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, tasarlanan bir ilaçlama makinası önüne yerleştirilen sekiz adet ultrasonik sensör ile bitki boyları ölçülmüş, hedef bitkiden farklı boydaki yabancı otlara araç arkasına yerleştirilen ve birbirinden ayrı kontrol edilebilen oransal valfler kullanılarak değişken oranlı ilaçlama yapılmıştır.

Literatür ışığında elde edilen veriler incelendiğinde aşağıda sunulan çıkarımlar bu tez çalışmasının özgünlüğünü ortaya koymaktadır.

1. Birçok püskürtücünün bağlı olduğu bum kolunun hareket ettirilmesi yerine, tek bir püskürtücü yüksekliği diğerlerinden bağımsız olarak dikey doğrultuda hareket etmektedir. Böylece aynı sıra üzerindeki farklı boylardaki bitkiler ile püskürtücü arasındaki mesafe sabit tutulmaktadır.

2. Tarımsal ilaçlama yükseklik kontrolünde, püskürtücü yüksekliğini ayarlamak için hidrolik silindir yerine, sabit mıknatıslı tüp tipi lineer senkron motor kullanılmıştır. Tarımsal ilaçlamada püskürtücü yükseklik kontrolü literatürde ilk kez hidrolik silindir yerine, sabit mıknatıslı tüp tipi lineer senkron motor kullanılarak gerçekleştirilmiştir.
3. Laboratuvar da konveyör bant üzerine yerleştirilen farklı boylardaki yapay bitkilerle sanal bitki yükseklik profili oluşturulmuştur.
4. Laboratuvar deneylerinde püskürtücü yükseklik kontrolü sensör iki ayrı şekilde konumlandırılarak ve farklı kontrol yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.
5. Tek püskürtücülü yükseklik kontrol sistemi ile gerçekleştirilen arazi deneylerinde, ıslak alan yüzdesi (kaplama oranı) hesaplanmış ve sistemin ilerleme yönündeki dağılım düzgünlüğüne katkısı araştırılmıştır.
6. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, sabit mıknatıslı tüp tipi lineer senkron motorların endüstriyel tarımsal ilaçlama da verimli bir şekilde kullanılabilirliği ispatlanmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, tarımsal ilaçlama için sabit mıknatıslı tüp tipi lineer senkron motorun kullanıldığı aktif yükseklik kontrol sistemi geliştirmek, sistemin performansını laboratuvar koşullarında ve arazi şartlarında deneysel olarak incelemektir. Bu amaçla tez çalışmasının kapsamı ve içeriği;

1. Laboratuvar ortamında yamuk hareket profiline sahip PMTLISM tarafından tahrik edilen bir püskürtücü yükseklik kontrol sisteminin geliştirilmesi,
2. Yükseklik kontrol sisteminde PMTLISM simülasyon modelinin elde edilmesi,
3. Laboratuvar da tasarlanan yükseklik kontrol sisteminin, üzerinde farklı boylardaki yapay bitkilerin bulunduğu hareketli konveyör bant sisteminde, konveyör bandın farklı ilerleme hızları ve PMTLISM'nin farklı ivme değerleri için test edilmesi,
4. Ultrasonik sensörün konveyör hareket yönüne göre konumlandırılarak sanal bitki profiline göre yükseklik kontrolünün gerçekleştirilmesi,
5. Ultrasonik sensörün püskürtücünün bağlı olduğu doğrusal hareketli eden rotor ucuna bağlanıp, PID ve Bulanık PID kontrol yöntemleri ile yükseklik kontrolünün gerçekleştirilmesi,

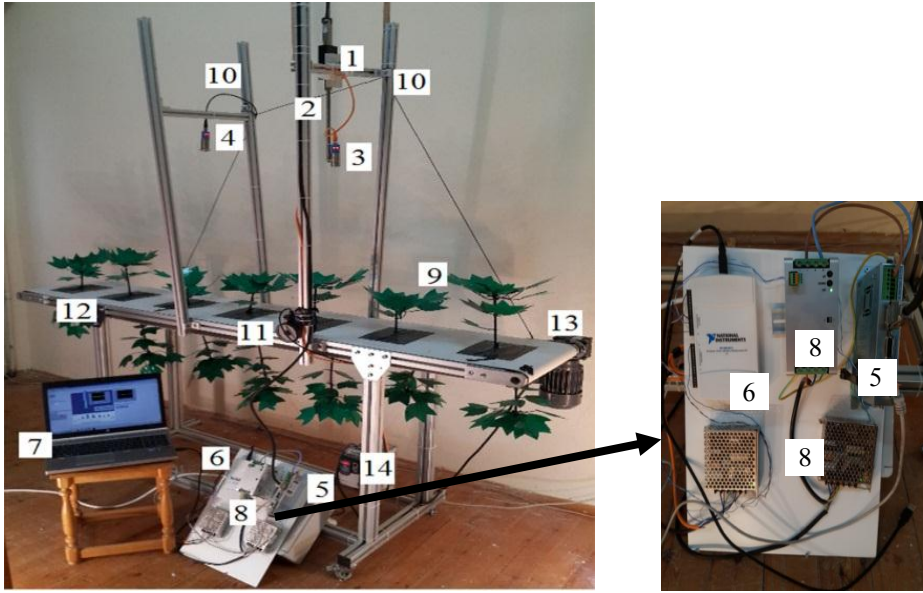
6. Laboratuvar çalışmalarında yükseklik kontrolü performans kriteri olarak yükseklik sapmalarını belirlemek için varyasyon katsayısının ve motorun termal yüklenmesini belirlemek için RMS akım değerinin kullanılması,
7. Laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak yapılan istatistik analiz sonucunda elde edilen en uygun yöntem ve PMTLSM ivme değerine göre yükseklik kontrol sisteminin arazi koşullarında test edilmesi,
8. Arazi şartlarında farklı boylardaki gerçek bitkiler üzerinde ıslak alan yüzdesi (sıvı kaplama oranı) belirlenmesi ve sistemin ilerleme yönünde ilaç dağılım düzgünlüğüne katkısının araştırılması konularından oluşmaktadır.

BÖLÜM 3. MATERYAL

Tez çalışmasında tasarlanan sistem ilk etapta laboratuvar koşullarında denenmiş, daha sonra ise arazi şartlarında testler yapılmıştır. Tüm bu çalışma da kullanılan materyal ve ekipmanlar aşağıda ayrı başlıklarda sunulmuştur.

3.1. Laboratuvar Deney Düzeneği

Tarımsal ilaçlama da etkin bir ilaçlama için püskürtücü ile farklı boylardaki bitkiler arasındaki mesafeyi, ayarlanan değerde sabit tutan püskürtücü yükseklik kontrol sistemi deney düzeneği geliştirilmiştir. Laboratuvar ortamında tasarlanan sistem Şekil 3.1.'de sunulmuştur.



- | | | |
|--|------------------------|----------------------------------|
| 1. PMTSLM, | 6. Veri toplama kartı, | 11. Tekerlek tip enkoder, |
| 2. Doğrusal hareketli rotor, | 7. Laptop, | 12. Konveyör bant, |
| 3. Püskürtücü ve 2. ultrasonik mesafe sensörü, | 8. Güç kaynakları, | 13. Redüktörlü indüksiyon motor, |
| 4. Birinci ultrasonik mesafe sensörü, | 9. Yapay bitkiler, | 14. Ayarlanabilir motor sürücü |
| 5. Servo sürücü, | 10. Köprüler, | |

Şekil 3.1. Püskürtücü yükseklik kontrol sistemi laboratuvar deney düzeneği (Ilıca ve Boz, 2018)

Deney düzeneği, yüksek performanslı PMTSLM, servo sürücü, yapay bitkileri taşıyan konveyör bant sistemi, ultrasonik mesafe sensörü, veri toplama kartı (DAQ), dizüstü bilgisayar, tekerlek tipi artımlı enkoder ve güç kaynaklarından oluşmaktadır.

3.1.1. Konveyör bant sistemi

Uzunluğu yaklaşık 410 cm genişliği 60 cm olan konveyör bant, üç fazlı redüktörlü indüksiyon motoru (Gamak AGM632A-3000rpm, Türkiye) tarafından çalıştırılmaktadır. Bant ilerleme hızı indüksiyon motoru süren hız kontrol cihazı (Allen-Bradley 22F-A1P6N103, ABD) ile değiştirilebilmektedir. Konveyör bant hızı, tekerlek tipi artımsal enkoder ile ölçülmektedir (Autonics ENC-1-1-V-5, South Korea). Konveyör bant üzerine farklı boylarda yapay bitkiler monte edilmiştir.

3.1.2. Ultrasonik mesafe sensörleri

Ultrasonik sensörler, ölçüm aralığı içerisinde güvenilir ve kararlı ölçüm performansı göstermelerinin yanında, ekonomik ve uygulamasının kolay olması nedeniyle mesafe ölçme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Liu ve ark., 2015). Tarım makinalarında da kullanılan ultrasonik mesafe sensörleri mesafe ölçümünde bir ses darbesinin sensörden nesneye ve ardından nesneden tekrar sensöre geri dönmesi için gereken zamanı hesaplayarak mesafe ölçümü gerçekleştirmektedir. Ancak bu sensörler ultrasonik dalgaların düzgün bir şekilde geri yansımaları için hedefin sensöre dik olması gereksinimi duymaktadır (Subramanian ve ark., 2005). Ses sinyallerini iyi yansıtmayan yüzeyler, ultrasonik sensör ölçmelerini olumsuz etkilemektedir (Dong, 2014). Bu çalışmada, sensör ölçüm hatalarını önlemek için bitkiler üzerindeki yaprakların ultrasonik sensöre dik olması sağlanmış yan yana iki yapay bitki arasında boşluk en aza indirilmiştir. Satow ve ark., (1992) bu yükseklik kontrol sistemlerinde, 40 kHz ultrasonik sensörün duyarlılığını tespit etmek için farklı bitkilerde gerçekleştirdikleri denemelerde, hedef bitkilerde yaprak geniş olduğunda ultrasonik sensörün doğru ölçme performansının arttığını bildirmişlerdir. Ayrıca ultrasonik sensörün püskürtme yüksekliği kontrol sistemlerinde yükseklik mesafesini ölçmek için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Deney düzeneğinde sensör ayrı konumlu çalışma için iki adet, sensör üst konumlu çalışma için bir adet ultrasonik sensör kullanılmıştır. Sensör ayrı konumlu çalışmada kullanılan ultrasonik mesafe sensörlerinden (Sick UM30 213113, Almanya) biri konveyör bant üzerinde ikinci bir çatıya monte edilmiş ve hedef yapay bitki mesafesini ölçerek referans profilini üretmek için kullanılmaktadır. Aynı özellikteki ikinci sensör ise doğrusal hareket eden rotor ucuna monte edilmiş ve kontrol işlemi sonucunda püskürtücü ile hedef bitki arasındaki mesafeyi ölçmektedir. Ultrasonik mesafe sensörü tarafından voltaj olarak sürekli ölçülen yükseklik, DAQ aracılığıyla bilgisayara iletilmektedir.

3.1.3. Veri algılama kartı

Sensörden gelen yükseklik bilgilerini okumak ve analog gerilim kontrol sinyallerini servo kontrolöre göndermek için bilgisayar ile USB 2.0 portu aracılığıyla haberleşen

veri toplama kartı (National Instrument NI DAQ 6211, ABD) kullanılmıştır. Kontrol sinyallerini üretmek için ise grafik tabanlı programlama dili (National Instrument's LabVIEW 2013, ABD) kullanılmıştır.

3.1.4. Sabit mıknatıslı tüp tipi lineer senkron motorlar

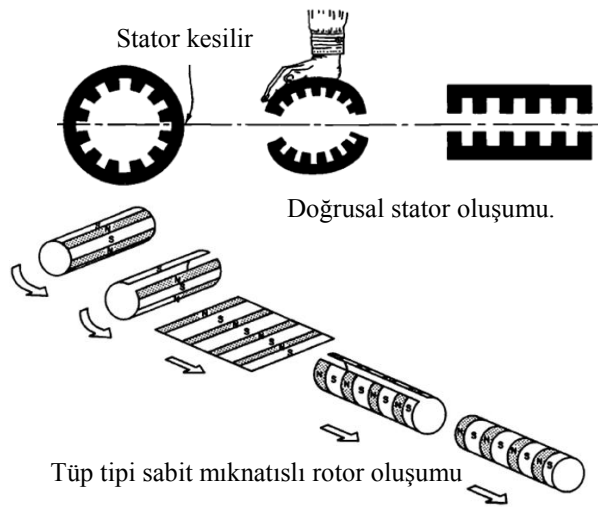
Endüstriyel uygulamalarda doğrusal hareket, hidrolik ve pnömatik sistemler, dönme hareketini doğrusal harekete dönüştüren bilyalı vidalı yol, kremayer dişli, kayış kasnak sistemleri gibi mekanik sistemler ve lineer elektrik motorları ile sağlanmaktadır (Hirvonen, 2006). Süreksizlik, ölü bant varlığı ve diğer karmaşık yapıları nedeniyle, doğrusal olmayan hidrolik sistemlerin hassas kontrolü oldukça zor olmaktadır (Vossoughi ve Donath, 1995; Eryılmaz ve Wilson, 2001). Ayrıca hidrolik sistemlerin hassas kontrolünü sıcaklık, parça aşınması, arz basıncı, yağ yoğunluğu ve sürtünme gibi belirsizlikler zorlaştırmaktadır (Johnston ve Edge, 1991; Johnson, 1996; Yao ve ark., 2000). Hidrolik sistemler yavaş ve hantal olmaları nedeni ile hassas konumlandırma için uygun görülmemektedir (Murphy, 2004). Hidrolik eyleyiciler ile gerçekleştirilen lineer sistemler, yüksek güç gerektiren fakat hassasiyet gerekmeyen uygulamalarda kullanılmaktadır (Kim ve Murphy, 2004). Pnömatik sistemlerin ise hassasiyeti elektrik sistemlere göre daha azdır (Murphy, 2004). Diğer uygulamalarda ise dönen bir motor mili ile motor kam sistemleri, vidalı yol, bilyeli vidalı yol ya da diğer dairesel doğrusal dönüştürücü mekanizmalar kullanılarak uygulamalar gerçekleştirilmektedir (Kim ve Murphy, 2004). Doğrusal harekette yüksek hız/yüksek doğruluk gereklidir. Doğrusal hareket redüksiyon dişlileri ve vidalı yol gibi mekanik iletim mekanizmaları ile mili dönen motorlar kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Ancak mekanik iletim, hem doğrusal hareket hızını ve dinamik cevabı azaltmakta hem de boşluk, büyük sürtünme, atalet yükleri ve yapısal esnekliğe neden olmaktadır. Boşluk ve esnek yapı bir kontrol sisteminde başarılabilirlik doğruluğu sınırlandırmaktadır (Lu ve Li, 2009). Genel olarak mekanik dönüşümlü sistemler karmaşık konfigürasyonları nedeni ile tasarım ve imalat zorluğu yanında sistemin genel verimliliğinin azalmasına neden olmaktadır (Pan, 2016). Bu nedenle endüstride doğrusal hareket gereksinimi olan uygulamalarda dönme hareketini doğrusal harekete dönüştüren mekanik sistemler yerine doğrudan

sürüş sistemleri daha çok ilgi görmektedir (Pan, 2016). Doğrusal hareket uygulamalarında mekanik iletimin olmadığı doğrudan sürülen lineer motorlar, pozisyonlama sistemlerinde yüksek hız/yüksek doğruluk sağlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Lu ve Li, 2009). Lineer motorlar herhangi bir dönüşüm olmadan elektrik enerjisini doğrusal hareket mekanik enerjisine dönüştürdüklerinden daha basit bir yapıya, daha yüksek verimliliğe, daha yüksek hassasiyete, daha düşük tepki süresine ve daha düşük gürültüye sahiptirler. Özellikle 1970'li yıllardan sonra, lineer motorların endüstride kullanımları yaygınlaşmıştır. PMTLSM, yüksek hassasiyetli endüstri uygulamalarında yaygın kullanılmaktadır. Dönen motorlarda tork ve dönme hareketi üretilirken, lineer motorlarda uzunluğu boyunca doğrusal bir kuvvet üretilmektedir. Sonuç olarak, döner motordaki stator ve rotor parçaları, lineer motorda sırasıyla birincil ve ikincil bölümler haline gelmiştir. Bununla birlikte, rotor, farklı lineer motor yapılarında sabit veya hareketli parça olabildiğinden birincil veya ikincil bölüm içinde olabilir (Pan, 2016). Lineer motorlar düz tip tek yanlı, çift yanlı ve tüp tipi lineer motor olarak sınıflandırılabilir. Tüp tipi motorların bir çeşidi olan PMTLSM, basit yapılı, rotor ve stator arasında çekme kuvveti olmayan, uç sargıları bulunmayan, yüksek itme/ağırlık oranına sahip doğrusal hareketlendiricidir (Hor ve ark., 1999).

Sabit mıknatıslı tüp tipi lineer motorlar, hız/ivme limitlerinin ve pozisyon hassasiyetinin yüksek olması, geri dönüş güç kayıplarının az olması, sürtünme ve boşluk olmaması, sessiz çalışması ve yüksek verimli olması gibi özellikleri ile diğer tüm doğrusal hareketlendiricilere göre daha avantajlıdır (Kim ve ark., 1996). Sabit mıknatıslı lineer motorlar avantajları nedeniyle yüksek performanslı endüstriyel uygulamalar için daha uygundur (Röhrig ve Jochheim, 2001). Çekirdeksiz yapılı lineer motorlarda, çekirdekle sabit mıknatıslar arasında elektromanyetik çekim kuvveti olmadığından motorun yüklenmesi azalmakta, yatakların kullanım ömrü artmakta ve yüksek hız cevapları ve daha yüksek ivmelenme sağlanmaktadır (Gieras ve ark., 2012). Rotorda bulunan sabit mıknatısların yüksek enerjisi statorun çekirdeksiz ve oluksuz yapısına izin vermektedir. Çekirdeksiz yapı ısı kayıplarını azaltırken oluksuz yapı pürüzsüz bir kuvvet karakteristiğinin gerektiği hassas

pozisyon kontrolü uygulamalarında daha iyi performans göstermektedir (Meessen ve ark., 2010).

Sabit mıknatıslı lineer motorların tüp şeklindeki konfigürasyonu, Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi dönen elektrik motorlarının, stator ve sabit mıknatıslı rotorunun kesilip açılması mantığı ile elde edilmektedir (Boldea ve Nasar, 1999).



Şekil 3.2. Oluklu statorlu dönen motordan doğrusal stator oluşumu ve dönen sabit mıknatıslı rotordan tüp şeklindeki doğrusal konfigürasyonun elde edilmesi (Boldea ve Nasar, 1999)

Sabit mıknatıslı tüp tipi lineer motorlar diğer tüm doğrusal hareketlendiriciler ile karşılaştırıldığında, maksimum hız ve hızlanma limitlerinin daha yüksek olması, geri dönüş güç kayıplarının az olması, yüksek pozisyon hassasiyeti, eksenel yönde doğrudan fiziksel sınırlama olmaması, dairesel-doğrusal güç kaybının olmaması, sürtünme ve boşluk olmaması, sessiz çalışması, verimlerinin yüksek olması, mekanik yapısının basit ve uzun ömürlü olması gibi avantajlara sahiptir (Kim ve ark.,1996). Hidrolik sistemler ve tüp tipi lineer motorların karşılaştırılması Tablo 3.1'de görülmektedir.

Tablo 3.1. Doğrusal aktüatör olarak hidrolik sistemlerin ve tüp tipi lineer motorların karşılaştırılması (Karaçar, 2001; Luis ve ark., 2007).

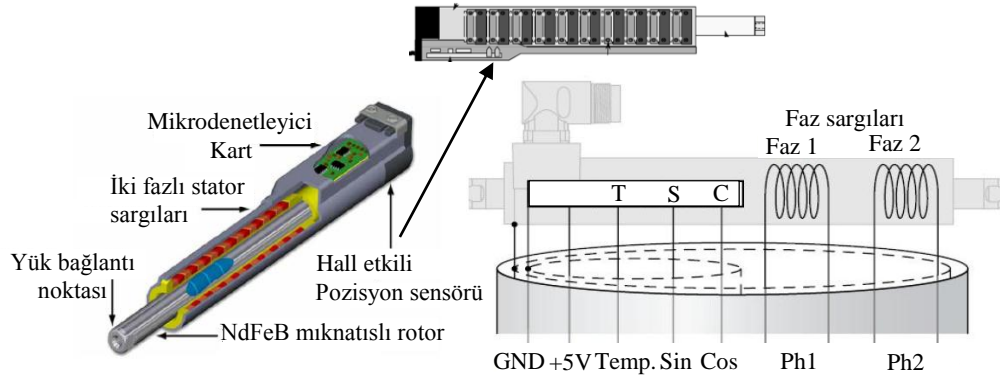
	Hidrolik	Tüp tipi lineer motorlar
Azami hız	Orta	Çok İyi
Azami güç	Çok İyi	İyi
Hassasiyet	İyi	Çok İyi
Sürtünme	Orta	Çok İyi
Sıcaklık	Orta	Çok İyi
Pozisyonlama	Orta	Çok İyi
Maliyet	Orta	Çok
Enerji verimliliği	Orta	Çok İyi
Çevrecilik	Orta	Çok İyi
Bakım ihtiyacı	İyi	Çok İyi

Yükseklik kontrol sisteminde doğrusal hareketlendirici olarak kullanılan PMTLSM, rotor ve statordan oluşmaktadır. İçerisinde neodymium-iron-boron (NdFeB) mıknatısların yerleştirildiği paslanmaz çelik borudan oluşan rotor, motorun doğrusal hareket eden kısmıdır. 1980'li yılların ortalarında keşfedilen NdFeB mıknatıslar yüksek enerji kapasitesine ve yüksek koersitif kuvvete (mıknatıslık özelliğini ortadan kaldırma için gerekli manyetik alan şiddeti) sahiptirler. Manyetik özelliklerini başka bir manyetik alan ile ortadan kaldırmak zor olan bu mıknatıslar, yüksek sıcaklıkta (150°C) mıknatıslık özelliğini kaybedebildiğinden, sıcaklığa karşı hassastırlar. Motorda hava aralığındaki yeterli manyetik akının küçük mıknatıslar tarafından sağlanabilmesi motor boyutlarının küçülmesini, dinamik performansının ve çıkış gücünün artmasını sağlamaktadır (Rahman ve Slemon, 1985). Stator ise üzerinde iki fazlı sargıların, rotorun hareket ettiği yatakların, rotor pozisyonunu tespit eden hall etkili sensörün, sıcaklık sensörünün ve mikroişlemci devresinin bulunduğu sabit kısımdır.

Lineer motorlarda hareketli parçanın pozisyonunu tespit etmek için yaygın olarak kullanılan, konum algılamada bir çok çalışmanın (Liu ve ark., 2008; Paul ve Chang, 2015; Pan ve ark., 2015; Xiao ve ark., 2007) konusu olan hall etkili sensörler hava aralığındaki manyetik alanın sinüsoidal dağılımına bağlı manyetik akı yoğunluğu ile yaklaşık doğru orantılı gerilim üreterek hareketli parçanın konumunu tespit etmektedir (Pan ve ark., 2015).

PMTLSM'de yüksek hızlara sahip doğrusal hareket, iki fazlı sargılar tarafından üretilen elektromanyetik kuvvetle sağlanmaktadır. Kayış kasnak sistemi ve dişli gibi mekanik parçaları bulunmadığından, doğrusal hareket oluşurken mekanik parçaların neden olduğu boşluk bulunmamakta ve atalet momenti mekanik parçaları bulunan sistemlere göre daha düşük olmaktadır. Ayrıca doğrusal harekette kullanılan hidrolik sistemlerde ihtiyaç duyulan yağ tankı, pompa, filtre, sıvı iletim boruları gibi parçalara gerek duymamakta ve yağ sızıntısı riski bulunmamaktadır. Uç sargıları bulunmadığından, diğer lineer motorlar ile karşılaştırıldığında stator ve rotor arasında uç etkisi olarak adlandırılan çekim kuvveti önemsiz düzeydedir. Ayrıca tüp tipi konfigürasyon direk sürüş lineer hareket sistemleri için kolay kurulum, çok iyi doğruluk, yüksek tekrarlanabilirlik, yüksek itme kuvveti yoğunluğu, düşük ağırlık/kuvvet oranı ve sessiz çalışma gibi faydalar sağlamaktadır. Bütün motor parçaları sağlam bir çelik tüp içerisinde bulunduğu için, hasar ve kirlenmeye karşı korunmakta ve motor tozlu, kirli ortamlarda çalışabilmektedir (LinMot, 2016). Buna ek olarak, boru şeklindeki konfigürasyon kolay kurulum, hassasiyet, yüksek tekrarlanabilirlik, yüksek itme yoğunluğu, düşük ağırlık/kuvvet oranı, doğrudan tahrik ve doğrusal hareket sistemi için sessiz çalışma gibi faydalar sağlamaktadır (Vese ve ark., 2012; LinMot 2016).

Çalışmada, dikey yönde hareketi üretmek için kullanılan yüksek performanslı sabit mıknatıslı tüp tipi lineer senkron motor (PMTLSM) (LinMot P01-23x160H-HP-R20, İsviçre) Şekil 3.3.'te görülmektedir. PMTLSM'nin parametreleri Tablo 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.3. PMTLSM'nin yapısı (LinMot, 2016)

Tablo 3.2. PMTLSM parametreleri

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Faz Direnci 25/110 °C	3,8/5,1 Ω	Maksimum kuvvet	137N
Faz endüktansı	0,54 mH	Sürekli kuvvet	31N
Kutup aralığı	0,0193 m	Maksimum yerdeğiştirme	690mm
Kuvvet sabiti	12,5 N/A	Doğrusal yerdeğiştirme	550mm
PM manyetik akısı	0,076 Wb	Maks. hız @ 72VDC	5,3m/s
Rotor ağırlığı	0,628 kg	Isıl direnci	2,5 K°/W
Sürtünme sabiti	3	Konum Tekrarlanabilirliği	$\pm 0,05$ mm
Sürtünme ve tutma kuvvetleri	3N	Maks. Akım @ 72VDC	11A

3.1.5. Servo sürücü

PMTLSM rotor pozisyonu (yerdeğiştirmesi), dahili tip PID kontrolöre sahip olan ve bilgisayar ile RS232 seri portu aracılığıyla haberleşen servo sürücü (Linmot B1100 GP-HC, İsviçre) ile kontrol edilmektedir. Servo sürücü, aldığı özel komutları lineer motor tarafından tanınabilen kontrol sinyallerine dönüştürebilmektedir. PMTLSM tanımlama parametreleri, dahili PID kontrolörün oransal, integral ve türev kazançları, rotor ivmesi ve maksimum hız bilgileri servo sürücüye uyumlu bir yazılım (LinMot Talk software version 6.0) aracılığı ile girilmektedir. Ayrıca bu yazılımın osiloskop ekranı aracılığıyla motor pozisyonu, hız, ivme ve akım bilgileri izlenebilmektedir.

3.1.5.1. Yamuk/üçgen hareket profili

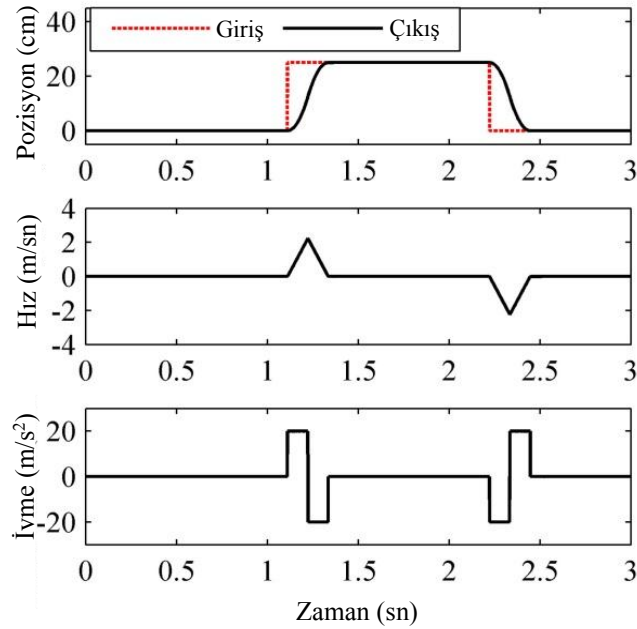
Aktüatörlerin, hareket kontrolünde yüksek performans elde etmek için referans yörüngelere ihtiyaç bulunmaktadır (Park ve ark., 2017). Hareket kontrol sistemlerinde, bir hareket kontrolörü, hedefe ulaşıldığından emin olmak için yörünge planlamasıyla oluşturulan bir yörüngeyi izlemeyi sürdürmektedir (Thirachai ve ark., 2010). Elektrik motorlu aktüatörlerin hareket kontrolünde, pürüzlü bir referans hareket yörüngesi, kontrol performansının bozulması, mekanik titreşim, sürücülerin aşırı akımı, gibi istenmeyen durumlara neden olabilmektedir. Referans yörüngelerin gerekliliği ise, elektrik motorları ve sürücülerin fiziksel kısıtlamalarından kaynaklanmaktadır (Park ve ark., 2017).

Hareket kontrol sistemlerinde, kontrolörler, makinelerin hızını ve konumunu kontrol etmek için kapalı döngüler ile birlikte kullanılmaktadır (Nguyen ve ark., 2008). Servo sistemlerde büyük adım değişimi, aşma hatası yanında, mekanizmanın şok ve titreşimine ve sistemde hasar meydana gelmesine neden olmaktadır (Chen ve Lee, 1998). Bu nedenle istenen hareketleri üretmek için, hareket kontrolünde hassas hareket ve hızın hedef pozisyon aşılmadan minimum titreşim ile gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Bunu sağlamak için yörünge planlaması araştırmaları yapılmaktadır. Optimum zamanda minimum sapmalarla, mekanik olarak gerçekleştirilebilmesi mümkün ve pürüzsüz yollar her zaman yol planlamasının hedeflerini oluşturmaktadır (Nguyen ve ark., 2008). Hareket kontrolünde referans konum uygulanmadan önce hızlanma/yavaşlama işleminden geçirilerek düzgün bir hareket profili elde edilerek istenmeyen titreşimler önlenmektedir (Chen ve Lee, 1998). Hareket profilleri, mekanik bileşenler üzerindeki titreşimi, gürültüyü ve gerilmeyi azaltarak motor ve servo sürücülerin daha az arızalanmasını sağlama yanında (Da Silva, 2015) harekette düzgünlük, sistemden üretilebilir maksimum mekanik tepki, kontrolör performansını geliştirme, pozisyon referans sinyalinde ve hız da süreklilik gereksinimini sağlamaktadır (Gerelli ve Bianco, 2010).

Hareket profilinde, yüksek dereceli polinom interpolasyon yöntemlerine dayanan düzgün yörüngeler elde edilebilmesine rağmen, bu tip yörüngeler uygulanması zor

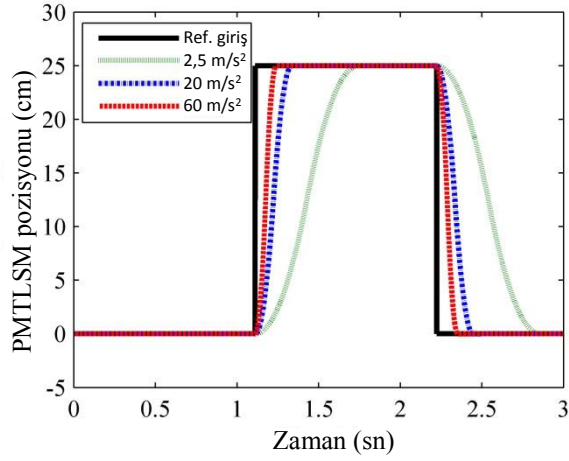
olan ağır hesaplama yüküne neden olmaktadır (Park ve ark., 2017). Ayrıca yüksek dereceli hareket yörünge profilleri, karmaşıklığın artması sonucu yörünge yürütme süresinin artmasına neden olmaktadır (Gustavi ve Andersson, 2017). Ancak hareket kontrol sistemlerinde hızın yüksek olması istendiğinden hareket hızını en üst düzeye çıkarmak için toplam hareket süresini en aza indirmek gereklidir (Saramago ve Steffen, 1998). Bu nedenle yüksek dereceden düzgün yörüngelerin yüksek frekanslı uyarılara cevap veremeyerek, titreşimsiz ancak yavaş hareketler üretebildiği planlamada dikkate alınmalıdır. Hareket tepkisinin hızlı olması gereken uygulamalarda ikinci dereceden yörünge yeterli olabilmektedir (Ezair ve ark., 2014). Pozisyon fonksiyonu ikinci dereceden polinomların bir kombinasyonu olarak ifade edilebildiğinden yamuk hareket profili, ikinci dereceden bir hareket profili olarak sınıflandırılmaktadır (Lambrechts ve ark., 2005; Ha ve Lee, 2018). Yamuk hareket profiline “t” eğrisi hareket profili de denmektedir (Chen ve ark., 2016). İstenmeyen mekanik gerilmelere neden olabilmekle birlikte, yamuk hareket profili noktadan noktaya hareket için en kısa çevrim süresine izin vermektedir (Bangji ve ark., 2011). Sabit hızlanma kullanan yamuk hareket profili üç periyottan oluşmakta olup bunlar; sabit hızlanma süresi, sabit hız süresi ve sabit yavaşlama periyotlarıdır (Ha ve Lee, 2018). Yamuk hareket modelleri ile yer değiştirmede motor, sabit bir hızlanma ile maksimum hıza ulaşılrken, sabit yavaşlama ile hız sıfıra düşürülerek hedef yer değiştirme noktasına ulaşılmaktadır (Nguyen ve ark., 2008). Yamuk hareket profilleri, bilinmeyen parametre sayısını büyük ölçüde azaltma yanında hızın sürekliliğini sağlarken, minimum zamanda hedefe ulaşmak için optimum çözümler üretebilmektedir (Haddad ve ark., 2010). Günümüzde birçok endüstriyel sistemde kontrolör donanım yapısının ve uygulamanın maliyeti dikkate alınarak yamuk hareket profili yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü hareket yörüngesi sadece hızlanma, sabit hız ve yavaşlama zaman periyotları ayarlanarak elde edilebilmektedir (Uchiyama ve ark., 2014). Aktuatörün hızlanması stator akımı ile orantılı olduğundan (Park ve ark., 2017) sabit hızlanma ve yavaşlama ivmesi ile yamuk hareket profili elektrik motorlarının RMS akımının azaltılmasını sağlamaktadır (Snider ve ark., 1991). Famouri ve Cooley (1994), hızlanma koşulu altında motorda tüketilen enerjinin, verilen son zamanda istenen hıza ulaşması için hareket profiline bağlı olduğunu göstermiştir.

Deney düzeneğinde PMTLISM ve servo kontrolörden oluşan lineer motor sistemi, maksimum hız, sınırlandırılmış ivme interpolasyonuna (yamuk hareket profili) sahiptir. Bu interpolasyon işleminde, geleneksel PD kontrolör çıkışı yumuşatılarak ayarlanan ivme ve maksimum hız değerlerine göre ikizkenar yamuk şeklinde bir hareket profili izlenmesi sağlanmaktadır. Şekil 3.4.'te görüldüğü gibi hem hızlanma hem de yavaşlama kısımları, karşıt işaretli maksimum ivmelenme ile sağlanmaktadır (Haschke ve ark., 2008). Şekilde görülen üçgen hareket profili, yamuk hareket profili ile aynı yöntemle üretilen maksimum hız sınırlamasının yapılmadığı yamuk hareket profilidir (Rymansaib ve ark., 2013). Pozitif konum referansı uygulandığında hızlanma kısmında ivme sabit ve pozitif olduğundan, hız doğrusal olarak artmakta, konum ise parabolik eğri şeklinde değişmekte, yavaşlama kısmında ise ivme negatif ve sabit, hız doğrusal olarak azalmakta, konum ise yine parabolik eğri şeklinde değişmektedir. Böylece rotor mevcut pozisyondan hedef pozisyona sınırlandırılmış ivme ile maksimum hızda gitmekte ve istenmeyen pozisyon sapmaları önlenmektedir.



Şekil 3.4. PMTLISM yamuk/üçgen hareket profili (25 cm yerdeğiştirme için, 2,3 m/s hız, 20 m/s² ivme)

Üçgen hareket profilinde ivme arttıkça, Şekil 3.5.'te görüldüğü gibi izosel yamuk açılar da artarak rotorun hedefe daha kısa bir sürede ulaşmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.5. Farklı ivme değerleri için yamuk/üçgen hareket profili için yerdeğiştirme (Referans girişi, 0.45 Hz kare dalga sinyal)

3.2. Arazi Çalışması Deney Düzeneği

Arazi deneyleri için, laboratuvarda geliştirilen püskürtücü yükseklik kontrol sistemi bir traktöre adapte edilmiştir (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. Arazi çalışması deney düzeneği

Kurulu deney setine ayrıca püskürtücü, sıvı hortumu ve depodan oluşan püskürtücü düzeneği eklenmiştir. Laboratuvar deney düzeneği üzerindeki ikinci ultrasonik sensör, arazi püskürtme deneyleri için konik tip aktif püskürtücü ile değiştirilmiştir. Arazi deneylerinde, 4,9 bar değerine kadar çalışma basıncı üretebilen geleneksel sırt pülverizatörü (Basar Memeto, Türkiye) kullanılmıştır. Güç kaynağı olarak traktöre bağlı 2 adet 72 Ah akümülatörden beslenen 12 V DC giriş 220 V AC çıkışlı modifiye tip invertör (Marin Enerji m1500-12, Türkiye) kullanılmıştır. Traktör ilerleme hızı

ölçümü bir GPS cihazı (Aselsan ASN3040, Türkiye) ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7.).



Şekil 3.7. Arazi deney düzeneği parçaları

3.2.1. Suya duyarlı kağıtlar

İlaçlama uygulamasında, uygulama tekniklerinin biyoetkililik üzerindeki etkisini tahmin etmek için damlacık boyutu, damlacık sayısı ve kaplama oranı ile ilgili bilgiler önem taşımaktadır. Çoğu durumda bu bilgiler suya duyarlı kağıtlar (WSP) kullanılarak, görsel olarak görüntü işleme ile elde edilmektedir (Zhu ve ark., 2011). Suya duyarlı kağıtlar, kapsama alanı ve ilaç birikiminin değerlendirilmesi için en popüler yapay hedefler olarak 1970'li yıllardan beri kullanılmaktadır (Marçal ve Cunha, 2008). Suya duyarlı kağıtlar, sprey kapsamının hızlı ve ucuz bir şekilde değerlendirilmesini sağlayan bir araç olarak birçok çalışmada (Wolf ve ark., 1999; De Moor ve ark., 2000; Fox ve ark., 2001; Panneton, 2002; Fox ve ark., 2003; Sánchez-Hermosilla ve Medina, 2004; Salyani ve ark., 2013; Sies ve ark., 2017) kullanılmıştır. Tarımsal ilaçlamada ilaç dağılımını görselleştirmek, ölçmek, haritalamak ve sprey kapsama alanını analizi için suya duyarlı kağıtlar (WSP) kullanılmaktadır. Püskürtme sıvı damlacıkları WSP'nin sarı yüzeyinde mavi renkte leke bırakmaktadır (Salyani ve ark., 2013). Bu tez çalışmasında püskürtücü yükseklik kontrol sistemi arazi deneylerinde ıslak alan yüzdesini (kaplama oranını) belirleyebilmek ve ilerleme yönündeki dağılım düzgünlüğünü hesaplamak için suya duyarlı kağıtlar (26x76 mm, Syngenta, İsviçre) kullanılmıştır. Deneyler sonrası elde edilen suya duyarlı kağıt örneği Şekil 3.8.'de görülmektedir.



Şekil 3.8. Arazi deneylerinde kullanılan suya duyarlı kağıt püskürtme sonrası görünümü

BÖLÜM 4. YÖNTEM

Tez çalışması; püskürtücü yükseklik kontrolü deney düzeneğinin geliştirilmesi, simülasyon çalışması, laboratuvar çalışmaları ve arazi deneylerinden oluşmaktadır.

4.1. Simülasyon Modeli

Simülasyon çalışmasında, püskürtücü yükseklik kontrol sisteminde kullanılan PMTLSM'un matematiksel modelinden simülasyon modeli elde edilerek, laboratuvar referans bitki profili ve arazi bitki profili üzerinde çalışma yapılmıştır. İki fazlı PMTLSM modeli elde edilirken, hava aralığı küçük olduğundan manyetik dalgalanmanın olmadığı, uç etkisinin olmadığı, sıcaklık etkisinin dikkate alınmadığı kabul edilmiştir. Çalışmada kullanılan PMTLSM statorundaki iki faz sargısı arasında 90° elektrik açı bulunmakta ve manyetik akı sabit mıknatıslar tarafından üretilmektedir. Anlık faz akımı, gerilimi ve manyetik akısı sırasıyla Denklem (4.1) (4.2) ve (4.3)'te verilmiştir.

$$\dot{I}_s = \dot{I}_a + \dot{I}_b e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (4.1)$$

$$U_s = U_a + U_b e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (4.2)$$

$$\psi_s = \psi_a + \psi_b e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (4.3)$$

İki fazlı PMTLSM modeli senkron hızda dönen $d - q$ ekseninde tanımlanmış, akı ve momenti temsil eden, zaman ve hızdan bağımsız iki eksenli koordinat sistemine taşınmıştır. Statora uygulanan gerilim, stator direncinin üzerinde bir voltaj ve buna bağlı olarak indüklenen gerilimi vermektedir. İki fazlı motor için $d - q$ eksenli gerilim ifadeleri Denklem (4.4)'deki gibi olmaktadır;

$$\begin{aligned}
U_d &= i_d R + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_{el} \psi_q \\
U_q &= i_q R + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_{el} \psi_d
\end{aligned} \tag{4.4}$$

burada U_d , U_q ve, i_d , i_q sırasıyla stator gerilim ve akım vektörlerinin d eksenindeki ve q eksenindeki bileşenleri, R faz sargısı direncidir. Denklem (4.5) Senkron hızı verir;

$$\omega_{el} = \frac{\pi}{\tau_p} v \tag{4.5}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada v rotorun doğrusal hızı, τ_p kutup açıklığıdır. d eksenini sabit mıknatıslı rotor eksenine hizalanırken, q eksenini hareket yönünde 90° ileridedir. Bu da stator sargılarının d ve q eksenindeki manyetik akı bağıntıları ψ_d ve ψ_q 'nin Denklem (4.6)'daki gibi yazılabileceği anlamına gelmektedir;

$$\begin{aligned}
\psi_d &= i_d L + \psi_{pm} \\
\psi_q &= i_q \cdot L
\end{aligned} \tag{4.6}$$

burada L stator sargı endüktansını, ψ_{pm} ise sabit mıknatıs manyetik akısını ifade etmektedir. Giriş gücü denklemi Denklem (4.7) gibi yazılabilir;

$$P_{daq} = (U_d \dot{I}_d + U_q \dot{I}_q) \tag{4.7}$$

Burada, Denklem (4.4)'daki U_d ve U_q gerilim ifadeleri Denklem (4.7)'ye yerleştirildiğinde, Denklem (4.8) elde edilir;

$$P_{daq} = \left[(i_d^2 R + i_q^2 R) + \left(i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt} \right) + \omega_{el} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \right] \tag{4.8}$$

Denklem (4.8)'de birinci kısım ısı kayıplarını, ikinci kısım reaktif gücü, üçüncü kısım ise elektromanyetik gücü vermektedir. Güç, stator sargılarındaki akımın oluşturduğu akının ve rotora entegre edilmiş sürekli mıknatısların oluşturduğu akının etkileşimiyle oluşturulmaktadır. İki akı vektörü birbirini çekerek hizalamaya

çalışmasıyla zorlayan bir güç üretilir. Maksimum 90° değerine çıkan elektriksel açı ne kadar büyük olursa, güç de o kadar büyük olmaktadır. Denkleme göre motor tarafından üretilen elektromanyetik güç Denklem (4.9)'deki gibi yazılabilir.

$$P_{el} = \omega_{el}(\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{\pi}{\tau_p} v(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (4.9)$$

Sürücüsü akım kontrolü, vektör kontrollü olduğundan, motorda iç akım döngüsü $i_d=0$ alınırsa, d eksen akısı Denklem (4.10) gibi sabit mıknatıs akısına eşit olur;

$$\psi_d = \psi_{pm} \quad (4.10)$$

Elektromanyetik güç Denklem (4.11)'deki yazılabilir;

$$P_{el} = v \frac{\pi}{\tau_p} \psi_{pm} i_q \quad (4.11)$$

Elektromanyetik güç ve itme kuvveti arasında Denklem (4.12)'deki eşitlik olduğundan;

$$P_{el} = F_{el} v \quad (4.12)$$

Elektromanyetik itme kuvveti Denklem (4.13)'deki gibi olur;

$$F_{el} = \frac{\pi}{\tau_p} \psi_{pm} i_q \quad (4.13)$$

Motor itme kuvveti katsayısı Denklem (4.14) gibi olur;

$$k_{pm} = \frac{\pi}{\tau_p} \psi_{pm} \quad (4.14)$$

Elektromanyetik itme kuvveti Denklem (4.15)'deki gibi yazılabilir;

$$F_{el} = k_{pm} i_q \quad (4.15)$$

Buradan elektromanyetik itme kuvvetinin q eksenine akım bileşeniyle doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Modelin mekanik denge denklemi Denklem (4.16) gibi yazılabilir;

$$F_{el} = M \frac{d^2x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + F_r \quad (4.16)$$

Burada x doğrusal yerdeğiştirme, M rotor ucundaki yük dahil hareketli parça kütlesi, B sürtünme katsayısı, F_r kuvvetlerini (tutma, yapışma gibi) ifade etmektedir. Doğrusal hız Denklem (4.17) şeklinde ifade edilebilir;

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (4.17)$$

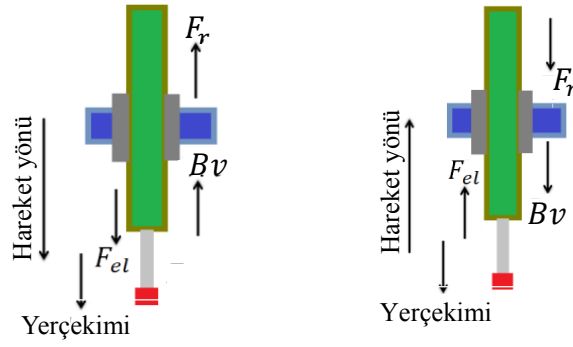
İtme kuvveti Denklem (4.18)'deki gibi olmaktadır,

$$F_{el} = M \frac{dv}{dt} + Bv + F_r \quad (4.18)$$

Mekanik hız hareket denklemi Denklem (4.19)'da gibi yazılabilir;

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \frac{1}{M} (F_{el} - Bv - F_r) \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{\pi}{\tau_p M} \psi_{pm} i_q - \frac{B}{M} v - \frac{F_r}{M} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Hareket yönüne göre rotora etkiyen kuvvetler Şekil 4.1.'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 4.1. Rotor hareket yönüne göre kuvvetler

Simülasyon modelinde Park dönüşümü kullanılarak faz gerilimleri, $d - q$ gerilimlerine Denklem (4.20)'deki gibi dönüştürülmüştür.

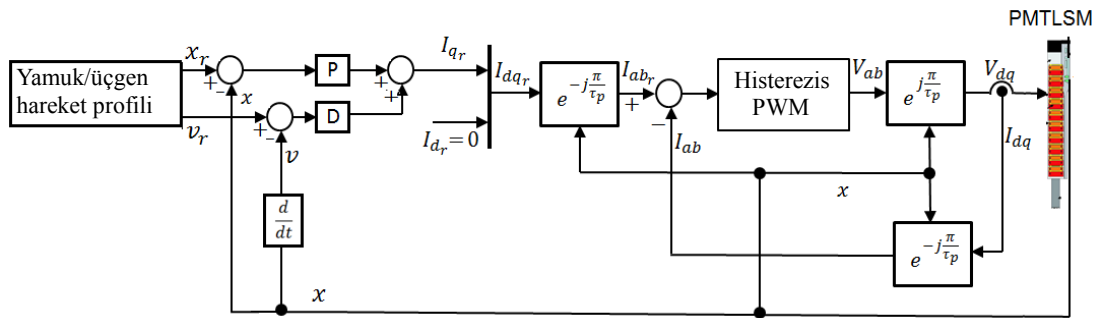
$$V_d = V_a \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) + V_b \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \quad (4.20)$$

$$V_q = -V_a \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) + V_b \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x\right)$$

Ters Park dönüşümü kullanılarak faz akımları, $d - q$ eksen akımlarından Denklem (4.21) kullanılarak elde edilmiştir.

$$I_a = I_d \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) - I_q \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \quad (4.21)$$

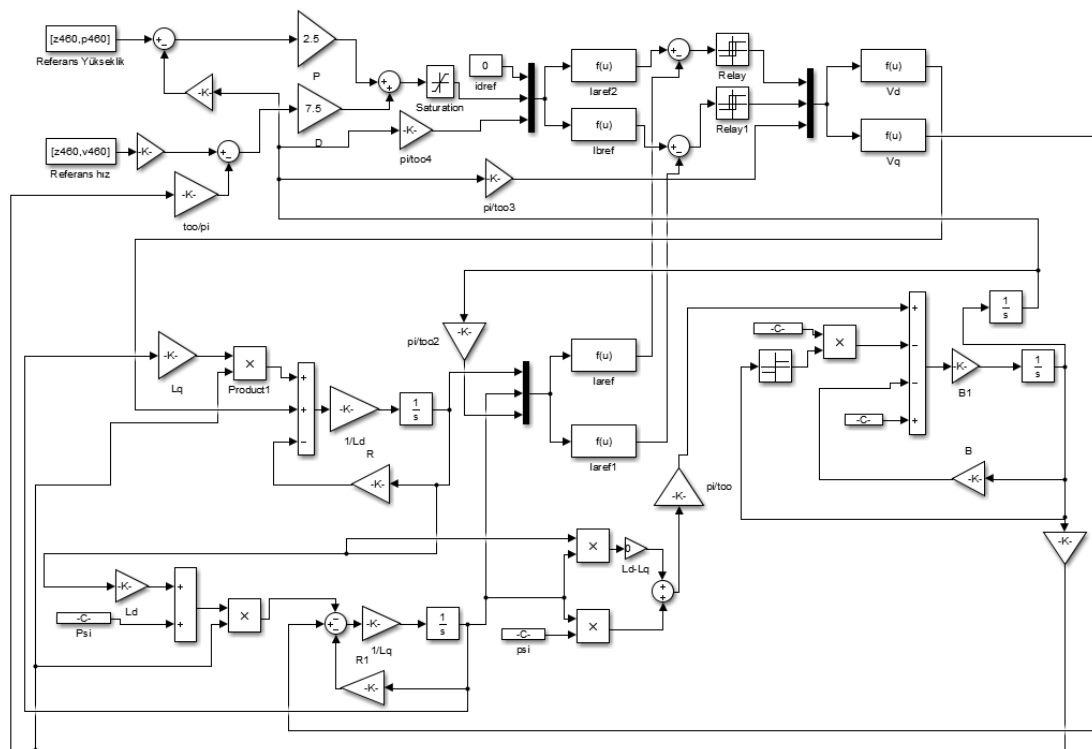
$$I_b = I_d \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) + I_q \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x\right)$$



Şekil 4.2. PMTLSM sisteminin simülasyon modeli şematik gösterimi.

Simülasyon modelinde, histerezis akım kontrolü yöntemi ile PWM üretilmiştir. Bu yöntemde kontrolörün girişine ve histerezis bandına göre yüksek veya düşük olmak üzere iki çıkış durumu seçilmektedir. Bu yöntem basit kontrol yapısına sahip olması yanında, daha az kaynak gerektirmekte, uygulanması kolay olmakta ve daha az kaynak gerektirmektedir (Mutlu ve ark., 2009).

Sistemin Denklem (4.1)'den Denklem (4.21)'e kadar verilen ifadeler kullanılarak elde edilen simülink modeli Şekil 4.3.'de verilmiştir.

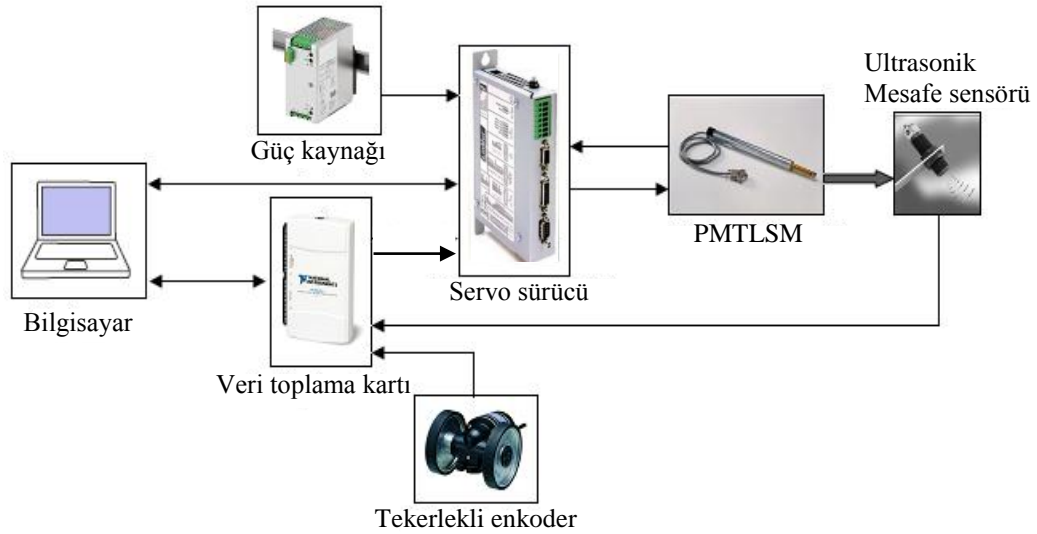


Şekil 4.3. İki fazlı PMTSLM alan yönlendirmeli kontrolü Simulink simülasyon modeli

Simülasyon modelinde, daha önceden ölçülen bitki yükseklik değişimi verileri kullanılarak, Ek.1'de verilen program aracılığıyla seçilen ivme ve maksimum hız değerlerinde yamuk hareket profili oluşturulmuş ve referans giriş üretilmiştir. Hareket profili oluşturulurken, hız değeri büyük seçilerek maksimum hız sınırlaması yapılmamış sistemin seçilen tüm ivme değerine göre ulaşabileceği maksimum hızda gitmesi için üçgen hareket profili oluşturulmuştur. Hareket profili çıkışlarından elde edilen, referans yükseklik ve referans hız değerleri simülasyon modelinin girişlerine uygulanmıştır.

4.2. Laboratuvar Deneyleri

Püskürtücü yükseklik kontrolü deney düzeneğinin geliştirilmesi ve sistemin performans testleri Dumlupınar Üniversitesi Simav Meslek Yüksekokulu laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yükseklik kontrol sisteminde işaret akışı Şekil 4.4.'deki gibidir.



Şekil 4.4. Püskürtücü yükseklik kontrol sistemi işaret akışı blok şeması

Şekilde görüldüğü gibi, servo sürücü uyumlu bir güç kaynağı aracılığıyla beslenmektedir. PMTLSM parametreleri, dahili PID kontrolör kazanç değerleri, hareket profili ivme ve hız değerleri sürücü yazılımı kullanılarak bilgisayarda ayarlanmaktadır. Hareket komutu verildiğinde PMTLSM'nin konum, hız, ivme ve akım bilgileri sürücü yazılımı aracılığıyla görüntülenebilmektedir. Referans yükseklik değişimi veri toplama kartı aracılığıyla servo sürücü analog girişlerine uygulanmakta, servo sürücü üçgen hareket profili üreterek, PMTLSM rotorunu yörüngeye uygun hareket ettirmektedir. Rotor ucuna bağlı olan ultrasonik sensör tarafından ölçülen mevcut yükseklik bilgisi veri toplama kartı aracılığıyla izlenebilmektedir. Konveyör bant ilerleme hızı ise, tekerlekli tip artımsal enkoder tarafından ölçülmektedir. Laboratuvar deneylerine başlamadan önce, servo sürücü parametre ayarları gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde doğrusal aktüatör olarak kullanılan PMTLSM özellikleri sürücü yazılımı aracılığıyla tanıtıldıktan sonra, rotor

konumunu ayarlayan dahili PID kontrolör performansını önemli ölçüde etkileyen oransal, integral ve türev kazanç parametreleri deneysel olarak ayarlanmıştır. PMTLISM üreticisi tarafından kararlı durumda pozisyon sapması riskine karşı integral kazancının sıfır olması gerektiği önerisi doğrultusunda, integral kazancı sıfır olarak ayarlanmıştır. Servo sürücü denetleyicisinin oransal ve türev parametreleri çok küçük olduğunda, rotor konum hatalarının olduğu sürücü osiloskobunda izlenmiştir, çok büyük olduğunda ise osilasyon ve gürültü meydana gelmiştir. Deneysel sonuçta bu parametreler sırasıyla 2,5 A/mm, 0 A/mms, 7,5 A/m/s elde edilerek, sürücü yazılımı aracılığıyla kaydedilmiştir.

Geliştirilen püskürtücü yükseklik kontrol sistemi deney düzeneğinde, yükseklik kontrolü gerçekleştirmek için ultrasonik mesafe sensörü püskürtücünden 50 cm önde ve rotor ucunda olmak üzere iki farklı şekilde konumlandırılarak, yükseklik kontrolü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Konveyör bant sırasıyla 1, 2, 3, 4 km/h hızlarında çalıştırılmıştır. Hız ayarı indüksiyon motorunu süren hız kontrol cihazının frekans değeri değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Artan hız değeri için hız kontrol cihazının frekansı sırasıyla 13,6, 27,5, 41,3, 57,48 Hz olarak ayarlanmıştır. Her bir hız değeri için, PMTLISM ivme değerleri sırasıyla 2,5, 5, 10, 20, 40, 60 m/s² olarak servo sürücü yazılımı ile ayarlanmıştır. 60 m/s²'den büyük ivme değerlerinde, gürültü miktarının ve lineer motor RMS akımının arttığı, motorun aşırı ısındığı tespit edilmiştir. Ayrıca doğrusal sistem tasarımında, lineer motor sistemi boyutlandırılmasını sağlamak için üretici firma tarafından geliştirilen program (LinMot Designer 1.8.0) kullanılarak yapılan simülasyon çalışmasında, sistemde kullanılan motor için 60 m/s² ivme değerinin üstünde termal yüklemenin fazla olduğu görülmüştür. Bu nedenle maksimum ivme değeri, 60 m/s² olarak ayarlanmıştır. İvme değerleri sırasıyla 2,5, 5, 10, 20, 40, 60 m/s² olduğunda, rotorun 25 cm'lik doğrusal hareketi için, PMTLISM'nin ulaşabileceği maksimum hız değerleri, sırasıyla 0,79, 1,12, 1,58, 2,23, 3,16, 3,86 m/s olarak LinMot Designer 1.8.0 yazılımı ile elde edilerek maksimum hız değerleri olarak ayarlanmıştır.

Sistemin performansını test etmek için varyasyon katsayısı (CV) ve PMTLISM RMS akım değerleri kullanılmıştır. CV ortalama yüksekliğin % sapması olarak

alınmaktadır. Her bir deney için CV değerleri hesaplanırken, sistemin kararlı çalışmaya geçmesinden sonra alınan veriler kullanılmıştır. Laboratuvar deneyleri, dört farklı hız ve altı farklı PMTLSM ivmesi için üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde ultrasonik mesafe sensörünün ölçtüğü yükseklik verileri kullanılarak her bir deney için ortalama değer, standart sapma ve varyasyon katsayısı Denklem (4.22), (4.23) ve (4.24) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\mu(PY) = \frac{1}{N_h} \sum_{i=1}^{N_h} P_i \quad (4.22)$$

$$\sigma_s(PY) = \sqrt{\frac{1}{N_h-1} \sum_{i=1}^{N_h} (h_i - \mu(PY))^2} \quad (4.23)$$

$$\%CV = \frac{\sigma_s(PY)}{\mu(PY)} 100 \quad (4.24)$$

Burada P_i , ultrasonik sensor tarafından ölçülen yükseklik verileri, N_h ölçülen yükseklik verileri sayısı, $\sigma_s(PY)$ verilerin standart sapması, $\mu(PY)$ ölçülen verilerin ortalaması, CV yüzde varyasyon katsayısını ifade etmektedir.

Elektrik motorlarının ısınmasının ve tüketilen enerjinin miktarını belirlenmesinde önemli bir kriter olduğundan her deney için RMS akım değeri hesaplanmıştır. Deneylerde servo sürücü aracılığıyla anlık akım değerleri kaydedilmiş ve her bir test için elde edilen motor akım değerlerinin ortalama karekök değerleri Denklem (4.25) kullanılarak RMS akım değeri olarak hesaplanmıştır.

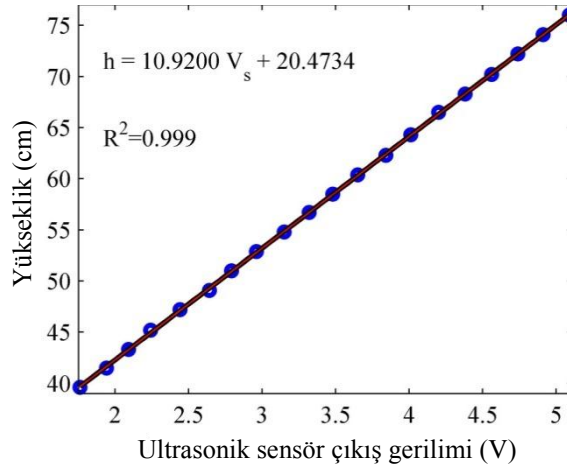
$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} (c_i)^2} \quad (4.25)$$

Burada, c_i anlık akım değerlerini, N_c ise akım değerleri sayısını ifade etmektedir. Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak Matlab Statistics Toolbox programı ile CV ve RMS akım değerleri için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. CV değerlerine logaritmik dönüşüm uygulandığında, normal dağılım şartının sağlandığı görülmüştür. Varyans analizi ile CV ortalamaları arasında fark olup olmadığı ve

PMTLSM RMS akım ortalamaları arasında fark olup olmadığı araştırılmıştır. Önemli fark bulunduğu ise bu farkın hangi gruptan kaynaklandığını belirlemek için LSD çoklu karşılaştırma testi kullanılmıştır.

4.2.1. Ultrasonik mesafe sensörü kalibrasyonu

Tüm deneylerde yükseklik kontrol sistemi, ultrasonik mesafe sensörünün ölçtüğü yüksekliğe göre çalıştığından, öncelikle sensor kalibrasyonu yapılmıştır. Güç beslemesi 12V DC güç kaynağından sağlanan analog çıkış voltajı 0-10 V, algılama aralığı 20-130 cm, tekrarlanabilirlik %0,15, çözünürlük 0,018 cm, ultrasonik frekansı 200 kHz olan ultrasonik mesafe sensörleri kalibrasyon karakteristiğini belirlemek için testler yapılmıştır. Sabit bir nesne kullanılarak her bir yükseklik değerine karşılık sensörün volt cinsinden çıkış gerilimi kaydedilmiş ve ölçülen mesafelerden elde edilen kalibrasyon karakteristiği Şekil 4.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Ultrasonik mesafe sensörü kalibrasyon karakteristiği

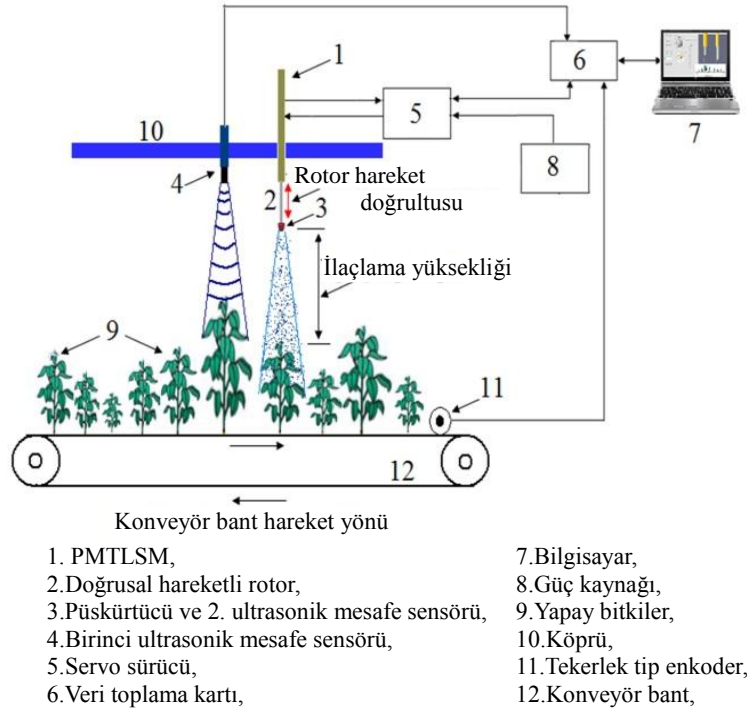
Ultrasonik mesafe sensörünün kalibrasyon karakteristiği kullanılarak Denklem (4.26) elde edilmiştir.

$$h = 10,9200V_s + 20,4734 \quad (4.26)$$

Burada V_s , sensörden okunan gerilim (Volt), h yükseklik (cm) bilgisini ifade etmektedir. Bu denklem sensör çıkışından ölçülen gerilime göre, sensör ile nesne arasındaki mesafeyi hesaplamak için kullanılmıştır.

4.2.2. Sensör ayrı konumlu laboratuvar çalışması

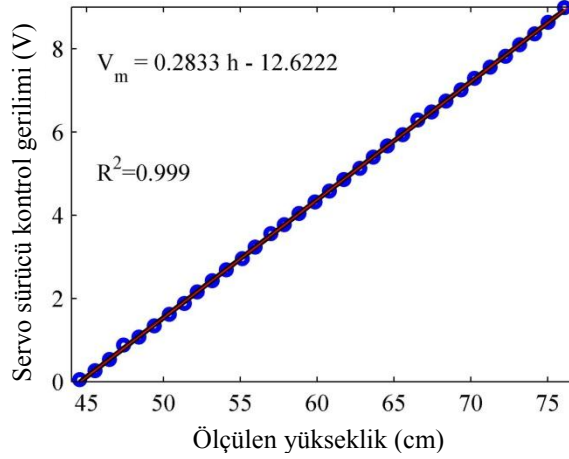
Sensör ayrı konumlu çalışmada Şekil 4.6.'da görüldüğü gibi konveyör bant sistemi üzerinde aralarında 50 cm mesafe bulunan iki köprüden birinde, birinci ultrasonik mesafe sensörü, diğerinde ise PMTLSM bulunmaktadır.



Şekil 4.6. Sensör ayrı konumlu deney düzeneği şematik gösterimi

PMTLSM'un dikey doğrusal hareket eden rotor ucuna ikinci ultrasonik sensör ve pasif püskürtücü tutturulmuştur. Ultrasonik sensörler aynı yüksekliktedir ve konveyör bant hareket ettiğinde birinci sensör yükseklik bilgisi ölçerek bitki profilini tanımlamaktadır. Bu profile göre rotor hareket ederek, değişen bitki boylarına göre püskürtücüyü 50 cm referans yükseklik değerinde tutmaya çalışmaktadır. Birinci sensörün ölçtüğü yüksekliğe göre motor sürücüsü girişlerine uygulanması gereken

gerilim sinyalini belirlemek için deneyler gerçekleştirilmiş ve Şekil 4.7.'de verilen karakteristik elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Yüksekliğe göre servo sürücünün analog kontrol sinyal karakteristiği

Bu karakteristik verileri kullanılarak Denklem (4.27) elde edilmiştir.

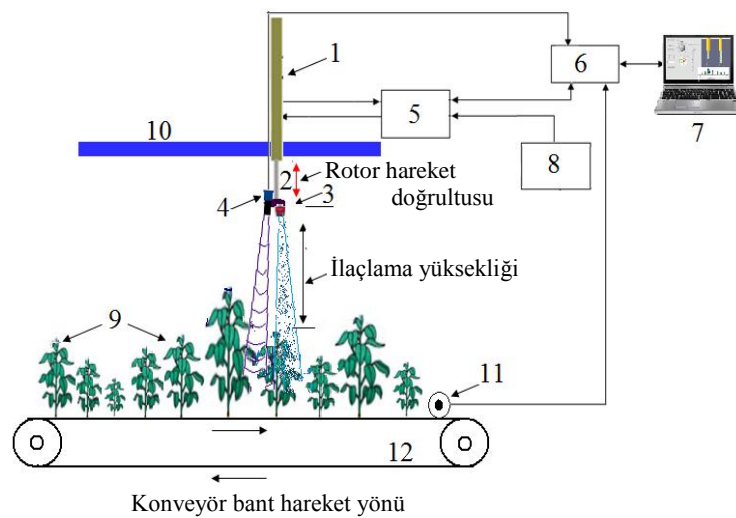
$$V_m = 0,2833h - 12,6222 \quad (4.27)$$

Burada h cm olarak yükseklik ve V_m ise volt olarak servo sürücü analog girişlerine uygulanması gereken kontrol sinyalidir. Bu denklem, sensörden elde edilen mesafe bilgilerini kullanarak ucunda ikinci sensör ve pasif püskürtücü bağlı olan rotorun 50 cm referans yüksekliğe ulaşması için, servo sürücü girişlerine uygulanacak analog kontrol sinyalinin hesaplanmasını sağlamaktadır. Grafik ve denklemde görüldüğü gibi birinci sensörün ölçtüğü yükseklik bilgisi arttığında sürücü girişlerine uygulanan gerilim sinyalinin değeri artmaktadır. Sistemde Labview ortamında üretilen konum kontrol sinyali DAQ kartı aracılığıyla servo sürücü analog girişlerine uygulanmaktadır. Servo sürücü girişleri 0-10 V analog gerilim için uygun olduğundan, kontrol sinyali bu değerler arasında sınırlandırılmıştır. Konum kontrol sinyaliyle servo sürücü, PMTLSM rotorunu dikey yönde doğrusal olarak yukarı veya aşağı doğru hareket ettirerek rotor ucuna bağlı olan ikinci sensör ve püskürtücüyü 50 cm'lik sabit yükseklik değerine ulaştırmaya çalışmaktadır. Ayrıca, birinci ultrasonik mesafe sensörü ve ikinci sensör ile püskürtücüyü taşıyan iki köprü arasında 50 cm

yatay mesafe olduğundan, kontrol sinyali artan hız değerleri için sırasıyla 1,8, 0,9, 0,6, 0,45 sn. gecikme süreleri ile servo sürücü girişlerine gönderilmektedir.

4.2.3. Sensör üst konumlu laboratuvar çalışması

Sensör üst konumlu çalışmada, Şekil 4.8.'de görüldüğü gibi rotor uç noktasına püskürtücü yanına ultrasonik mesafe sensörü tutturulmuştur. Ultrasonik sensörün aktif püskürtücülü uygulamalarda, püskürtülen sıvıdan etkilenmemesi için bir miktar öne açılı olarak konumlandırılmıştır. Herbst ve ark., (2018), bumlu aktif süspansiyon sistemlerinde ultrasonik sensör ölçüm alanında püskürtücünün neden olduğu sorunları önlemek için hafif öne açılı olabileceğini, ultrasonik sensörlerin 20°-30° bir açıyla koni şeklindeki bir bölgeden yansımaya duyarlı olduğunun varsayılabilceğini bildirmektedir.



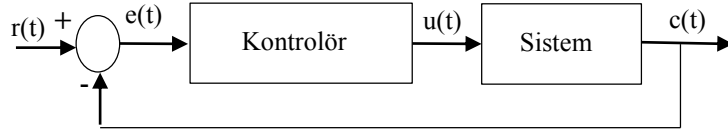
- | | |
|--|---------------------------|
| 1. PMTLSM, | 7. Bilgisayar, |
| 2. Doğrusal hareketli rotor, | 8. Güç kaynağı, |
| 3. Püskürtücü ve 2. ultrasonik mesafe sensörü, | 9. Yapay bitkiler, |
| 4. Birinci ultrasonik mesafe sensörü, | 10. Köprü, |
| 5. Servo sürücü, | 11. Tekerlek tip enkoder, |
| 6. Veri toplama kartı, | 12. Konveyör bant, |

Şekil 4.8. Sensör üst konumlu deney düzeneği şematik gösterimi

Bu çalışmada, rotor ucundaki püskürtücünün mevcut konumu sensör ile ölçülüp referans değer ile karşılaştırılarak PID ve Bulanık PID yöntemlerine göre püskürtücü yükseklik kontrol çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla bu bölümde öncelikle PID kontrol ve Bulanık PID kontrol yöntemleri açıklanmıştır.

4.2.3.1. PID kontrol

Doğrusal kontrollü kapalı çevrim kontrol sistemi dinamikleri, Şekil 4.9.'daki blok diyagramı ile gösterilebilir. Şekilde giriş vektörü $u(t)$ kontrol sinyallerini ve çıkış vektörü $c(t)$ kontrol edilen değişkenleri temsil etmektedir. Kontrol sistemi tasarımının temel amacı, $c(t)$ çıktı vektörünün istenen şekilde davranmasını sağlamaktır. Kontrol sisteminin tasarım problemi, tasarım hedeflerinin tamamının karşılanması için, öngörülen zaman aralığı boyunca $u(t)$ kontrol sinyalinin belirlenmesini içermektedir (Boz, 1999).



Şekil 4.9. Kapalı çevrim kontrol sistemi

Şekilde, $r(t)$ sistem davranışının olması istenen referans girişini temsil ederken, $e(t)$ sistem davranışının referans değer ile ölçülen değer arasındaki farkı ifade eden hatayı göstermektedir. Sistem hatası $e(t)$ Denklem (4.28) kullanılarak elde edilmektedir;

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (4.28)$$

Tek döngülü kontrolörler sınıfındaki PID kontrolörler, birçok proses için tatmin edici performans sunmaları, çeşitli çalışma koşulları için sağlam performansa sahip olmaları, analog ve dijital sistemlere kolayca uygulanabilmeleri ve uygulayıcılar tarafından iyi bilinmeleri nedeniyle kontrol mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Boz, 1999). Proses kontrolünde, kontrol döngülerinin %95'inden fazlası PID tipindedir (Åström ve Hägglund, 1995).

Standart bir PID kontrolörün transfer fonksiyonu Laplace etki alanında Denklem (4.29)'deki gibi gösterilmektedir.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.29)$$

PID denetleyicisi, $e(t)$ sistem hatası (referans giriş ve sistem çıkışı arasındaki fark), $u(t)$ kontrol çıkışı olacak şekilde zaman etki alanında Denklem (4.30)'daki gibi gösterilmektedir;

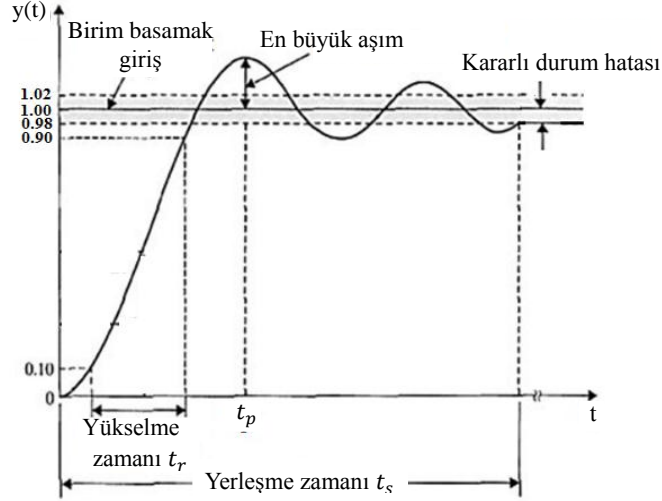
$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.30)$$

$K_i = \frac{K_p}{T_i}$ ve $K_d = K_p T_d$ eşitlikleri ile kontrol çıkışı, Denklem (4.31)'deki gibi gösterilebilir.

$$u(t) = k_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.31)$$

Burada K_p oransal kazanç, T_i integral zaman sabiti, T_d türev zaman sabiti, K_i integral kazancı ve K_d türev kazancıdır. PID kontrolde kontrol sinyali, hatanın kendisinin, hatanın integralinin ve hatanın değişim oranının doğrusal bir kombinasyonudur (Boz, 1999). PID kontrolör istenen çıkış ile gerçek çıkış arasındaki farkı (hata sinyalini) minimize etmek için gerekli kontrol sinyalini üretmektedir. Kontrolör tasarımı, doğrudan kontrol sisteminin istenen performansı ile ilişkili olduğundan, zaman alanı performans ölçümlerini yapmak önemlidir. Zaman etki alanı performans özellikleri, bir test sinyaline sistemin cevabından elde edilir. Yaygın olarak kullanılan standart test giriş sinyalleri basamak girişi, rampa girişi, darbe girişi ve sinüsoidal giriş sinyalleridir. Bu tez çalışmasında, en çok kullanılan test sinyali olan adım girişi cevabı kullanılmıştır. Kontrol sistemleri doğal olarak dinamik olduğu için adım fonksiyonu, sistem performansını ölçmek için en uygun ve yaygın olarak kullanılan test sinyalidir, çünkü dinamik bir süreç hakkında yararlı bilgiler vermektedir. Kapalı çevrim adım cevap analizi, sistem girişindeki ani değişimlere cevap vermede, bir sistemin hızı hakkında çok şey ortaya koyduğundan

proses kontrolünde özellikle önemlidir. Tipik bir sönümsüz kapalı çevrim kontrol sisteminin basamak tepkisi Şekil 4.10.'da gösterilmektedir (Boz, 1999).



Şekil 4.10. Tipik bir kapalı çevrim basamak cevabı.

Kapalı bir döngü sisteminin zaman etki alanı performans ölçümleri genellikle Şekil 4.10.'da gösterilen, en büyük aşım, yerleşme zamanı, yükselme zamanı ve kararlı durum hatası ile verilmektedir. Bu nicelikler, bir kontrol sisteminin bir birim basamaklı girdi için davranışının doğrudan ölçülmesini sağlamaktadır. PID denetleyicide, P kontrolörü, artan bir kazanç ile tipik olarak tepki hızını arttırarak sistem çıkışının referans değere yaklaşmasını sağlamakta ancak büyük bir yüzde aşım yanında büyük değerleri kararsızlığa neden olabilmektedir. Sönümlü bir cevap elde etmek için oransal kazanç üst limiti belirlendiğinde ise küçük hata değerlerinde kararlı durum hatası oluşabilmektedir. Kararlı durum hatasını azaltmak ya da yok etmek için denetleyiciye I integral terimi eklenerek hatanın integrali ile orantılı denetim işareti üretilmesi sağlanmaktadır. Bu durumda, kontrol ünitesi orantılı artı integral, PI, kontrolör olarak adlandırılmaktadır. PI denetleyici hata olduğu sürece hatayı integralini alarak ortadan kaldırmakta ancak geçici durum cevabında bozulmaya neden olabilmektedir. Geçici durum cevabını iyileştirmek için, PI denetleyiciye türev terimi D eklenerek PID denetleyici elde edilir. Hata değişiminin olmadığı durumlarda türev etki kontrol çıkışı üretmemektedir. Oluşan hataya oransal etki hızlı düzeltici tepki verebilirken, hatanın değişimine ise türev etkisi tepki vermektedir. Denetleyicinin türev kısmı genellikle sistemin dinamik performansını

iyileştirmektedir. Böylece üç temel kontrol etkisinin birleştirilmesi geçici durum davranışının iyileştirilmesini ve kalıcı durum hatasının ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır. Uygulamada, sistem çıktısının bir adım girişi için, sıfır kararlı durum hatası ve küçük t_r ve t_s ile mümkün olduğunca girişi yakın takip etmesi istenmektedir (Boz, 1999). PID kontrolörde kazançlar temel olarak aşağıdaki etkileri göstermektedir (Ang ve ark., 2005);

- Oransal kazanç, hata sinyali ile orantılı kontrol davranışı sağlar.
- İntegral kazanç, bir integral alıcı ile sağladığı alçak frekans kompanzasyonu sonucu kalıcı durum hatalarını azaltır.
- Türev kazancı, bir türev alıcı ile sağladığı yüksek frekans kompanzasyonu sonucu geçici durum davranışında iyileşme sağlar.

Kazançların kapalı çevrim performansları Tablo 4.1.'de özetlenmiştir.

Tablo 4.1. Oransal, integral ve türev parametreleri artışının sistem cevabına etkisi

Parametre	Yükselme zamanı	Sistem ani tepkisi	Oturma zamanı	Kararlı durum hatası
Kp	Azalır	Artar	Az değişir	Azalır
Ki	Azalır	Artar	Artar	Yok eder
Kd	Az değişir	Azalır	Azalır	Az değişir

PID denetleyicide, her bir kazanç değeri sistemin çıkış tepkisini önemli ölçüde etkilediğinden, en iyi kontrol performansını elde edebilmek için, kazançların doğru olarak ayarlanması gerekmektedir. Kazanç parametrelerinin ayarlanmasında analitik ve deneysel yöntemler kullanılmaktadır. Analitik yöntemler denetleyici tipi, denetlenen sistem ve sensörlerin dinamik davranışlarının bilinmesini gerektirdiğinden, karmaşık ve uzun zaman aldığından, deneysel yöntemler tercih edilebilmektedir. Deneysel yöntemlerden biri olan ve Ziegler ve Nichols (1942) tarafından, 1940'ların başında PID denetleyicilerinin ayarlanması için öne sürülen sistem cevap yönteminde, kontrolörün integral ve türev kontrol etkisi devre dışı bırakılıp sadece oransal etki kullanılarak kapalı çevrim sistem girişine basamak sinyal uygulanır. Bu yöntemde sistem sürekli osilasyona girene kadar denetleyicinin oransal kazancı artırılır, sistemin osilasyona girdiği oransal kazanç değeri, kritik

kazanç K_c olarak ve karşılık gelen osilasyon frekansı, kritik frekans ω_c olarak elde edilir. Daha sonra kritik kazanç K_c ve kritik frekans değeri ω_c kullanılarak hesaplanan sürekli salınım zaman periyodu T_c ($T_c = 2\pi/\omega_c$) kullanılarak, oransal kazanç K_p , integral süresi T_i ve türev süresi T_d elde edilir (Boz, 1999). Ziegler-Nichols P, PI ve PID ayarlama kuralları Tablo 4.2.'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Frekans cevabına dayalı Ziegler-Nichols ayarlama kuralları

Kontrolör	PID kontrolör parametreleri		
	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_c$		
PI	$0,45K_c$	$0,8T_c$	
PID	$0,6K_c$	$0,5T_c$	$0,12T_c$

Bu yöntemin uzun zaman sabitleri nedeniyle sistemin salınımının genliğini kontrol etmenin zor olabilmesi gibi olumsuz yönleri bulunmaktadır. Standart tip denetleyicilerin parametrelerini ayarlamak için hızlı ve kolay yöntemlerin olması önemlidir. Ziegler-Nichols yönteminden sonra PID ayar yöntemlerinin geliştirilmesinde birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri 1984'te Åström ve Hägglund (Åström ve Hägglund, 1984a; Åström ve Hägglund, 1984b) tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde salınım genliği sınırlandırılmıştır. Åström ve Hägglund, otomatik ayarlamının kontrol cihazını sadece ayar aşamasında kontrol döngüsüne bağlanan bir röle ile değiştirerek de gerçekleştirilebileceğini önermişlerdir. Bu yöntem, denetleyicinin bir kullanıcı talebine göre otomatik olarak ayarlandığı otomatik ayarlama yaklaşımıdır. Åström ve Hägglund tarafından önerilen PID kontrol cihazlarının otomatik ayarlama yaklaşımı, proses kontrol endüstrilerinde başarılı olarak uygulanabilmektedir. Bu teknik, döngü parametrelerini bulmak için uzun yıllardır kullanılan Ziegler-Nichols ayarlama prosedürüne benzemektedir. Bu ayarlama yöntemi temel olarak kritik kazanç K_c ve kritik frekans, ω_c , konseptine dayanmaktadır (Boz, 1999).

Åström ve Hägglund röle otomatik ayar yönteminde, osilasyonun genliği, rölenin genliğini ayarlayarak kontrol edilir. Kritik nokta hakkında bilgi edinmek için sisteme bir röle bağlanır. Bu yöntem, belirli bir frekansta en az 180° olan bir faz gecikmesi

ile sistemin ω_0 limit frekansı ile salınacağı gözlemine dayanmaktadır (Åström ve Hägglund 1984b; Boz, 1999). Bu prosedürün sonuçları daha sonra PID kontrolör parametrelerini ayarlamak için kullanılır. Türev zaman sabiti ya da türev süresi Denklem (4.32)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$T_d = \frac{\tan\phi_m + \sqrt{\frac{4}{\alpha} + \tan^2\phi_m}}{2\omega_c} \quad (4.32)$$

burada, ϕ_m sistemin faz açısı, ω_c ise osilasyonun açısal frekansıdır. İntegral zaman sabiti Denklem (4.33) kullanılarak hesaplanır;

$$T_i = \alpha T_d \quad (4.33)$$

Oransak kazanç ise Denklem(4.34)'den elde edilir;

$$k_c = K_u \cos\phi_m \quad (4.34)$$

Oransal kazanç kritik frekans ve sistemin faz açısından bulunmaktadır. Tasarım parametresi α genellikle 4 olarak alınmaktadır (Boz, 1999).

Sayısal PID kontrolörü, Denklem (4.30) veya Denklem (4.31) ifadelerinin sayısal çözümleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu ifadelerin sayısal olarak gerçekleştirilmesi için z-tanım bölgesi transfer fonksiyonu ve fark denklemlerinden yararlanılmaktadır. PID denetleyicinin üç terimin toplamı alınarak elde edilen ayrık fark ifadesi Denklem (4.35)'deki gibi yazılabilir (Kurtulan, 2001);

$$u(k) = u_p(k) + u_I(k) + u_D(k) \quad (4.35)$$

Burada oransal kontrol terimi Denklem (4.36)'daki gibi yazılabilir;

$$\begin{aligned} u_p(kT) &= K_c e(kT) \\ u_p(k) &= K_c e(k) \end{aligned} \quad (4.36)$$

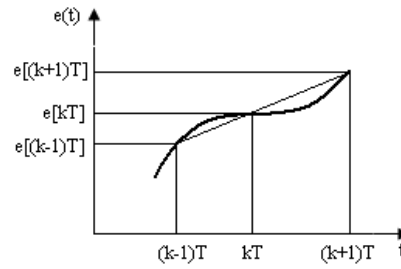
İntegral terimi için z-tanım bölgesi transfer fonksiyonu ve ayrık fark ifadesi Denklem (4.37) ve Denklem (4.38)'daki gibi yazılabilir (Moudgalya, 2007);

$$G(z) = Z(G_{ZOH}(s)G(s)) = \frac{1-e^{-sT}}{s} Z\left(\frac{1}{sT_I}\right) = \frac{z-1}{z} \frac{Tz}{T_I(z-1)^2} = \frac{T}{T_I(z-1)} \quad (4.37)$$

$$\frac{U_I(z)}{E(z)} = \frac{Tz^{-1}}{T_I(1-z^{-1})}$$

$$u_I(k) = u_I(k-1) + \frac{T}{T_I} e(k-1) \quad (4.38)$$

İntegral işlemi için Şekil 4.11.'te gösterilen iki örneklemede okunan hata değerlerinin ortalamasını alan yamuk yaklaşımı yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.11. Yamuk yaklaşımı ile sayısal integral işlemi (Kurtulan, 2001).

Bu yaklaşıma göre integral işlemi için Denklem (4.39) de verilen fark denklemini elde edilir.

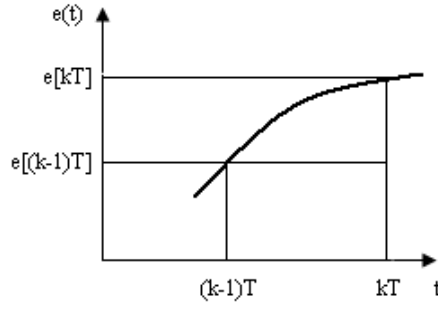
$$u_I(k) = u_I(k-1) + \frac{T}{2T_I} (e(k) + e(k-1)) \quad (4.39)$$

Bu denkleme ilişkin z-tanım bölgesi transfer fonksiyonu Denklem (4.40) gibi olmaktadır (Kurtulan, 2001; Moudgalya, 2007);

$$U_I(z) = U_I(z)z^{-1} + \frac{T}{2T_I} (E(z) + E(z)z^{-1})$$

$$U_I(z)(1 - z^{-1}) = \frac{T}{2T_I} E(z)(1 + z^{-1}) = U_1(z)(z - 1) = \frac{T}{2T_I} E(z)(z + 1) \quad (4.40)$$

$$\frac{U_1(z)}{E(z)} = \frac{T}{2T_I} \frac{z+1}{z-1}$$



Şekil 4.12. Sayısal türev işlemi (Kurtulan, 2001)

Sayısal türev işlemi ise Denklem (4.41)'deki gibi olmaktadır;

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{kT - (k-1)T} = \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \quad (4.41)$$

Türev zamanı T_D olan ve her T örnekleme zamanında değer alınan bir $e(k)$ işareti için sayısal türev ifadesi $u_D(k)$, Denklem (4.42)'daki gibi elde edilmektedir.

$$u_D(k) = T_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (4.42)$$

Bu ifadeye ilişkin z-tanım bölgesi transfer fonksiyonu Denklem (4.43)'deki gibi olur;

$$\frac{U_D(z)}{E(z)} = \frac{T_D}{T} (1 - z^{-1}) = \frac{T_D}{T} \frac{z-1}{z} \quad (4.43)$$

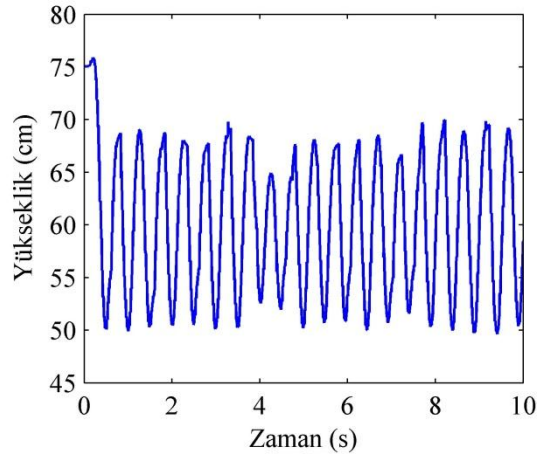
PID kontrolör z bölgesi transfer fonksiyonu ve ayrık fark ifadesi sırasıyla Denklem (4.44) ve Denklem (4.45)'deki gibi olmaktadır.

$$\frac{U(z)}{E(z)} = K_c \left[1 + \frac{T}{2T_I} \frac{z+1}{z-1} + \frac{T_D}{T} \frac{z-1}{z} \right] \quad (4.44)$$

$$u(k) = K_c \left[e(k) + u_I(k-1) + \frac{T}{2T_I} (e(k) + e(k-1)) + T_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right] \quad (4.45)$$

4.2.3.2. Püskürtücü sistemin PID kontrolü

Tez çalışmasında, PID kontrol çalışması için Labview programı hazır PID bloğu kullanılmamış, sayısal PID kontrolör oluşturularak deneyler gerçekleştirilmiştir. PID kontrolör kazanç parametrelerinin belirlenmesinde kazanç ve frekansın tanımlanmasını kullanan ve faz marjı spesifikasyonuna izin veren Åström ve Hägglund PID faz marjin yöntemi kullanılmıştır. Sistemde integral ve türev etkisi devre dışı bırakılarak oransal kazanç değeri artırılarak sistemin osilasyona girmesi sağlanmıştır (Şekil 4.13.).

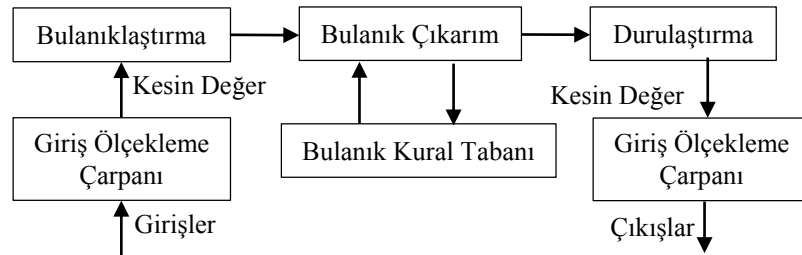


Şekil 4.13. PID kontrolör ayar osilasyon grafiği

Osilasyon genliği kontrol edilebildiğinden, röle kullanılmadan sistem osilasyona götürülerek kritik kazanç K_c ve osilasyon açısıl frekansı ω_c elde edilmiştir. Daha sonra yöntemdeki prosedür kullanılarak PID kazançları belirlenmiştir. Bu yöntemde göre integral ve türev etkisi devre dışı bırakılarak oransal kazanç değeri artırılarak sistemin osilasyona girmesi sağlanmış elde edilen kritik kazanç ve frekans Åström ve Hägglund yönteminde kullanılarak PID katsayıları elde edilmiştir. Sistemi osilasyona götüren kritik kazanç değeri deneysel olarak $k_u = 4,8$ olarak bulunmuş, osilasyon grafiğinden osilasyon frekansı $12,80$ rad/sn olarak elde edilmiş, faz açısı $\Phi_m = 60^\circ$, tasarım parametresi $\alpha = 4$ alınmıştır. Püskürtücü yükseklik kontrol sistemi PID parametre değerleri $K_p = 2,4$, $T_i = 0,58$, $K_i = 4,11$, $T_d = 0,15$, $K_d = 0,35$ olarak bulunmuştur.

4.2.3.3. Bulanık PID kontrol

Bulanık mantık yaklaşımı, insan mantığını modellemede kesin ifadeler ile birlikte ara değerler kullanılması gerektiğinin ifade edildiği bir makale (Zadeh, 1965) ile literatüre girmiştir. Bu yaklaşıma göre bulanık mantık, matematiksel modeli zor elde edilen karmaşık sistemlere uygulanabilir özelliktedir. Klasik mantıkta bir elemanın üyeliği 0 veya 1 olarak ifade edilmektedir. Yani kümenin herhangi bir elemanı o kümeye ya aittir ya da değildir. Bulanık mantıkta ise bir elemanın bulanık kümeye üyeliği $[0, 1]$ aralığında bir derece sahip olmakta ve üyelik fonksiyonları ile tanımlanmaktadır. Bir X evrensel kümesinin x elemanının A bulanık kümesi için üyelik fonksiyonu değeri veya üyelik derecesi $\mu_A(x)$ şeklinde gösterilmektedir. Bu değer 1'e yaklaşması x elemanının A bulanık kümesine ait olma derecesini artırırken, 0 değerine yaklaşması ait olma derecesini azaltmaktadır. Bulanık mantık sistem yapısı Şekil 4.14.'de görüldüğü gibi genel olarak; sayısal bilgiyi bulanık bilgiye dönüştüren bulanıklaştırma birimi, kontrol kurallarının bulunduğu kural tabanı, kural tabanındaki dilsel bilgilerin üyelik fonksiyonlarını tanımlayan veri tabanı, bulanık kontrol kurallarına göre bulanık kontrol çıkışı üreten çıkarım ünitesi, bulanık kontrol çıkışını sayısal değerlere dönüştüren durulayıcı birimden oluşmaktadır.



Şekil 4.14. Basit bir bulanık mantık sistem yapısı

Bulanıklaştırma kısmı, sistem girişlerinden alınan kesin bilgilerin, üçgen, yamuk, gibi üyelik fonksiyonları kullanılarak bulanık değerlere dönüştürüldüğü bölümdür. Bulanık kural tabanında ve bulanık çıkarım mekanizmasında bulanık kümeler üzerinde işlem yapılmaktadır (Karasakal, 2012).

Bulanık kural tabanı, kontrol kurallarının bulunduğu kısımdır. Sistemin girişleri ve çıkışları arasındaki ilişkiyi sağlayan “eğer-o-halde” yapısındaki bulanık kurallar bulanık kural tabanını oluşturmaktadır. Giriş değişkenleri “x” ve “y”, çıkış değişkeni “z” olan bir bulanık mantık sisteminde i. bulanık kural (Ki), Ki: Eğer $x = A$ ise ve $y = B$ ise o halde, “w” bulanık kural ağırlığı ile $z = C$ ’dir şeklinde ifade edilebilir. Burada x ve y kontrol edilecek sistemin giriş değişkenlerini, A ve B bulanık kümeler ile ifade edilen giriş dilsel değişkenlerini, C bulanık kümeler ile ifade edilen çıkış dilsel değişkenini, z kurala ait kontrol davranışını ifade etmektedir. x, y ve z değişkenleri sırasıyla A, B ve C bulanık kümelerinin elemanlarıdır. C, bulanık bir değer olabileceği gibi sayısal bir değerde olabilir. Kural sonundaki “w” değişkeni ise bulanık kontrolörü ayarlama da kullanılan en önemli parametrelerden biri olan ve değeri her bir kural için değişebilen bulanık kuralın ağırlığıdır. Değişkenlerin üyelik dereceleri [0,1] aralığında değiştiğinden, A,B ve C dilsel ifadelerinin bulanık kümeler olarak tanımlanabilmesi için, bulanık kural ağırlıklarının [0,1] aralığında olması gerekmektedir. Kural tabanındaki dilsel bilgilerin üyelik fonksiyonları veri tabanında tanımlanmaktadır (Karasakal, 2012).

Bulanık çıkarım birimi, kural tabanındaki bulanık kontrol kurallarına göre bulanık kontrol çıkışı üreten kısmını oluşturmaktadır. Karar verme ve çıkarım yapma özelliğine sahip olan kısım, bulanık sistemin en önemli birimini oluşturmaktadır. Bulanık kural tablosundaki her bir bulanık kuralın, geçerli giriş değişkenleri için ne kadar etkilendiğini tespit ederek bulanık kontrol çıkışını üretmektedir. Bulanık çıkarım, bulanık kurallar adı verilen ve dilsel değişkenler ile tanımlanan kurallar ile gerçekleştirilmektedir. Dilsel değişkenler, değerleri çok sıcak, sıcak, ılık, soğuk, çok soğuk gibi dilsel ifadeler olan değişkenlerdir. İnsanın günlük hayatta kullandığı “çok sıcak”, “en küçük” gibi dilsel niteleyici ve dilsel değişkenleri esas alan bulanık mantık, matematiksel yaklaşım olarak klasik küme kuramı yerine bulanık küme kuramına dayanmaktadır (Karasakal, 2012). Bulanık çıkarım mekanizması için, Mamdani min-max tipi, Tagaki-sugeno tipi, Tekil tip gibi metotlar yanında farklı metotlar bulunmaktadır (Karasakal, 2012).

Mamdani min-max tipi çıkarım yönteminde, her bir girişin ait olduğu üyelik fonksiyonu elde edildikten sonra, üyelik fonksiyonu değerlerine minimum mantıksal işlemi uygulanarak ilgili bulanık kümenin üyelik değerinin üstündeki kısmı kırılmaktadır. Tüm bulanık kurallar sonucunda elde edilen kırılmış bulanık kümelerinin birleşimi ile gerçekleşen çıkarım sonucu, durulaştırma birimine uygulanmaktadır.

Tagaki-Sugeno tipi çıkarım yönteminde, her bir kuralın çıkışı giriş değerinin doğrusal birleşimiyle bulunur. Tekil tip çıkarım ise Mamdani ve Tagaki-Sugeno yapılarının özel bir biçimidir. Her bir giriş için, üyelik derecesine bağlı olarak yeniden ölçeklendirilen bulanık kümeler içindeki maksimum değer alınarak bulunmaktadır.

Durulaştırma birimi, çıkarım ünitesinden elde edilen bulanık kontrol çıkışının sayısal değere dönüştürülmesi işleminin gerçekleştirildiği birimdir. Durulaştırma işleminde en çok ağırlık merkezi, ağırlık ortalaması ve maksimum durulaştırma yöntemleri kullanılmaktadır (Karasakal, 2012).

Ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi, bulanık çıkarım biriminden elde edilen alanların ağırlık merkezinin Denklem (4.46) kullanılarak elde edilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Aktif kuralların bulanık çıkışlarına ilişkin üyelik fonksiyon değerleri ile skaler ağırlıkları çarpılarak toplamları alınır. Elde edilen değerlerin üyelik fonksiyon değerlerinin toplamına bölünmesiyle, Denklem (4.46)'da verilen sayısal kontrol işareti (z^*) elde edilmektedir.

$$z^* = \frac{\int \mu_c(z).z.dz}{\int \mu_c(z)dz} \quad (4.46)$$

Ağırlık ortalaması durulaştırma yönteminde, bulanık değerler ve üyelik dereceleri kullanılarak Denklem (4.47)'e göre durulaştırma işlemi yapılmaktadır.

$$z^* = \frac{\sum \mu_c(z).z}{\sum \mu_c(z)} \quad (4.47)$$

İki bulanık küme ile elde edilen alanlara ağırlık ortalaması durulaştırma işlemi Denklem (4.48)'daki şekilde hesaplanmaktadır.

$$z^* = \frac{w_1 z_1 + w_2 z_2}{w_1 + w_2} \quad (4.48)$$

Maksimum durulaştırma yönteminde ise, maksimum üyelik işleviyle ilişkili olan bu yöntemde, en yüksek üyelik derecesine sahip aralık belirlenerek aralığın başlangıç, en son değeri kullanılarak durulaştırılmış sonuç değeri Denklem (4.49)'da verilen formülle elde edilmektedir.

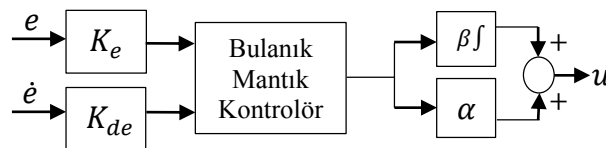
$$z^* = \frac{a+b}{2} \quad (4.49)$$

Klasik kontrol sistemleri sistemin karmaşık matematik modeline göre tasarlanırken, bulanık kontrol sistemlerinde ise sistemin matematiksel modeline gerek duyulmadan eğer-o-halde kuralları şeklinde düzenlenen uzman bilgisi kullanılmaktadır. Kontrol uygulamalarında kararlılık ve yüksek başarımla elde edebilmek için sistem yapısı ve dinamiklerinin iyi bilinmesi matematik modelinin doğru elde edilebilmesi gerekmektedir. Sistem parametrelerindeki zamanla meydana değişimler ve belirsizlikler nedeniyle matematiksel model doğru elde edilemeyebilmektedir. Klasik kontrol yöntemlerinin, doğru modeli elde edilemeyen sistemlerde başarımla düzeyi düşüktür. Bu durumda, zamanla değişen, doğrusal olmayan, analitik modeli karmaşık olan sistemlerin kontrol edilmesinde klasik PID kontrol yerine uzman bilgisi ve deneyiminin kullanılmasına imkan veren bulanık mantık kontrol yöntemi kullanılabilir (Karasakal, 2012).

Bulanık küme kavramının Zadeh (1965), tarafından önerilmesinden sonra, Bellman ve Zadeh (1970) insan bilgisinin “eğer - o halde” yapısıyla ifadesini sağlayan dilsel değişkenler kavramını ortaya atarak bulanık mantık kontrol kavramını açıklamışlardır. Bulanık mantık kontrol uzman deneyimi, bilgisi ve kontrol yöntemini kullanmaktadır. Mamdani (1974), uzman operatör dilsel kontrolünü gerçekleştirmek üzere min-max çıkarım yöntemi ile laboratuvar ortamında buhar

makinasından oluşan dinamik bir sistemi bulanık mantık yöntemi ile kontrol etmiştir. Algoritmanın bulanık koşullu ifadeler olarak ifade edilen bir dizi kuralın yorumlayıcısı olarak uygulandığı, yöntemin modellenmesi zor olan sistemlerin kontrolünde kullanılabileceği belirtilmektedir. Uzman operatör bilgisi ve deneyimine dayanan ilk bulanık mantık kontrolör bir buhar makinasının kontrolünde Mamdani ve Assilian (1975) tarafından kullanılmıştır. Çalışmada bulanık mantık, bir insan operatörün belirttiği sezgisel kontrol kurallarını otomatik kontrol stratejisine dönüştürmek için kullanılmıştır. Kontrol stratejisinin, beklenenden çok daha iyi olduğu kanıtlanmış ve bir öğrenme kontrolünde, dilsel kontrol sentezinin temel deneyleri sunulmuştur. Qiao ve Mizumoto (1996)'da, PID kontrolörün yapısına benzeyen, kontrol işareti bilgi tabanı ve çıkarım mekanizmasında üretilen bulanık PID kontrolör yapısını önermiştir. Karmaşık sistemleri daha etkin kontrol etmek için doğrusal kontrol sağlayan klasik PID kontrolör ile zamanla değişen ve doğrusal olmayan parametrelere sahip sistemlerin kontrolünde uzman deneyimi ve bilgisi kullanan kurallara sahip bulanık mantık kontrol yapısı kullanılarak bulanık PID kontrolörler elde edilmiştir (Karasakal, 2012). Bulanık PID kontrolörler sahip oldukları bulanık kurallar sayesinde doğrusal olan ve olmayan sistemlerde başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir (Qiao ve Mizumoto 1996; Karasakal, 2012).

Bulanık PID kontrolör yapısı iki şekilde oluşturulmaktadır. Birinci yöntemde, PID kontrolörün kazançları bulanık mantık ile on-line olarak ayarlanırken, ikinci yöntemde ise girdi-çıkı ilişkisi PID kontrolöre benzeyen sistemde kontrol işareti bulanık mantık ile üretilmektedir. İkinci yönteme örnek olarak iki giriş ve tek çıkışa sahip olan tek kural tabanına sahip bulanık PI ve bulanık PD kontrol yapılarının paralel bağlanması ile elde edilen bulanık PID kontrolör yapısı Şekil 4.15.'de görülmektedir (Qiao ve Mizumoto, 1996; Golob, 2001; Güzelkaya ve ark., 2003; Karasakal, 2012).

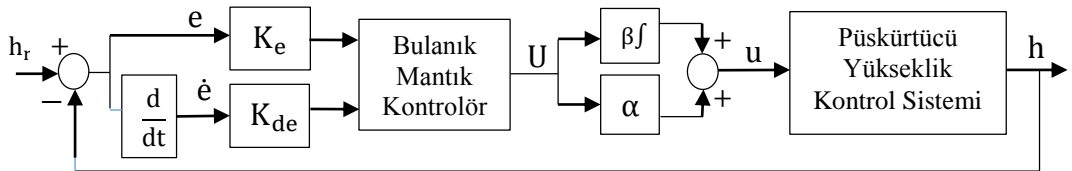


Şekil 4.15. Bulanık PID kontrolör blok gösterimi

Şekilden görüldüğü gibi Bulanık PD kontrolör çıkışının α ile çarpımından elde edilen çıkış ile, aynı bulanık PD kontrolörün çıkışının β ile çarpılıp integrali alınarak bulanık PI kontrolöre dönüştürülen çıkış toplanarak, bulanık PID kontrolör elde edilmektedir. Burada hata (e) ve hatanın değişimi (\dot{e}) girişleri, K_e ve k_{de} giriş ölçekleme çarpanlarını, u kontrolör çıkışını, α ve β ise çıkış ölçekleme çarpanlarını ifade etmektedir. Bu kontrolör yapısında α ölçekleme çarpanlı bulanık PD kontrolör, sistem cevabında aşım ve yükselme zamanını azaltma işlevini gerçekleştirirken, bulanık PD kontrolör çıkışının integralinin alınması ile elde edilen β ölçekleme çarpanlı bulanık PI kontrolör, çıkıştaki kalıcı durum hatasını azaltmaktadır (Karasakal, 2012).

4.2.3.4. Püskürtücü sistemin Bulanık PID kontrolü

Çalışmada Şekil 4.16.'da görülen bulanık PID kontrolör yapısı kullanılmıştır. Şekilde görülen bulanık mantık kontrolör bölümü için hazır bloklar kullanılmamış, Bulanık kontrolün tüm bölümleri Labview programında MATLAB script node içerisine yazılmıştır.



Şekil 4.16. Kapalı çevrim Bulanık PID kontrolör sistemi yapısı

Bulanık kontrolör çıkışı U iken, Bulanık PID kontrolör çıkışı u , Denklem (4.50)'de verilen ifade ile hesaplanmıştır.

$$u = \alpha U + \beta \int U dt \quad (4.50)$$

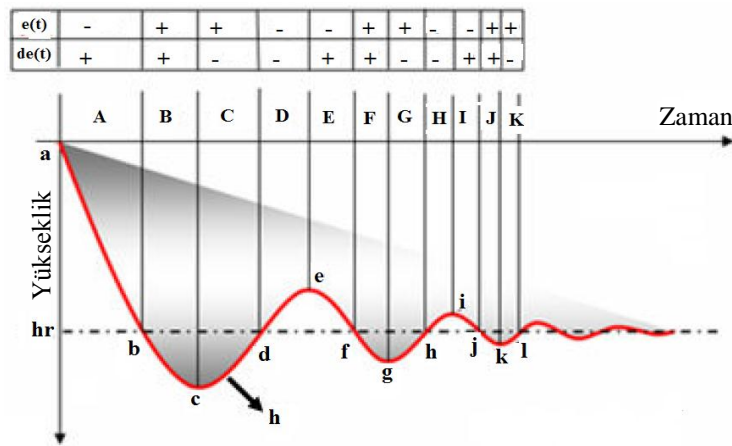
Hata (e) ve hatanın değişimi (\dot{e}) bulanık PID kontrolörün giriş değişkenleri ve kontrol işaretindeki değişim (u) çıkış değişkeni olarak kullanılmıştır. Bulanık PID kontrolörüne ait giriş değişkenlerini tanımlanan üyelik fonksiyonları tanım aralığına

birimselleştirmek amacıyla, hata değişkeni e için K_e ve hatanın değişimi değişkeni \dot{e} için ise K_{de} ölçekleme çarpanları kullanılmıştır. Benzer olarak, bulanık PID kontrolörün çıkışını sistem için uygulanabilir bir değere birimselleştirmek için sırasıyla β ve α ölçekleme çarpanları kullanılmıştır. Birimselleştirme süresince, bulanık PID kontrolörün giriş değişkenlerinin tanım aralıkları $[-1, 1]$, çıkış değişkenlerinin tanım aralıkları ise $[0, 1]$ olarak belirlenmiştir (Karasakal, 2012).

Deney düzeneğinde referans yükseklik değeri kontrol paneli girişinden cm olarak girilmektedir. Ultrasonik mesafe algılayıcısı çıkışından alınan yükseklik sinyali ile referans yükseklik değeri farkından elde edilen hatası (e) ve hatanın değişimi (\dot{e}), Bulanık PID kontrolörün girişlerini oluşturmaktadır. Kontrolörün girişi olan hata ve hatanın değişimi Denklem (4.51)'de verilmiştir.

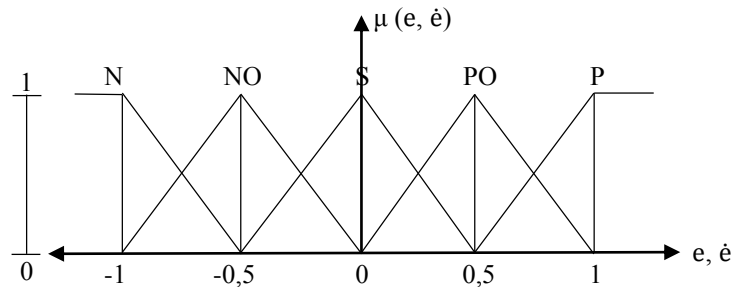
$$\begin{aligned} e(t) &= h_r(t) - h(t) \\ \dot{e}(t) &= e(t) - e(t - 1) \end{aligned} \quad (4.51)$$

Hata $e(t)$, sistem çıkışı $h(t)$ 'nin referans yükseklik $h_r(t)$ değerine göre yerini, hatanın değişimi $\dot{e}(t)$ ise yönünü vermektedir. Hata ve hatanın değişimine göre bulanık denetleyici çıkışı püskürtücü yükseklik sistemi tepkisi dinamik işaret analizi Şekil 4.17.'de verilmiştir. Burada; b, d, f, h, j, l referans geçiş noktalarını, a, c, e, g, i, k referans uç noktalarını, A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K referans aralıklarını ifade etmektedir. a noktasında rotor başlangıç konumundadır ve püskürtücü yüksekliği referans değerden büyüktür. b-c arasında hata ve hatanın türevi pozitifdir. d-e arasında ise hata ve hatanın türevi negatiftir.



Şekil 4.17. Kural tablosu için çıkışlar

Hata ve hatanın değişiminden oluşan kontrolör girişlerinin her biri için negatif “N”, negatif orta “NO”, sıfır “S”, pozitif orta “PO”, pozitif “P” şeklinde beş adet dilsel değişken tanımlanmıştır. Hata ve hatanın türevi üçgen üyelik fonksiyonu kullanılarak bulanıklaştırılmıştır. Şekil 4.18.’de hata ve hatanın değişiminin üçgen üyelik fonksiyonu ile gösterimi görülmektedir.



Şekil 4.18. Hata ve hatanın değişiminin üçgen üyelik fonksiyonu ile gösterimi

Çalışmada iki değişken için 5 üyelik fonksiyonu kullanıldığından, Tablo 4.3.’de verilen $5 \times 5 = 25$ adet kural tanımlanmıştır.

Tablo 4.3. Püskürtücü yükseklik sistemi bulanık kontrolör kural tablosu

		e				
		N	NO	S	PO	P
è	N	P	P	PO	PO	S
	NO	P	PO	PO	S	S
	S	PO	S	S	S	NO
	PO	S	S	NO	NO	N
	P	S	NO	NO	N	N

Sisteme ait deneylere dayanılarak elde edilen kurallar, Labview programında MATLAB script node içerisine yazılmıştır. Oluşturulan kurallar kullanılarak, yükseklik değişkeninin referans yükseklik değerine ne kadar ve ne şekilde ulaşacağı belirlenmektedir. Örneğin hata negatif (N) olduğunda püskürtücü yüksekliği referans değerden büyüktür ve bitkiden uzaklaşmaktadır. Hatanın türevi de negatif (N) ise püskürtücü yüksekliği artmaya devam ediyor demektir. Bu durumda kontrol sisteminden, PMTLISM rotorunu ileri yönde itmesi ve püskürtücü yüksekliğini azaltması beklenmektedir. Kontrol işaretinin artırılması tabloda kural çıkışı olarak P yazılarak gösterilmiştir. Diğer taraftan hata pozitif (P) olduğunda püskürtücü referans değeri geçerek bitkiye yaklaşmaktadır. Hatanın türevi de pozitif (P) olduğunda ise püskürtücü bitkiye yaklaşmaya devam etmektedir. Bu durumda kontrol sisteminden, PMTLISM rotorunu geri çekmesi ve püskürtücü yüksekliğini arttırması beklenmektedir. Hata ve hatanın değişiminin giriş olarak alındığı, bulanık PID kontrol sistemlerinde kural tablosunun tamamı işlenerek, tüm olasılıklar kontrol edilmektedir. Gerçekleştirilen kontrol tasarımında üretilen kontrol işareti, servo sürücü analog girişlerine gerilim sinyali olarak uygulanarak sürücü çıkışındaki PMTLISM rotoru ve dolayısı ile püskürtücü yüksekliğini ayarlamaktadır.

Bulanık kontrol programında, Hata ve hatanın türevi üçgen üyelik fonksiyonu ile bulanıklaştırılırken, ölçeklenen aralıkta her bir dilsel değişken için üyelik fonksiyonları Denklem (4.52), (4.53), (4.54), (4.55), (4.56)'da verilmektedir.

$$\mu_{e_P} = \begin{cases} 1, & 1 \leq e \\ 2e - 1, & 0,5 \leq e \leq 1 \end{cases} \quad (4.52)$$

$$\mu_{e_{PO}} = \begin{cases} -2e + 2, & 0,5 \leq e \leq 1 \\ 2e, & 0 \leq e \leq 0,5 \end{cases} \quad (4.53)$$

$$\mu_{e_S} = \begin{cases} -2e + 1, & 0 \leq e \leq 0,5 \\ 2e + 1, & -0,5 \leq e \leq 0 \end{cases} \quad (4.54)$$

$$\mu_{e_{NO}} = \begin{cases} -2e, & -0,5 \leq e \leq 0 \\ 2e + 2, & -1 \leq e \leq -0,5 \end{cases} \quad (4.55)$$

$$\mu_{e_N} = \begin{cases} -2e - 1, & -1 \leq e \leq -0,5 \\ -1, & e \leq -1 \end{cases} \quad (4.56)$$

Bulanık PID denetleyici yapısında kurallar yazılırken “ve” işlemi yapılmış ve Mamdani’nin Min (hatanın üyelik değeri, hatanın türevinin üyelik değeri) şeklinde çıkarım yöntemi ve ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi kullanılmıştır. Bu işlem sonucunda üyelik fonksiyonu $\mu(w_i)$ değeri elde edilmiştir. Örneğin hata 0,35 ve hatanın türevi 0,2 olduğunda, hata için üçgen üyelik fonksiyonu doğru denklemleri $PO(0,35) = 0,7$, $S(0,35) = 0,3$ ve hatanın türevi için $PO(0,2) = 0,4$, $S(0,2) = 0,6$ elde edilir. Bu değerler için diğer üyelik fonksiyonları “0” olmaktadır. Bu durumda tablo da e ve \dot{e} değişkenlerine ait PO ve S fonksiyonlarının kesiştiği dört kural geçerli olmaktadır. Kuralı açıklamak için hatanın S ve hatanın türevinin PO olduğu kural seçildiğinde, kuralın üyelik fonksiyon değeri, Denklem (4.57)’deki gibi bulunmaktadır.

$$\mu(w_i) = \min\{S(0,35), PO(0,2)\} = \min(0,3, 0,4) = 0,3 \quad (4.57)$$

Ağırlık merkezi durulaştırma metodu kullanılarak, her bir kuralın üyelik fonksiyon değeri o kurala ait kural çıkışı ile çarpılarak elde edilen değerler toplanır. Sonuç üyelik fonksiyon değerine bölünerek Denklem (4.58)’deki gibi elde edilmektedir.

$$U = \frac{w_1 \cdot \mu(w_1) + w_2 \cdot \mu(w_2) + \dots + w_{25} \cdot \mu(w_{25})}{\mu(w_1) + \mu(w_2) + \dots + \mu(w_{25})} \quad (4.58)$$

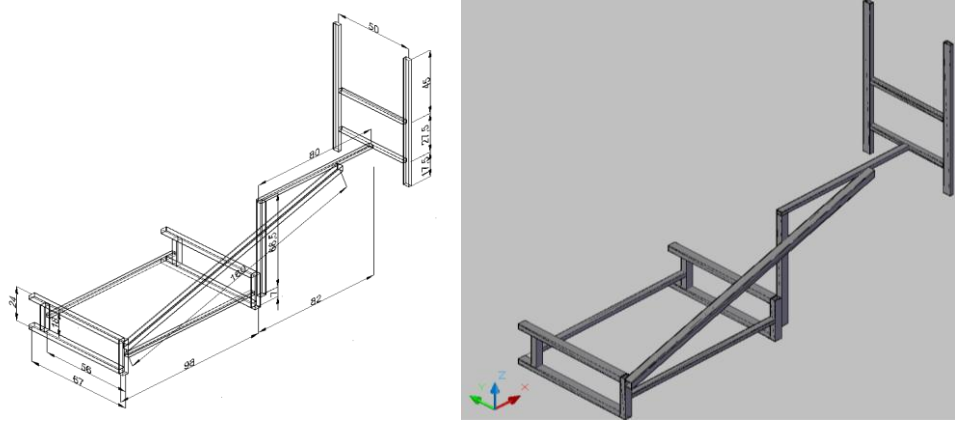
Böylece bulanık mantık kontrolör kullanılarak, hata ve hatanın türevine göre bulanık kontrol işareti U üretilmektedir. Üretilen U kontrol işareti, $u = \alpha U + \beta \int U dt$ işleminden sonra Bulanık PID kontrol sinyali olarak 0-10V arasına normalize edilerek servo sürücü analog girişlerine uygun hale dönüştürülüp püskürtücü yükseklik kontrol sistemine uygulanmaktadır.

Bulanık mantık kontrolör tasarlanırken hata ve hatanın türevi normalize edilerek kontrolör girişlerine uygulandığı için, çıkış işareti de kazanç değerleri ile çarpılarak kontrolör çıkışı üretilmektedir. Bulanık PID kontrolör işlemi tamamlandığında,

sistemde başarı ölçütlerine göre ayarlama yapılmaktadır. Kontrolörün sistem üzerindeki başarı ölçütleri olarak aşım yüzdesi, yükselme zamanı, sürekli hal hatası kullanılmıştır. Bulanık PID kontrolörde başarı düzeyi, üyelik fonksiyonu şekli değiştirilerek, kurallar değiştirilerek ya da ölçekleme çarpanları değiştirilerek arttırılabilmektedir. Bu tez çalışmasında, ölçekleme çarpanları $(K_e, K_{de}, \alpha, \beta)$ değiştirilerek ayarlama yapılmıştır. Başarı düzeyini arttırmak için yapılan deneyler sonucunda, Bulanık PID kontrol ölçekleme çarpanları $K_e = 0,4$, $K_{de} = 0,03$, $\alpha = 3$, $\beta = 20$ olarak elde edilmiştir.

4.3. Arazi Deneyleri

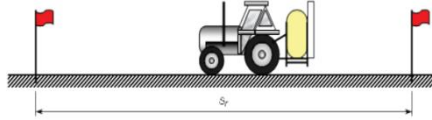
Arazi deneyleri için, laboratuvarıda geliştirilen püskürtücü yükseklik kontrol sistemi Şekil 4.19.'da görülen platform aracılığıyla bir traktöre adapte edilmiştir.



Şekil 4.19. Arazi çalışmaları traktör adaptasyon platformu şematik gösterimi

Deney düzeneğine ayrıca püskürtücü düzeneği eklenmiş ve farklı boylardaki gerçek bitkilerin bulunduğu arazi şartlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Arazi deneylerinde, laboratuvar çalışmasında minimum CV ve minimum PMTLSM akımı kriterine göre en iyi ivme değeri olarak elde edilen 20 m/s^2 ivme değeri kullanılmıştır. Arazi deneyleri, püskürtücü yükseklik kontrol sisteminin referans bitki profilini takip performansının test edilmesi ve aktif püskürtücü ile hedef bitkiler üzerinde ıslak alan yüzdesi ve ilerleme yönünde dağılım düzgünlüğe olan katkısının araştırılması çalışmalarından oluşmaktadır. Arazi deneylerinde sırt pülverizatörü ve konik tip aktif püskürtmeden oluşan püskürtücü sistem kullanılmıştır. Pülverizatör

traktör üzerine konumlandırılmış, püskürtücü ise PMTLSM rotoru ucuna monte edilmiştir. Ultrasonik sensör konumuna göre, sensör ayrı ve sensör üst konumlu olarak gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinde, sensör ayrı konumu ile en iyi CV değerleri elde edildiğinden, ultrasonik sensör platform üzerinde PMTLSM'den 50 cm önde konumlandırılmıştır. Langenakens ve arkadaşları (1995), tarımsal ilaçlama püskürtme uygulamalarında traktör hızının 3 ila 12 km/h arasında değiştiğini belirttiklerinden arazi deneylerinde 4, 8 ve 12 km/h ilerleme hızları seçilmiştir. Traktör ilerleme hızı bir GPS cihazı ile ölçülmüştür. Ölçülen hızın doğruluğu (Tadić ve ark., 2014) belirtildiği şekilde aralarında 100 m mesafe bulunan iki nokta arasında traktörün tamamlama süresi hesaplanarak test edilmiştir (Şekil 4.20.).



Şekil 4.20. Traktör hızının ölçülmesi (Tadić ve ark., 2014)

Arazi deneyleri sırasında, rüzgâr hızı 5,9 m/s olarak ilgili meteoroloji biriminden alınmış, hava sıcaklığı ve ortalama nem verileri sıcaklık/nem ölçme cihazı kullanılarak sırasıyla 23°C ve %41 olarak kaydedilmiştir.

Arazi çalışmasında, öncelikle aktüatör olarak PMTLSM'nin kullanıldığı püskürtücü yükseklik kontrol sisteminin farklı ilerleme hızlarında, farklı boylardaki gerçek bitkilerin bulunduğu arazi şartlarında püskürtücü yüksekliğini ayarlanan değerde tutma performansı test edilmiştir. Bitki yükseklik profilini ölçen ultrasonik mesafe sensörü ile püskürtücü arasında 50 cm yatay mesafe bulunduğundan, bitki yüksekliği ölçüldükten sonra üretilen kontrol işaretinin servo sürücü girişlerine uygulanması için gerekli gecikme süresi 4, 8, 12 km/h ilerleme hızlarında sırasıyla 0,45, 0,225 ve 0,15 sn olarak ayarlanmıştır.

Daha sonra ise sistemin farklı ilerleme hızlarında, farklı boylardaki hedef bitkiler üzerinde kaplama oranı ve ilerleme yönünde sıvı dağılım düzgünlüğüne etkisini test etmek için deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, kaplama oranı ve ilerleme yönündeki dağılım düzgünlüğü, WSP kartlar üzerindeki sprey kaplama alanının

(ıslak alan yüzdesinin) ölçülmesi ile karakterize edilmiştir. Evans ve arkadaşları (1994), sprey kaplamanın düzgün dağılması koşuluyla, görüntü analizinden elde edilen sprey kaplama alanı ve kimyasal analiz ile elde edilen ilaç birikimi arasında güçlü bir korelasyon bulmuşlardır. Deneylere başlamadan önce, 20 m deney hattı boyunca, altı adet WSP kartı, püskürtücüden yaklaşık 30 ila 65 cm mesafe de bulunan bitkiler üzerine tutturulmuştur. Püskürtme deneylerinde sıvı olarak su kullanılmış ve her bir deney sonunda suya duyarlı kâğıtlar üzerindeki damlacıkların tam olarak kuruması için 10 dk. beklenmiştir. Püskürtme uygulamasından sonra WSP kart numunelerinin fotoğrafları alınarak, görüntü analiz yöntemi ile ıslak alan yüzdesi veya kaplama alanı hesaplanmıştır. Chiu ve ark. (1999), görüntü işleme kullanarak damlacık boyutu dağılımı, kapsama yoğunluğu ve kapsamın alanı yüzdesinin belirlenebildiğini ayrıca artan analiz hızı ile birlikte ilgili işgücünün azaldığını belirtmektedir. Daha önce Salyani ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmalara uygun olarak, görüntü analizi için WSP kartlarının merkezinde sadece 2×2 cm'lik bir numune alanı kullanılmıştır. WSP kartları Matlab görüntü işleme araç kutusu kullanılarak analiz edilmiştir. Bu işlem için öncelikle WSP kart görüntüleri, görüntü gri ölçeğe çevrilerek ikili değerlere dönüştürülmüş ve yoğunluğuna bağlı olarak piksellere 0 veya 1 değerini atamak için bir eşik değeri uygulanmıştır. Sprey kaplama alanı (ya da ıslak alan yüzdesi), Sama ve ark., (2016) belirttiği şekilde suya maruz kalan piksel sayısının toplam piksel sayısına bölünmesiyle elde edilen oran olarak hesaplanmıştır. İlerleme yönündeki dağılım düzgünlüğü ise Denklem (4.59), (4.60) ve (4.61), kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\mu(WA) = \frac{1}{N_{WA}} \sum_{i=1}^{N_{WA}} WA_i \quad (4.59)$$

$$\sigma_s(WA) = \sqrt{\frac{1}{N_{WA}-1} \sum_{i=1}^{N_{WA}} (WA_i - \mu(WA))^2} \quad (4.60)$$

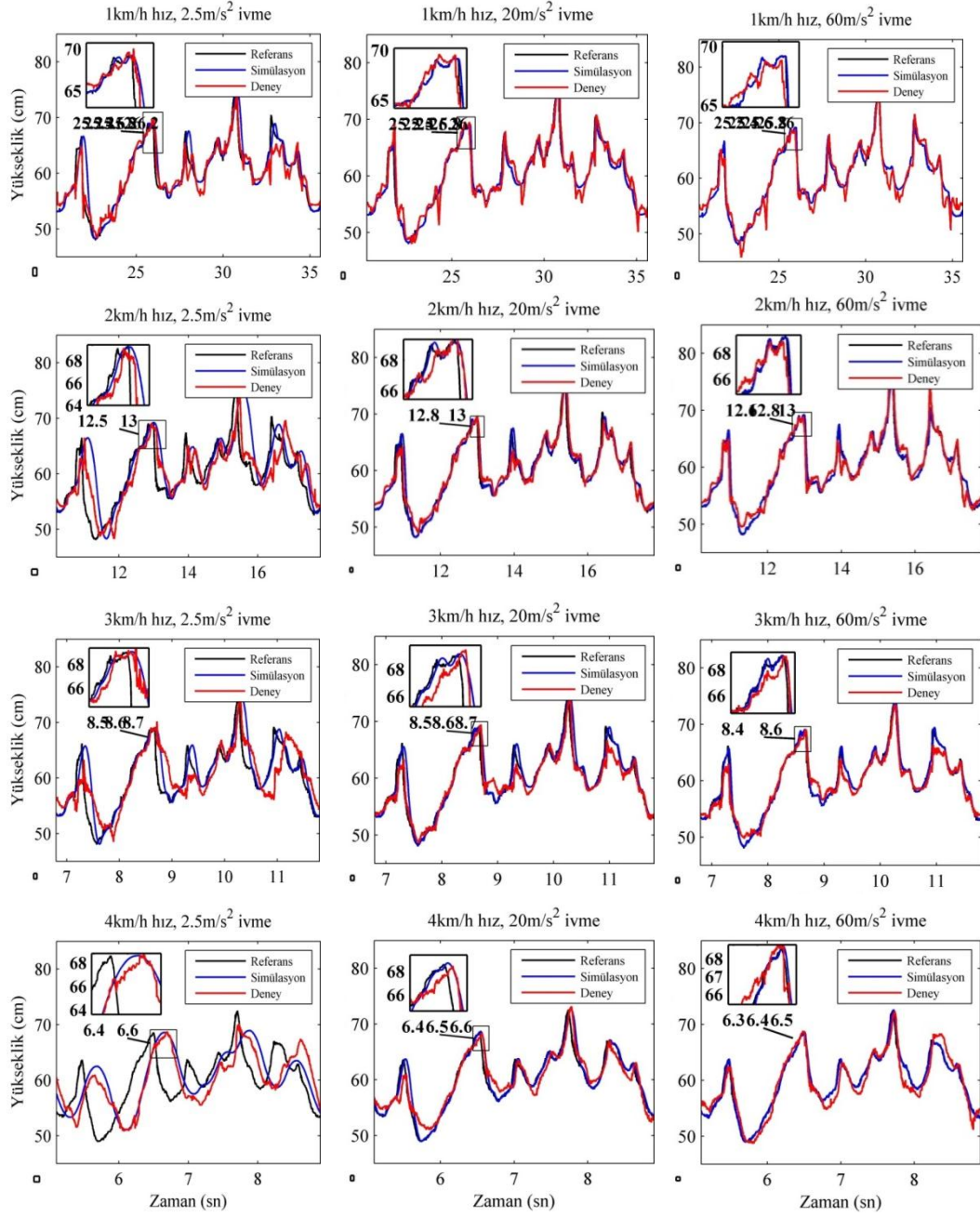
$$\%UD = \left(1 - \frac{\sigma_s(WA)}{\mu(WA)}\right) 100 \quad (4.61)$$

Burada WA_i her bir örnek WSP kart ıslak alan yüzdesini, N_{WA} ıslak alan yüzdesi hesaplanan WSP kart sayısını, $\sigma_s(PY)$ verilerin standart sapması, $\mu(WA)$ ıslak alan yüzdelерinin ortalamasını, UD dağılım düzgünlüğünü ifade etmektedir.

BÖLÜM 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

5.1. Simülasyon Çalışması Bulguları

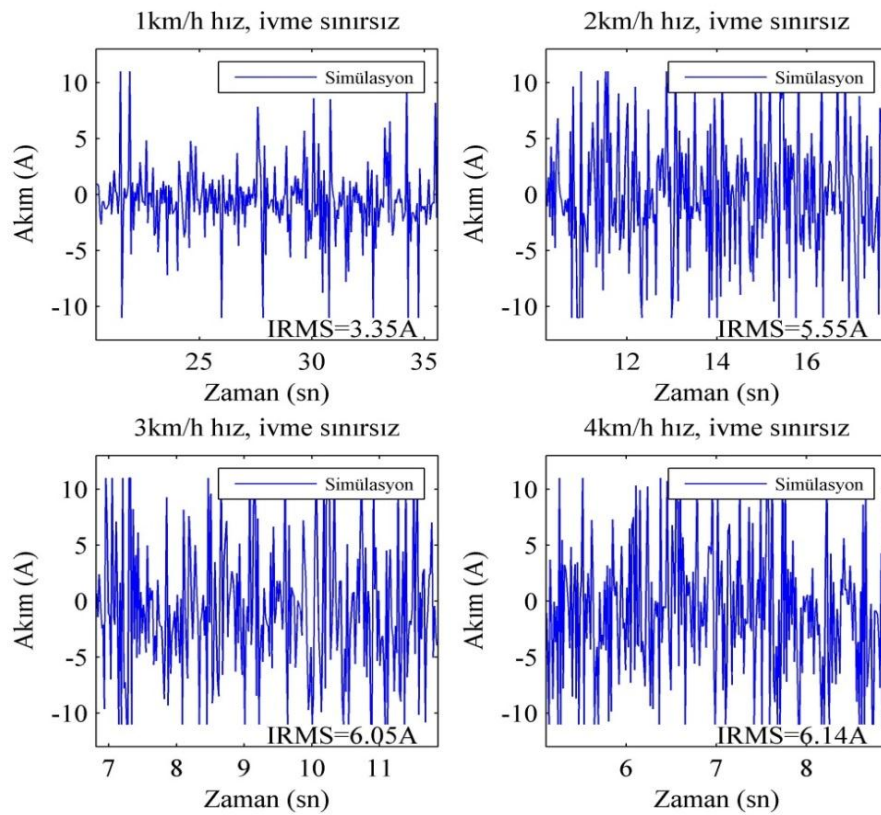
Üzerinde yapay bitkilerin bulunduğu konveyör bandın bir turunda (yaklaşık 410 cm) üretilen bitki yükseklik profilini simülasyon modeli ve deney sisteminin izleme performanslarının karşılaştırıldığı bazı grafikler Şekil 5.1.'de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi, hem simülasyon çalışmasında hem de deneylerde küçük ivme değerlerinde referanstan sapma miktarı daha fazla olmuştur. Artan hız ise sapma miktarının daha da fazla artmasına neden olmuştur. Referansı izleme hatasının 4 km/h hız ve 2,5 m/s² ivme değerlerinde en fazla olduğu görülmektedir. İvme artışının etkisi 3 km/h ve 4 km/h değerlerinde daha fazla olmuştur. Simülasyon modeli ve deney düzeneği referans hareket profilini küçük hızlarda daha küçük hatalarla takip edebilmiştir. Deney sisteminde, aynı hız ve ivme değerleri için elde edilen verilerdeki hatalara bant üzerindeki bitkilerin hareket etmesi ve düzenekte çalışma esnasında oluşan titreşimlerin neden olduğu söylenebilir. Simülasyon modelinde, titreşim, yapay bitkilerin sallanma hareketi, konveyör bant kayması ve hız değişimi gibi bozucu etkiler ihmal edildiğinden bitki profilini deney düzeneğine göre daha iyi performansla izlediği görülmektedir.



Şekil 5.1. Dört farklı konveyör hızı ve üç farklı PMTLSM ivmesi için simülasyon modeli ve yükseklik kontrol deney sisteminin referansı izleme performansları

Simülasyon modeli kullanılarak yapılan çalışmada, PMTLSM ivmesi sınırlandırılmadığında PMTLSM akımı değişimi Şekil 5.2.'deki gibi elde edilmiştir. Konveyör bandın 1, 2, 3 ve 4 km/h hız değerlerinde bir tam tur ilerleme süresince ölçülen akım değerlerinin 256 örneği kullanılarak oluşturulan grafiklere göre, motor akımı anlık değerleri izin verilen maksimum akım 11 A değerine tüm ilerleme hız değerlerinde ulaşmaktadır. Hız artışı ile birlikte maksimum anlık akım değeri verileri

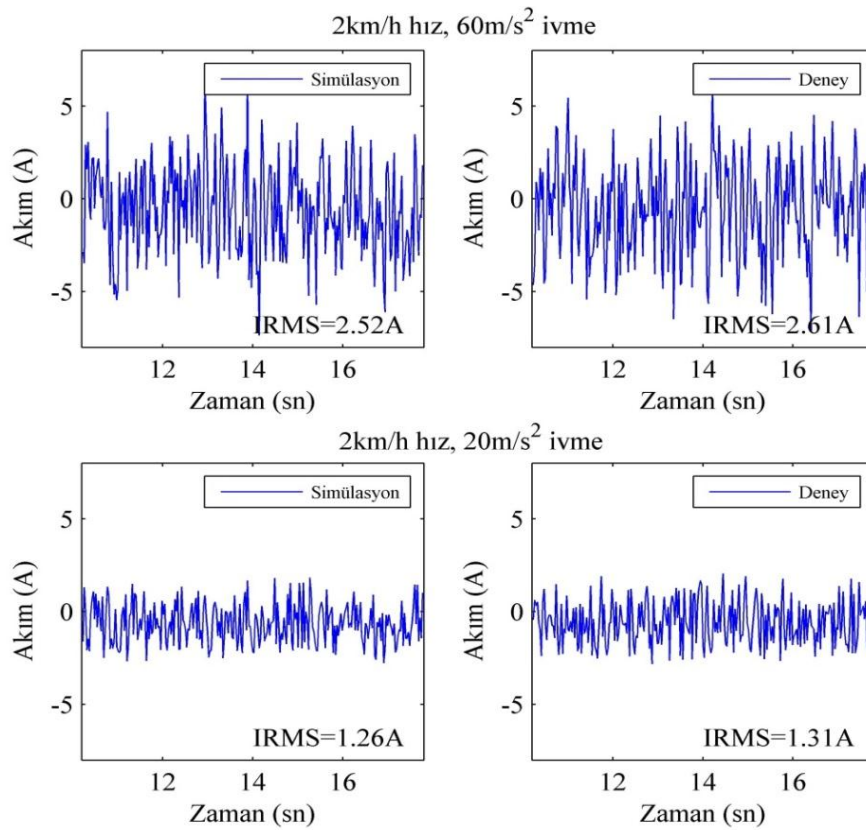
sayısı artış göstermektedir. Şekil 5.2.'de verilen grafik değerleri kullanılarak PMTSLM ivmesinin sınırlandırılmadığı durum için, 1, 2, 3 ve 4 km/h hızlarında, RMS akım değerleri sırasıyla 3,35, 5,55, 6,05 ve 6,14 A olarak hesaplanmıştır. Simülasyon çalışmasından elde edilen sonuçlara göre, ivme sınırlandırılmadığında hız artışı RMS akımının artmasına neden olmuş ve tüm hız değerlerinde PMTSLM RMS akımı maksimum sürekli sınır akım değeri 2,48 A'den daha büyük çıkmıştır. 4 km/h hız değerinde ivme sınırlandırılmadığında RMS akım değeri izin verilen maksimum sürekli akım değerinden 2,48 kat daha büyük olmuştur.



Şekil 5.2. Dört farklı hız değeri için PMTSLM ivmesi sınırlandırılmadığında motor akım değerlerinin simülasyon sonuçları

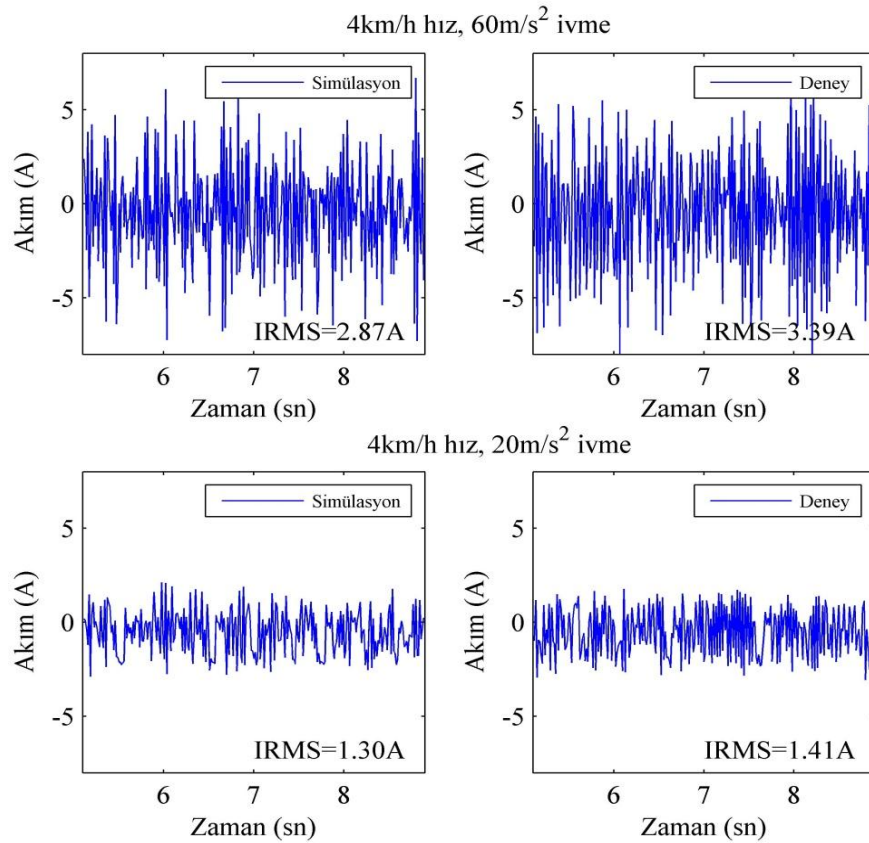
PMTSLM ivmesi, maksimum hız sınırlandırılmış ivme interpolasyon (yamuk/üçgen hareket profili) yöntemi ile sınırlandırıldığında, motor akımının anlık değerlerinde ve bu değerler kullanılarak hesaplanan RMS akım değerinde Şekil 5.3. ve Şekil 5.4.'te görüldüğü gibi azalma olmuştur. Şekillerde görüldüğü gibi hem simülasyon çalışması hem de deneysel çalışmada, PMTSLM ivme değeri 60 m/s^2 ve 20 m/s^2 ile

sınırlandırıldığında motor akımının anlık değerleri azalmış ve azalma miktarı 20 m/s^2 ivme değerinde daha belirgin olmuştur. Ancak ivme 60 m/s^2 olarak ayarlandığında motor RMS akımı yine sınır değerden daha büyük çıkmıştır. PMTLISM ivmesi 20 m/s^2 olarak ayarlandığında ise motor maksimum sürekli akım değerinden daha küçük akım değerlerinde çalışmıştır. Şekil 5.3.'de görüldüğü gibi 2 km/h ilerleme hızı için ivme 60 m/s^2 ile sınırlandırıldığında RMS akım simülasyon çalışmasında $2,52 \text{ A}$, deney çalışmasında ise $2,61 \text{ A}$ bulunmuştur. İvme 20 m/s^2 olarak sınırlandırıldığında ise RMS akım simülasyon ve deney çalışmasında sırasıyla $1,26 \text{ A}$ ve $1,31 \text{ A}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 5.3. İlerleme hızı 2 km/h iken iki farklı PMTLISM ivmesi için motor akımlarının simülasyon ve deney sonuçları

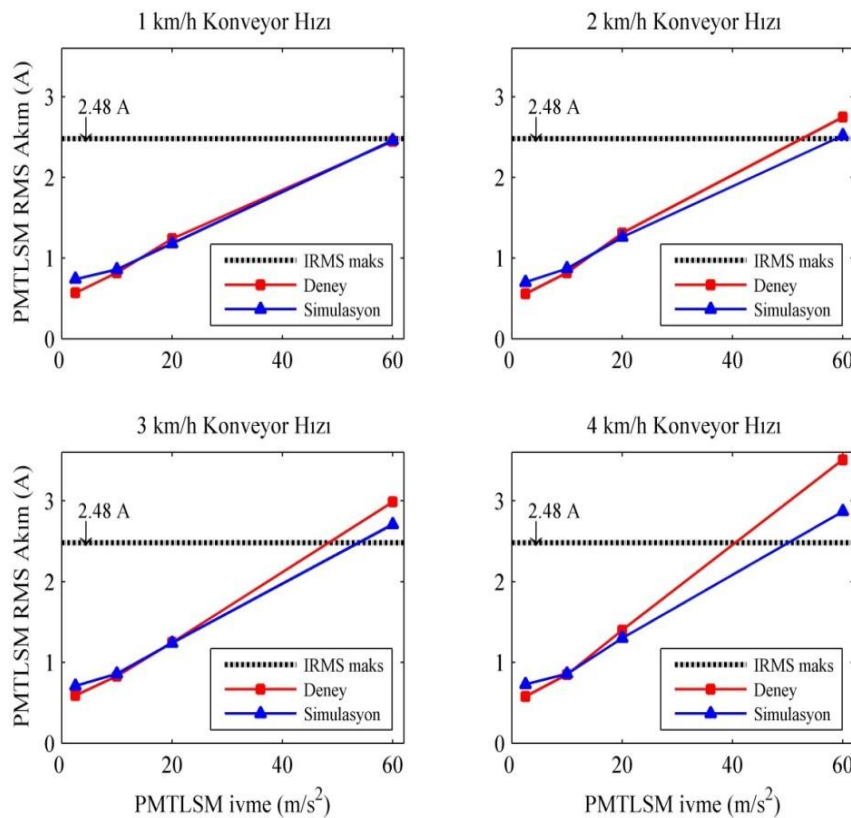
Şekil 5.4.'te görüldüğü gibi ilerleme hızı 4 km/h değerine artırılıp ivme 60 m/s^2 olduğunda RMS akım simülasyonda $2,87 \text{ A}$, deneyde $3,39 \text{ A}$ bulunmuş, aynı hız değerinde ivme 20 m/s^2 değerine azaltıldığında ise simülasyon ve deney için RMS akım sırasıyla $1,30 \text{ A}$ ve $1,41 \text{ A}$ değerlerine düşmüştür.



Şekil 5.4. İlerleme hızı 4 km/h iken iki farklı PMTSLM ivmesi için motor akımlarının simülasyon ve deney sonuçları

Şekil 5.3. ve Şekil 5.4.'de görüldüğü gibi her iki ilerleme hızı için ivme 60 m/s^2 ve 20 m/s^2 değerlerine sınırlandırıldığında motor akımının anlık değerlerinde ve RMS akım değerinde Şekil 5.2.'de verilen ivmenin sınırlandırılmadığı duruma göre azalma sağlanmakta, simülasyon ve deney çalışması akım değişimleri benzerlik göstermektedir. Dört farklı ivme ($2,5, 10, 20, 60 \text{ m/s}^2$) ve dört farklı hız (1, 2, 3, 4 km/h) değeri için, konveyör bandın bir tam devrinde PMTSLM akımının üç tekrarlı deney verisi ortalaması ve simülasyon çalışması verileri ortalamasının karşılaştırması Şekil 5.5.'de verilmiştir. İvme arttığında RMS akım değeri hem simülasyon ve hem de deney çalışmasında artış göstermiştir. 1 km/h konveyör hızı için deney ve simülasyon RMS akım değerleri benzer iken hız 2, 3 ve 4 km/h olduğunda 60 m/s^2 ivme değeri için deney akımı ortalaması simülasyon akımı değerinden daha büyük çıkmıştır. 2 km/h ve 3 km/h hızlarda simülasyon ve deney arasında fark küçükken, 4 km/h hız değerinde deney ve simülasyon arasındaki fark 60 m/s^2 ivme için daha büyük gözlenmiştir. Ayrıca grafiklere göre, hız 2 km/h ve daha büyük olduğunda

deney ve simülasyon akım değerleri izin verilen maksimum sürekli akım değerini aşmıştır.

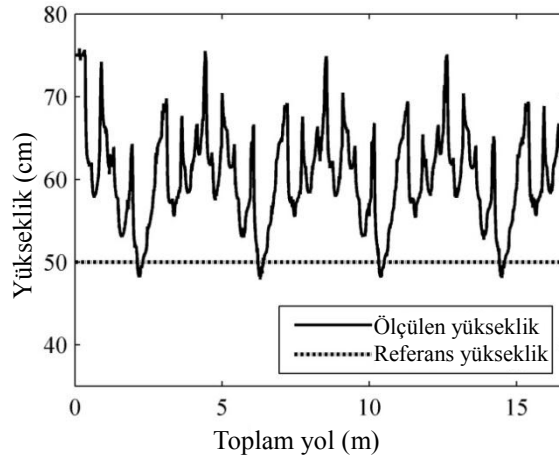


Şekil 5.5. Farklı ilerleme hızlarında, PMTLSM ivmesi ve RMS akımı arasındaki ilişkinin simülasyon ve deney sonuçları

Bu bölümde gerçekleştirilen simülasyon ve deney çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre PMTLSM ivme değerinin artırılması sistemin seçilen referans yükseklik profilini izleme performansını arttırmış ancak PMTLSM RMS akımında artışa neden olmuştur. Simülasyon çalışmasında ivme sınırlandırılmadığında RMS akım değeri sınır değerinin çok üstüne çıkmıştır. İvme 60 m/s^2 ile sınırlandırılarak yapılan simülasyon ve deney çalışmasında RMS akım değeri sınır değerinden daha büyük çıkmıştır. Bu nedenle bu sistem için RMS akım değeri ivme değerinin artırılmasında sınırlandırıcı bir faktör olmuştur. Simülasyon modeli ile deneysel sonuçlar tüm ivme ve hız değerleri için benzerlik gösterdiğinde simülasyon modeli deney düzeneğini temsil edebilmektedir. Buradan hareketle simülasyon modelinin bu çalışmada geliştirilen sistem için deney çalışması yapmadan önce sistemin yaklaşık performansı ve akım değerleri açısından önemli bilgiler verebileceği söylenebilir.

5.2. Laboratuvar Deneyleri Bulguları

Üzerinde yapay bitkilerin monte edildiği konveyör bant sisteminde, rotor ucuna bağlanan püskürtücü ve ikinci sensor yüksekliği başlangıç yüksekliği olarak 75 cm'e ayarlanmıştır. Laboratuvar deneylerinde sadece yükseklik kontrol çalışması hedeflendiğinden herhangi bir sıvı kullanılmamış püskürtücü pasif durumda tutulmuştur. Her bir deneyde, konveyör bandın yaklaşık dört tur ile yaklaşık 16,40 m yol alması sağlanmıştır. Yükseklik kontrolü uygulanmadığında tüm yol boyunca, konveyör bant üzerindeki ultrasonik sensör (püskürtücü) ve yapay bitkiler arasındaki mesafe, Şekil 5.6.'da gösterildiği gibi 47-75 cm (bitki boyu 5-33 cm) aralığında ölçülmüştür. Tüm laboratuvar deneylerinde Şekil 5.6.'da verilen bitki yükseklik profili referans yol olarak kullanılmıştır. Şekilden bitki yüksekliğinin ve kontrol yapılması gereken aralığın 28 cm olduğu görülmektedir. CV değeri, Şekil 5.6.'daki veriler kullanılarak, ortalama 50 cm yükseklik için %10,79 olarak hesaplanmıştır.



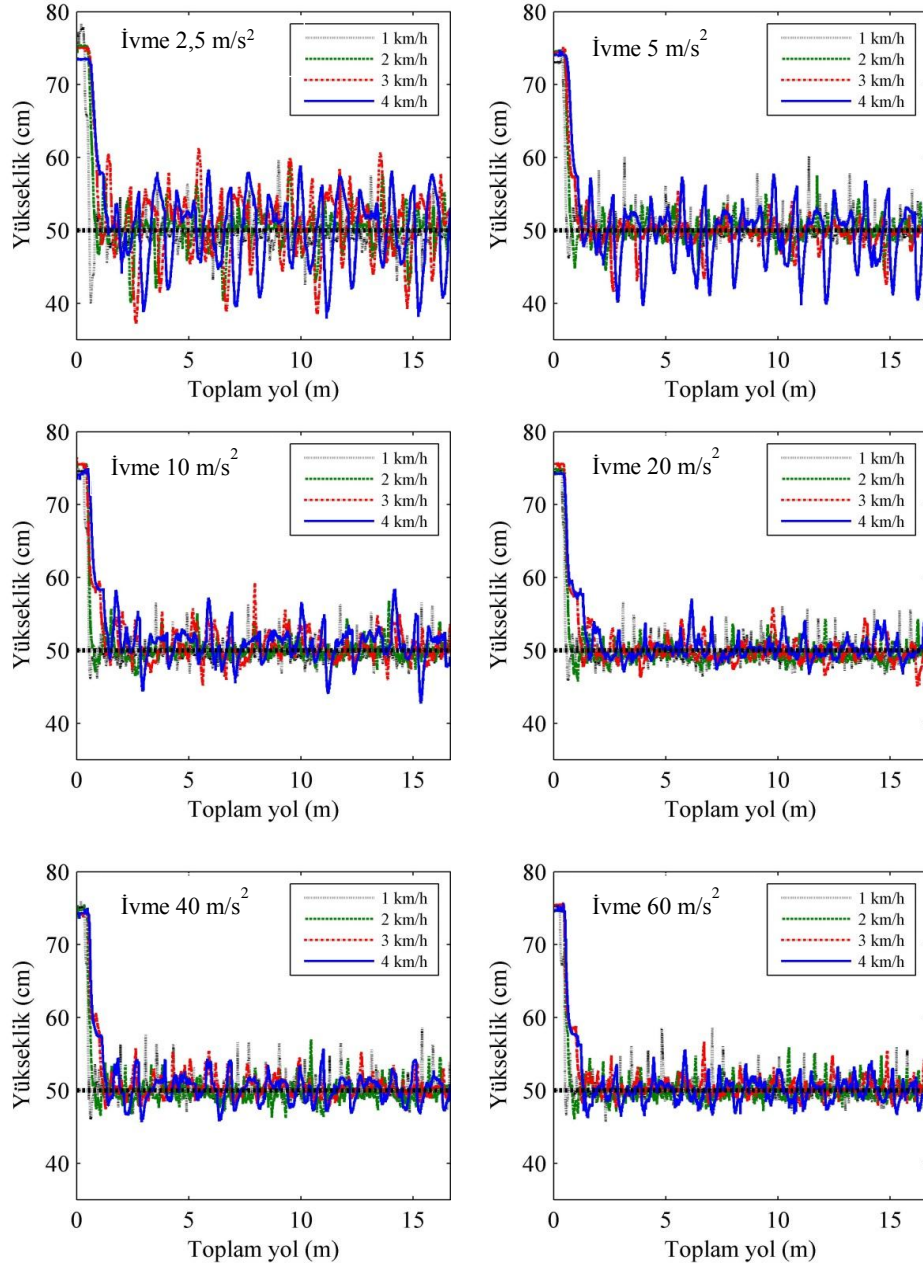
Şekil 5.6. Toplam yol boyunca püskürtücü ve yapay bitkiler arasında ölçülen mesafe (yapay bitki profili)

Laboratuvar çalışmasında, ultrasonik mesafe sensörünün konumlandığı duruma göre; sensör ayrı konumlu durum için bir, sensör üst konumlu durum için iki olmak üzere toplamda üç farklı kontrol yöntemi kullanılmıştır. Her bir kontrol uygulamasında, dört farklı konveyör bant hızı (1, 2, 3 ve 4 km/h) ve altı farklı PMTLSM ivmesi (2,5, 5, 10, 20, 40, 60 m/s²) ile 24 farklı koşul için her bir deney üç tekrarlı olacak şekilde 72 deney, toplamda ise 216 deney yapılmıştır. Her bir deneyde konveyör bant hızı ve PMTLSM ivmesi için alınan yükseklik verilerinin kararlı hale geçtikten sonraki

kısmı kullanılarak CV değerleri hesaplanmıştır. Yine her bir deneyde sürücü yazılımı aracılığıyla alınan anlık akım değerlerinden PMTLSM RMS akım değeri hesaplanmıştır. Deneysel her bir konveyör bant hızı ve PMTLSM ivmesi için alınan yükseklik verilerinin kararlı hale geçtikten sonraki kısmı kullanılarak CV değerleri hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar, sensör ayrı konumlu çalışmada bir, sensör üst konumlu çalışmada iki olmak üzere toplam üç kontrol yönteminden elde edilen verilerin grafiksel olarak gösterimi ve seçilen performans kriterlerine göre istatistik analiz sonuçlarından oluşmaktadır.

5.2.1. Sensör ayrı konumlu laboratuvar deneyleri

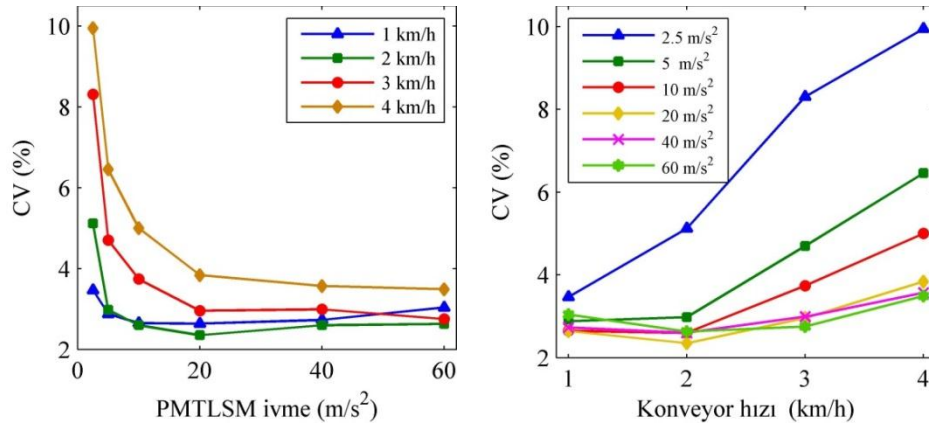
Sensör ayrı konumlu çalışma için, farklı hız ve ivme değerlerinde deneylerden elde edilen bazı grafikler Şekil 5.7.'de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi küçük ivme değerlerinde ayarlanan yükseklik değeri etrafında sapma en büyük değerinde iken büyük ivme değerlerinde sapma azalmaktadır. Grafiklerde 4 km/h hız değerinde ivme 2,5, 5 ve 10 m/s² olarak ayarlandığında, sapma miktarının daha belirgin olduğu görülmektedir. Yükseklik kontrol sistemi, şekillerden görüldüğü gibi genel olarak farklı ivme ve konveyör bant ilerleme hızları için püskürtücüyü yaklaşık 50 cm set değerinde tutmaya çalışmaktadır. Ancak konveyör bant hızı arttığında, referans değerden sapma miktarı artmakta, PMTLSM ivmesi arttırıldığında ise sapma miktarında azalma olmaktadır.



Şekil 5.7. Sensör ayrı konumlu çalışmada püskürtücü yükseklik kontrolü

Üç tekrarlı olarak gerçekleştirilen deneylerden elde edilen CV değerlerinin ortalamaları kullanılarak, CV değerinin PMTSLM ivmesi ve konveyör hızına göre değişimi Şekil 5.8.' de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, tüm hız değerleri için ivme arttığında CV değeri azalmaktadır. CV'nin azalma oranı konveyör hızına göre değişmektedir. Maksimum azalma oranı 4 km/h hız değerinde olurken, bunu 3 km/h, 2 km/h ve 1 km/h hızları izlemektedir. PMTSLM ivmesinin CV değerini azaltma etkisi yüksek konveyör hızlarında daha belirgindir. İvme 20 m/s²'den 60 m/s²'ye

arttırıldığında, CV değerleri sadece 4 km/h konveyör hızında azalmakta, diğer hızlarda az değişim gözlemlenmektedir. Diğer taraftan hız artışı özellikle 2,5 m/s² ivme değerinde CV'nin belirgin bir şekilde artmasına neden olmuştur.



Şekil 5.8. Sensör ayrı konumlu çalışmada PMTSLM ivmesi ve konveyör hızı ile CV arasındaki ilişki

PMTSLM ivmesi ve konveyör bant hız değişimlerinin CV değerleri üzerine etkisinin önemini araştırmak üzere varyans analizi yapılmış ve sonuçları Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Sensör ayrı konumlu çalışmada CV değerlerine ilişkin varyans analizi sonuçları

Varyasyon Kaynağı	CV		
	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F oranı
İvme (A)	5	0,983	95,96*
Hız (S)	3	0,687	111,72*
A×S	15	0,247	8,04*
Hata	48	0,098	
Toplam	71	2,015	

*P<0,05 anlamlı

Tablo 5.1, PMTSLM ivmesi ve konveyör hızı değişiminin ve bunların interaksiyonunun CV üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir (P<0,05). Anlamlı etkinin hangi grup ortalamalardan kaynaklandığını belirlemek için yapılan LSD çoklu karşılaştırma testi sonuçları Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Sensör ayrı konumlu çalışmada CV ortalama değerleri ve önem derecesi grupları

İvme	CV (%)				Ortalama I
	1 km/h	2 km/h	3 km/h	4 km/h	
2,5 m/s ²	0.54 ^{efg}	0.71 ^d	0.92 ^b	1.00 ^a	0.79 ^A
5,0 m/s ²	0.46 ^h	0.47 ^{gh}	0.67 ^d	0.81 ^c	0.60 ^B
10 m/s ²	0.42 ^{hi}	0.41 ^{hi}	0.57 ^e	0.70 ^d	0.52 ^C
20 m/s ²	0.42 ^{hi}	0.37 ⁱ	0.47 ^{gh}	0.58 ^e	0.46 ^D
40 m/s ²	0.44 ^{hi}	0.41 ^{hi}	0.47 ^{gh}	0.55 ^{ef}	0.47 ^D
60 m/s ²	0.48 ^{fgh}	0.42 ^{hi}	0.44 ^{hi}	0.54 ^{efg}	0.47 ^D
Ortalama II	0.46 ^C	0.47 ^C	0.59 ^B	0.70 ^A	
LSD _{0,05}	A: 0.037	S: 0.030	AxS: 0.074		

A, PMTLISM ivmesi; S, Konveyör bant hızı; Büyük harfler A ve S gruplarını, küçük harfler AxS interaksiyon gruplarını temsil etmektedir; (P <0,05).

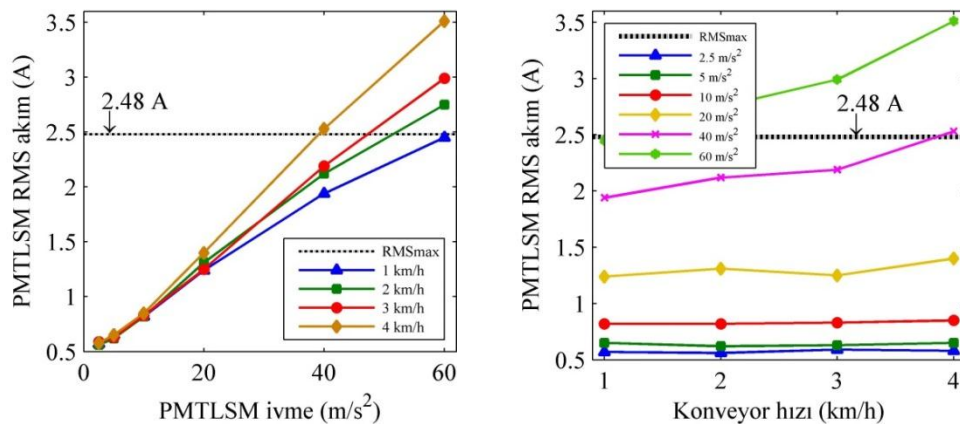
Tablo 5.2.'de verilen LSD testine göre, her bir ivme için tüm hız değerlerinden elde edilen ve büyük harflerle gruplandırılan CV değerleri ortalamalarından (ortalama I), PMTLISM ivme değeri arttığında CV değeri azalmaktadır. Bu azalma 2,5 m/s²'den 20 m/s² değeri aralığında önemli (P>0,05) bulunurken 20 m/s² ve 60 m/s² aralığında istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (P>0,05). İvme etkisinin 20 m/s² ivme değerlerinden sonra azalmasına motor tarafından üretilen titreşimin neden olduğu söylenebilir. Konveyör bant hızına göre karşılaştırma yapıldığında, her bir hız değeri için tüm ivme değerlerinden elde edilen ve yine büyük harflerle gruplandırılan CV değerleri ortalamalarından (ortalama II), 2 km/h üzerindeki hızlarda CV değerindeki artış istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (P<0,05). Hızın 1 km/h değerinden 2 km/h değerine arttığı durumda ise CV değerindeki artış önemsiz olmuştur (P<0,05). Her bir hız değeri için karşılaştırma yapıldığında, 1 km/h ve 2 km/h hızlarda ivmenin 2,5 m/s²'den 5 m/s²'ye artışı CV değerini önemli miktarda azaltırken, ivmenin 5 m/s²'den 60 m/s² değerine kadar artışı CV değerini önemli miktarda değiştirmemiştir (P>0,05). 3 km/h ve 4km/h konveyör hızlarında, 2,5 m/s²'den 20 m/s²'ye ivme artışı CV değerini önemli miktarda azaltırken (P<0,05), ivme 20 m/s²'den 60 m/s²'ye arttığında CV değerinde önemli bir artış olmamıştır (P>0,05). Her bir ivme değeri için karşılaştırma yapıldığında 2,5 m/s² ivme değerinde hızın 1 km/h'den 4 km/h'e artışı CV değerini önemli miktarda arttırmıştır (P<0,05). 5 m/s², 10 m/s², 20 m/s² ivme değerinde hızın 2 km/h ve 4 km/h arasında artışı CV değerini önemli miktarda arttırırken (P<0,05), 1 km/h'den 2 km/h'e artış CV değerini önemli miktarda değiştirmemiştir (P>0,05). 40 m/s², 60 m/s² ivme değerinde ise hızın 3 km/h'den 4 km/h'ye artışı CV değerini önemli miktarda arttırmıştır (P<0,05). Bu sonuçlar, küçük ivme değerlerinde hız artışının CV değerini arttırma etkisinin büyük olduğunu, ivme

arttırıldığında ise hız artışının CV değerini arttırma etkisinin azaldığını diğer bir ifade ile yüksek ivme değerlerinde hızın etkisinin azaldığını ve ivmenin hız üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Sensör ayrı konumlu laboratuvar deneylerinde, koşulun üç tekrarın ortalamasından elde edilen yükseklik değerleri minimum 49,47 cm ve maksimum 51,05 cm arasında bulunmuştur (Tablo 5.3.). Tabloda görüldüğü gibi bu çalışma da geliştirilen püskürtücü yükseklik kontrol sistemi sensör ayrı konum çalışma için püskürtücüyü 50 cm yükseklik noktasının çok yakınında tutabilmektedir.

Tablo 5.3. Sensör ayrı konumlu çalışmada ortalama yükseklik değerleri

Ortalama yükseklik (cm)				
	1 km/h	2 km/h	3 km/h	4 km/h
2,5 m/s ²	50,54	50,01	50,03	49,99
5,0 m/s ²	50,12	50,01	49,64	49,47
10 m/s ²	49,51	50,03	50,68	51,05
20 m/s ²	50,12	50,09	50,88	50,95
40 m/s ²	50,14	49,70	50,64	50,27
60 m/s ²	50,05	48,82	50,98	50,22

PMTLSM RMS akımının motorun ısınması üzerinde önemli bir etkisi olduğundan, deneylerde PMTLSM ivmesi ve konveyör hızının, RMS akımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. RMS akımın, PMTLSM ivmesi ve konveyör hızına göre değişimi Şekil 5.9.'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Sensör ayrı konumlu çalışmada PMTLSM ivmesi ve konveyör hızı ile PMTLSM RMS akımı arasındaki ilişki

Şekil 5.9.'da tüm hız değerlerinde ivme arttığında RMS akımın arttığı, artış oranının 20 m/s^2 ivme değerinden sonra 4 km/h hız değerinde daha fazla olduğu, hızın azalması ile birlikte RMS akım değerinde artış oranının azaldığı görülmektedir.

Şekil 5.9.'da işaretlenen $2,48 \text{ A}$ akım değeri PMTLISM için izin verilen maksimum sürekli RMS akım değerini göstermektedir. Tüm hız değerlerinde 60 m/s^2 ivme değerinde Şekil 5.9.'da işaretlenen PMTLISM'nin izin verilen maksimum sürekli RMS akım değeri $2,48 \text{ A}$ aşılmıştır. İvme ve hız değişiminin RMS akımın değişimine etkisinin önemini belirlemek için yapılan varyans analizi sonuçları Tablo 5.4.'de verilmiştir.

Tablo 5.4. Sensör ayrı konumlu çalışmada PMTLISM RMS akım ortalama değerlerine ilişkin varyans analizi sonuçları

Varyasyon kaynağı	PMTLSM RMS akımı		
	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F oranı
İvme (A)	5	54.64	1691.60*
Hız (S)	3	0.91	47.08*
A×S	15	1.49	15.36*
Hata	48	0.31	
Toplam	71	57.35	

* $P < 0,05$ anlamlı

Tablo 5.4.'deki sonuçlardan, ivme, konveyör hızı ve bunların interaksyonu PMTLISM RMS akımını önemli miktarda değiştirmektedir ($P < 0,05$). Önemli etkinin hangi grup ortalamalarından kaynaklandığını bulmak için yapılan LSD testi sonuçları Tablo 5.5.'de verilmiştir. Tablo 5.5.'deki sonuçlara göre, her bir ivme için tüm hız değerlerinden elde edilen RMS akım değerleri ortalamalarından (ortalama I), ivme arttığında RMS akım artmış ve bu artış 5 m/s^2 ve 60 m/s^2 ivme aralığında önemli çıkmıştır ($P < 0,05$). İvme değerinin $2,5 \text{ m/s}^2$ ve 5 m/s^2 aralığında değişiminin RMS akımı artışına etkisi ise önemsiz olmuştur ($P > 0,05$). Her bir hız değeri için tüm ivme değerlerinden elde edilen CV değerleri ortalamalarından (ortalama II), hız arttığında RMS akım artmış, bu artış 1 km/h ve 2 km/h aralığında ve 3 km/h ve 4 km/h aralığında önemli çıkmış ($P < 0,05$), 2 km/h ve 3 km/h hız aralığında ise RMS akım değerindeki artış önemsiz çıkmıştır ($P > 0,05$). Her bir hız için karşılaştırma yapıldığında tüm hız değerlerinde ivmenin 5 m/s^2 'den 60 m/s^2 'e değerine kadar artışı RMS akımı önemli miktarda arttırmıştır ($P < 0,05$).

Tablo 5.5. Sensör ayrı konumlu çalışmada PMTLISM RMS akımının ortalama değerleri ve önem derecesi grupları

İvme	PMTLISM RMS akımı (Amper)				Ortalama I
	1 km/h	2 km/h	3 km/h	4 km/h	
2,5 m/s ²	0,57 ^j	0,56 ^j	0,59 ^j	0,58 ^j	0,58 ^E
5,0 m/s ²	0,65 ⁱ	0,62 ^j	0,63 ^j	0,65 ^j	0,64 ^E
10 m/s ²	0,82 ⁱ	0,82 ⁱ	0,83 ⁱ	0,85 ⁱ	0,83 ^D
20 m/s ²	1,24 ^h	1,31 ^{gh}	1,25 ^h	1,40 ^g	1,30 ^C
40 m/s ²	1,94 ^f	2,12 ^e	2,19 ^e	2,53 ^d	2,20 ^B
60 m/s ²	2,45 ^d	2,75 ^c	2,99 ^b	3,51 ^a	2,92 ^A
Ortalama II	1,28 ^C	1,36 ^B	1,41 ^B	1,59 ^A	
LSD _{0,05}	A: 0,066 S: 0,054 AxS: 0,132				

A, PMTLISM ivmesi; S, Konveyör bant hızı; Büyük harfler A ve S gruplarını, küçük harfler AxS interaksiyon gruplarını temsil etmektedir; (P < 0,05).

Her bir ivme değerine göre karşılaştırma yapıldığında 2,5 m/s², 5 m/s² ve 10 m/s² ivme değerlerinde hız artışı RMS akımı önemli miktarda değiştirmemiş (P > 0,05), 20 m/s² ivme değerinde hızın 3 km/h'den 4 km/h'e artışı RMS akımı önemli miktarda arttırmıştır (P < 0,05). PMTLISM ivmesi 40 m/s² olarak ayarlandığında hızın 2 km/h ve 3 km/h arasında değişimi RMS akımı önemli miktarda değiştirmezken (P > 0,05), diğer hız aralıklarında RMS akımındaki artış önemli olmuştur (P < 0,05). İvme 60 m/s² olduğunda ise tüm hız kademelerinde hız artışı RMS akımı önemli miktarda arttırmıştır (P < 0,05). Bu sonuçlar, küçük ivme değerlerinde hız artışı RMS akımı değiştirmedığı, büyük ivme değerlerinde ise hız artışının RMS akımı artırma etkisinin artış gösterdiği ve hızın ivme üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

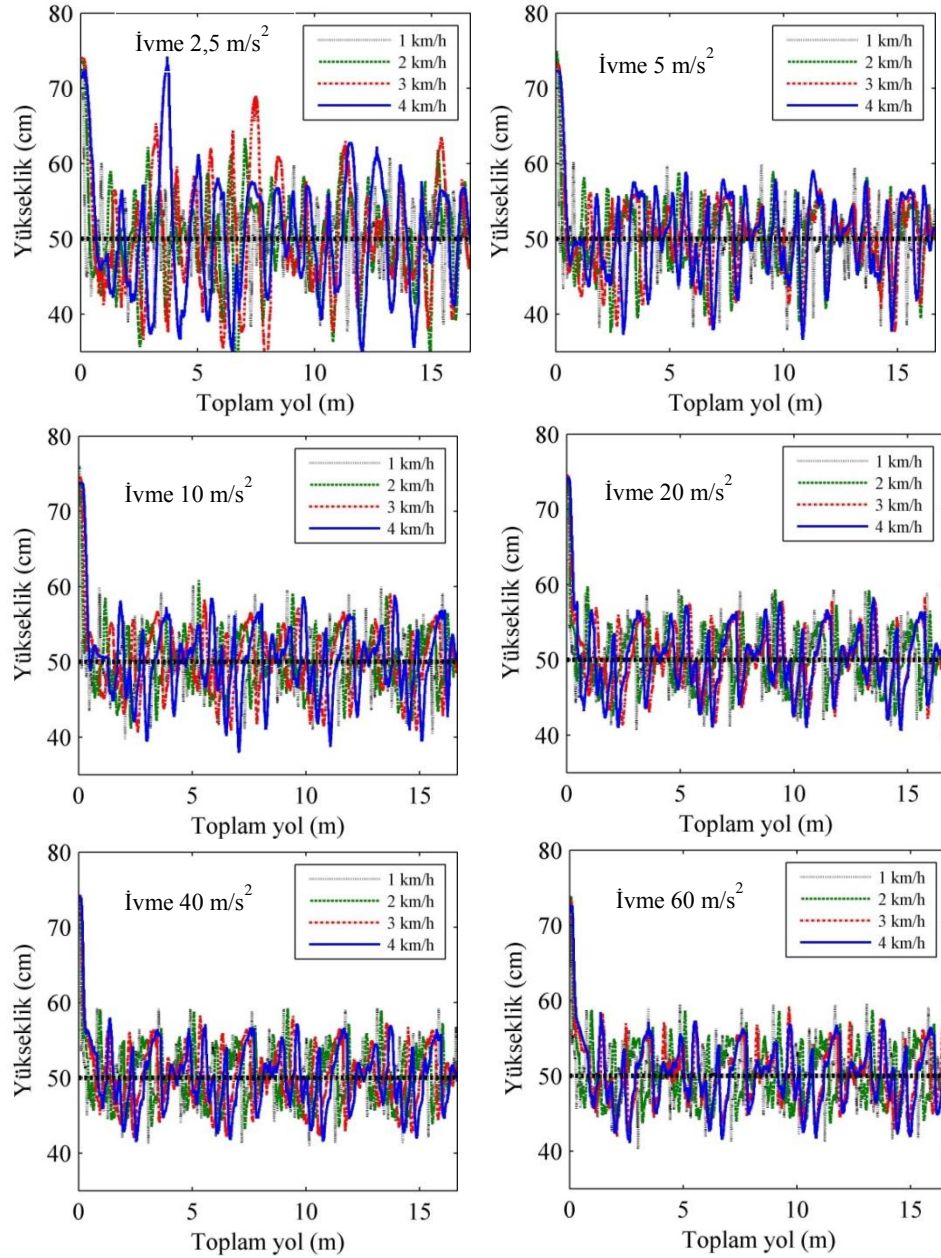
5.2.2. Sensör üst konumlu laboratuvar deneyleri

Sensör üst konumlu laboratuvar çalışmasında, püskürtücü ile hedef yapay bitkiler arasındaki mesafe değişimleri, püskürtücü yanına bağlanan ultrasonik mesafe sensörü ile ölçülerek kontrol gerçekleştirilmiştir. Püskürtücü yükseklik kontrol sistemi klasik PID kontrol ve Bulanık PID kontrol yöntemleri ile kontrol edilmiştir.

5.2.2.1. PID kontrol sonuçları

Dört hız ve altı ivme değerleri oluşan 24 farklı koşulda üç tekrarlı olarak gerçekleştirilen 72 deneyde püskürtücü yükseklik kontrol sistemine PID kontrol uygulanmıştır. PID kontrolörün oransal kazancı K_p , integral kazancı K_i ve türev

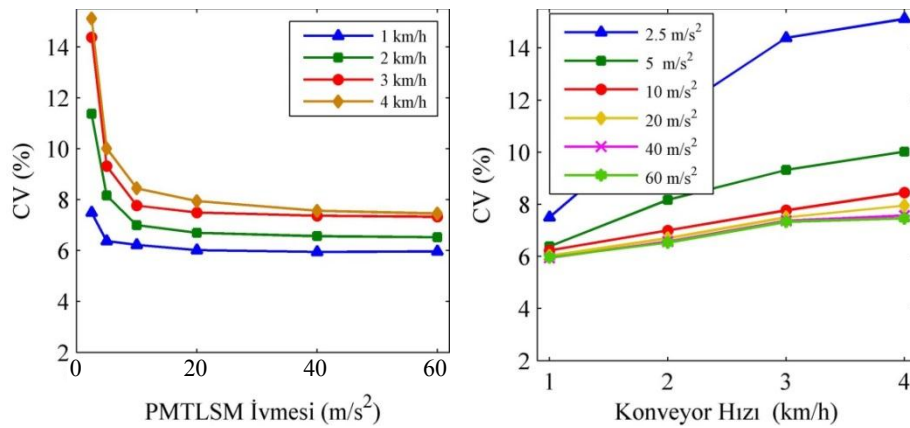
kazancı K_d sırasıyla 2,4, 4,11 ve 0,35 olarak bulunmuştur. Deneylelerden elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan grafiklerden bazıları Şekil 5.10.'da verilmiştir.



Şekil 5.10. Sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında püskürtücü yükseklik kontrolü

Grafiklerden görüldüğü gibi PID kontrolör, püskürtücü yüksekliğini ayarlanan referans değer etrafında salınım yaparak tutmaya çalışmaktadır. Tüm hızlarda en büyük salınım ivme değeri $2,5 \text{ m/s}^2$ olduğunda meydana gelmiştir. İvme değerinin artması ile birlikte, referans değer etrafındaki salınımların genlikleri giderek azalmıştır. Çalışmada her bir deneyden elde edilen veriler kullanılarak CV değerleri

hesaplanmıştır. Her bir koşul için elde edilen üç CV değerinin ortalaması kullanılarak, CV değerinin PMTLSM ivmesi ve konveyör hızına göre değişimi Şekil 5.11.'de verilmiştir. Şekilde tüm hız değerlerinde ivme artışının CV değerinin azalmasını sağladığı, CV'deki en büyük değişimin 4 km/h hız değerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca tüm ivme değerleri için en büyük CV değeri 4 km/h hız değerinde olmuştur. Hız ile CV değeri değişimi incelendiğinde ise, hız artması ile birlikte en büyük CV değeri artışı 2,5 ve 5 m/s² ivme değerlerinde olmuştur.



Şekil 5.11. Sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında PMTLSM ivmesi ve konveyör hız ile CV arasındaki ilişki

Deneylemlerden elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan CV değerleri ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olup olmadığı varyans analiz yapılarak araştırılmıştır. Yapılan analizde kullanılan veriler dört farklı hız değerinde kullanılan altı farklı ivme verilerinin gruplandırılmasıyla elde edilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Tablo 5.6.'da verilmiştir.

Tablo 5.6. Sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında CV ortalama değerlerine ilişkin varyans analizi sonuçları

Varyasyonun kaynağı	CV		
	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F oranı
İvme (A)	5	0,496	2111,69*
Hız (S)	3	0,273	1934,43*
AxS	15	0,062	88,24*
Hata	48	0,002	
Toplam	71	0,833	

* P<0,05 anlamlı

Yapılan varyans analizi sonucuna göre, PMTLISM ivmesi, konveyör hızı ve bunların interaksyonu CV değeri üzerinde %5 anlamlılık düzeyinde önemli bir etkiye sahiptir ($P<0,05$). İnteraksiyonun istatistiksel önemi çıkması, artan ivme etkisinin değişen konveyör hız değerlerine göre değiştiğini göstermektedir. CV değerleri arasındaki farkın hangi alt gruplardan kaynaklandığının bulunması için LSD testi yapılmıştır. Alt gruplar arasındaki farklılığın bulunması için yapılan LSD testi sonuçları Tablo 5.7.'de verilmiştir.

Tablo 5.7. Sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında CV ortalama değerleri ve önem derecesi grupları

İvme	CV (%)				
	1 km/h	2 km/h	3 km/h	4 km/h	Ortalama I
2,5 m/s ²	0,875 ^{ij}	1,056 ^e	1,158 ^b	1,180 ^a	1,067 ^A
5,0 m/s ²	0,805 ^{mn}	0,912 ^g	0,969 ^e	1,000 ^d	0,922 ^B
10 m/s ²	0,795 ⁿ	0,845 ^k	0,891 ^h	0,927 ^f	0,864 ^C
20 m/s ²	0,780 ^o	0,826 ^l	0,87 ^{ij}	0,900 ^h	0,845 ^D
40 m/s ²	0,775 ^o	0,818 ^l	0,868 ⁱ	0,879 ⁱ	0,835 ^E
60 m/s ²	0,776 ^o	0,815 ^{lm}	0,865 ^j	0,873 ^{ij}	0,832 ^E
Ortalama II	0,800 ^D	0,879 ^C	0,938 ^B	0,960 ^A	
LSD _{0,05}	A: 0,006	S: 0,004	AxS: 0,010		

A, PMTLISM ivmesi; S, Konveyör bant hızı; Büyük harfler A ve S gruplarını, küçük harfler AxS interaksiyon gruplarını temsil etmektedir; ($P<0,05$).

Çalışma da CV değeri, hem PMTLISM ivmesinden hem de konveyör bant hızından etkilenmiştir. Tablo 5.7.'de görülen LSD testinden, her bir ivme için tüm hız değerlerinden elde edilen CV değerleri ortalamalarından (Ortalama I), lineer motor ivmesi artırıldığında CV değerinin azaldığı görülmektedir. Ancak bu azalmanın ivme 40 m/s² değerine kadar artırıldığında istatistiksel olarak önemli olduğu ($P<0,05$), ivme 40 m/s² den 60 m/s²'ye artırıldığında ise önemsiz olduğu bulunmuştur ($P>0,05$). Konveyör bant hızına göre karşılaştırma yapıldığında ise, her bir hız değeri için tüm ivme değerlerinden elde edilen CV değerleri ortalamalarından (ortalama II), konveyör bant hızı arttığında CV değerinin arttığı ve bu artışın istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur ($P<0,05$). Bu artışın, hız artışı ile ultrasonik sensörlerin performansının azalmasından kaynaklandığı söylenebilir. Azalan ilerleme hızı ve artan PMTLISM ivmesi CV değerinde önemli azalmalar gerçekleştirmiştir. Çalışma da en küçük CV değeri 1 km/h konveyör hızı ve 40 m/s²

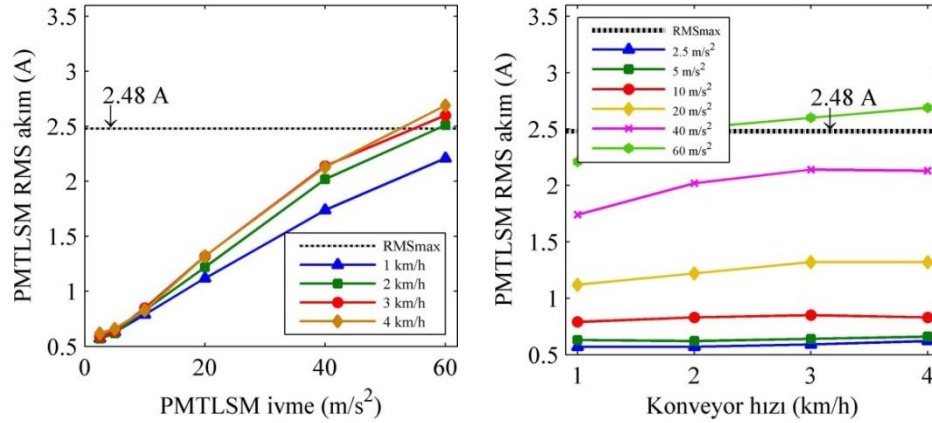
ivme değeri için, en büyük CV değeri ise 4 km/h konveyör hızı ve 2,5 m/s² ivme değeri için elde edilmiştir. CV değeri PMTLSM ivmesi açısından değerlendirildiğinde; en büyük ivme değeri 60 m/s² için en küçük CV değeri elde edilirken, en küçük ivme değeri 2,5 m/s² için en büyük CV değeri elde edilmiştir. Konveyör hızı 2 km/h, 3 km/h ve 4 km/h olduğunda, artan ivme, CV değerlerinin azalmasını sağlarken bu azalma 2 ve 3 km/h hız için 20 m/s²'den büyük ivme değerlerinde, 4 km/h hız için ise 40 m/s²'den büyük ivme değerlerinde istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur (P>0,05). 1 km/h hız değerinde ise ivme artışı 40 m/s² değerine kadar CV değerini azaltırken 40 m/s²'den sonra CV değeri artmıştır. Ancak 1 km/h hız değerinde CV değerindeki değişme ivme 5 ve 10 m/s² aralığında ve 20 m/s²'den büyük olduğunda CV değerindeki değişme önemsiz bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, artan hız ile birlikte ivmenin CV değerini azaltma etkisinin değiştiğini ve hızın ivme üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

Sensör üst konumlu laboratuvar deneylerinde, koşulun üç tekrarının ortalamasından elde edilen ortalama yükseklik değerleri minimum 49,59 cm ve maksimum 50,09 cm arasında bulunmuştur. Tablo 5.8.'de görüldüğü gibi yükseklik kontrol sistemine PID kontrol uygulandığında sensör üst konumlu çalışma için püskürtücüyü 50 cm yükseklik noktasının çok yakınında tutabilmektedir.

Tablo 5.8. Sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında ortalama yükseklik değerleri

	Ortalama yükseklik (cm)			
	1 km/h	2 km/h	3 km/h	4 km/h
2,5 m/s ²	49,97	49,72	49,71	49,59
5,0 m/s ²	50,00	49,88	49,73	49,79
10 m/s ²	50,00	49,94	49,75	49,84
20 m/s ²	50,01	49,95	49,87	49,83
40 m/s ²	50,02	49,93	49,91	49,91
60 m/s ²	50,00	49,95	49,87	49,90

Yükseklik kontrolünün PID kontrol yöntemine göre yapıldığı deneylerde PMTLSM ivmesi ve konveyör hızına göre PMTLSM RMS akımının değişimi Şekil 5.12.'de verilmiştir.



Şekil 5.12. Sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında PMTSLM ivmesi ve konveyör hızı ile PMTSLM RMS akımı arasındaki ilişki

Şekil 5.12.'de görüldüğü gibi tüm konveyör hız değerlerinde PMTSLM ivmesinin artışı, RMS akımının artmasına neden olmaktadır. 1 km/h hız değerinde artış oranı diğer hızlardan daha küçük olup, daha büyük hız değerlerinde RMS akımı artış oranı benzerlik göstermektedir. İvmeye göre, her bir ivme değeri için en küçük akım değerleri 1 km/h hız değerindedir. Hız 1 km/h değerinden büyük olduğunda 60 m/s^2 ivme için RMS akım izin verilen maksimum sürekli akım değerini aşmıştır. Konveyör hızı artışına göre RMS akımda en büyük değişim 60 m/s^2 değeri için gerçekleşmiş bunu 40 m/s^2 ivme değerindeki değişim izlemiştir.

PMTSLM ivmesi ve konveyör bant hızındaki artışın RMS akım artışına etkisinin istatistiksel olarak önemini araştırıldığı varyans analiz sonuçları Tablo 5.9.'da verilmiştir. Varyans analiz sonuçlarına göre ivme, hız ve bunların interaksiyonu RMS akımını önemli miktarda değiştirmektedir. ($P < 0,05$).

Tablo 5.9. Sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında PMTSLM RMS akım ortalama değerlerine ilişkin varyans analizi sonuçları

Varyasyonun kaynağı	PMTSLM RMS akım		
	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F oranı
İvme (A)	5	37,47	10856,31*
Hız (S)	3	0,44	210,07*
AxS	15	0,37	35,75*
Hata	48	0,03	
Toplam	71	38,31	

* $P < 0,05$ anlamlı

İvme, hız ve ikisinin interaksiyonunun oluşturduğu değişimin hangi alt gruplardan kaynaklandığının belirlenmesi için yapılan LSD testi sonuçları Tablo 5.10.'da görülmektedir.

Tablo 5.10. Sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında PMTLISM RMS akımının ortalama değerleri ve önem derecesi grupları

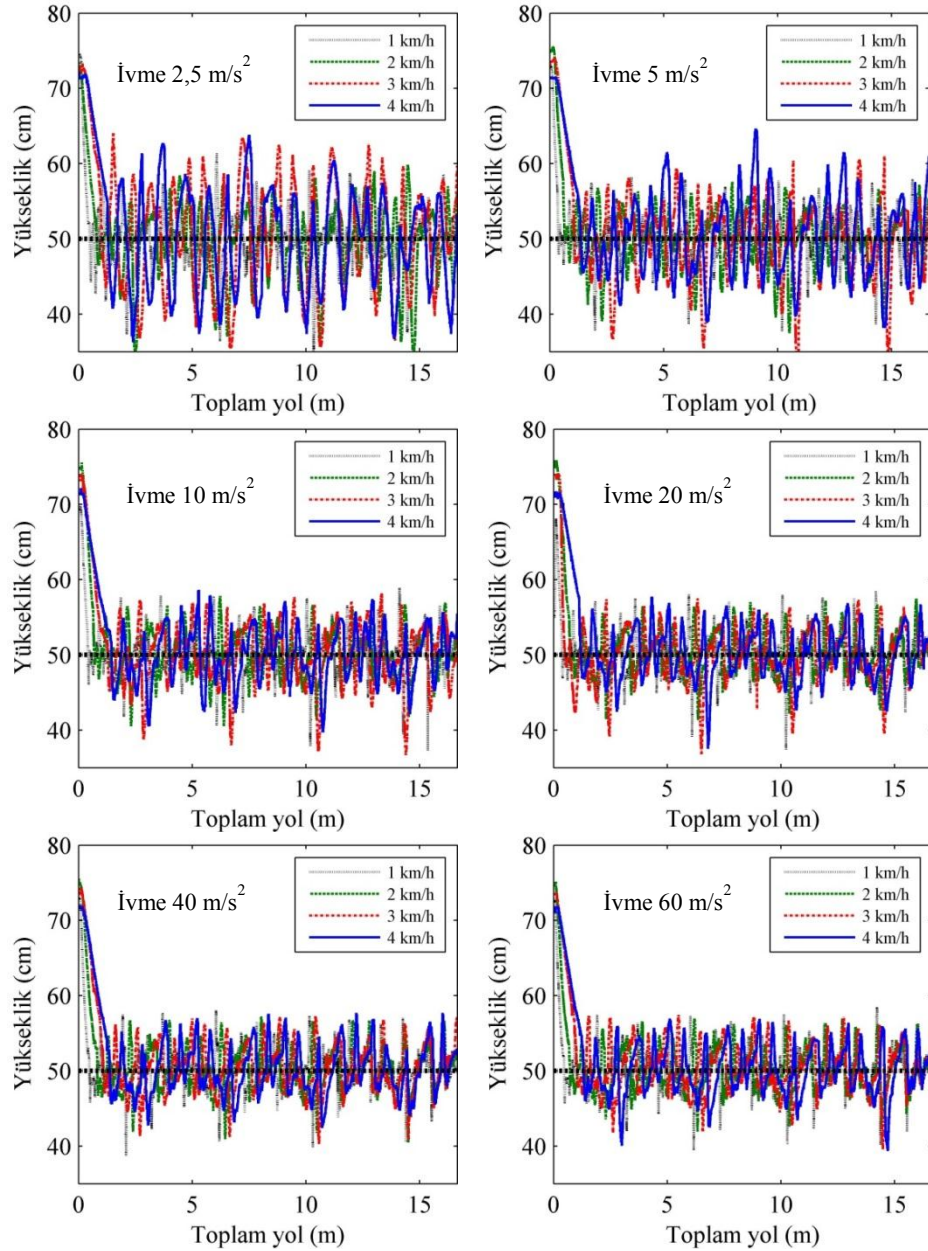
İvme	PMTLSM RMS akım (Amper)				Ortalama I
	1 km/h	2 km/h	3 km/h	4 km/h	
2.5 m/s ²	0,57 ^p	0,57 ^p	0,59 ^{op}	0,62 ^{mno}	0,59 ^F
5.0 m/s ²	0,63 ^{mno}	0,62 ^{mno}	0,64 ^{mn}	0,66 ^m	0,64 ^E
10 m/s ²	0,79 ^l	0,83 ^{kl}	0,85 ^k	0,83 ^{kl}	0,82 ^D
20 m/s ²	1,12 ^j	1,22 ⁱ	1,32 ^h	1,32 ^h	1,25 ^C
40 m/s ²	1,74 ^g	2,02 ^f	2,14 ^e	2,13 ^e	2,01 ^B
60 m/s ²	2,21 ^d	2,51 ^c	2,60 ^b	2,69 ^a	2,50 ^A
Ortalama II	1,18 ^D	1,30 ^C	1,36 ^B	1,38 ^A	
LSD _{0,05}	A: 0,022 S: 0,017 AxS: 0,043				

A, PMTLISM ivmesi; S, Konveyör bant hızı; Büyük harfler A ve S gruplarını, küçük harfler AxS interaksiyon gruplarını temsil etmektedir; (P < 0,05).

Tablo 5.10.'da ivmeye göre karşılaştırma yapıldığında, her bir ivme için tüm hız değerlerinden elde edilen RMS akımı ortalamalarından (ortalama I), ivme arttıkça RMS akımda artış olduğu ve bu artışın istatistiki olarak önemli çıkmıştır (P < 0,05). Hıza göre karşılaştırma yapıldığında ise, her bir hız için tüm ivme değerlerinden elde edilen RMS akım ortalamalarından (ortalama II) hız arttıkça RMS akımındaki artışın istatistiki olarak önemli olduğu bulunmuştur (P < 0,05). Her bir konveyör hızı için, ivmenin artırılması RMS akımı istatistiksel olarak önemli miktarda arttırmaktadır (P < 0,05). Ancak 4 km/h hız değerinde, ivmenin 2,5 m/s² ile 5 m/s² arasındaki değişimi RMS akımını önemli miktarda arttırmamıştır (P > 0,05). Her bir PMTLISM ivmesi için karşılaştırma yapıldığında, hız artırıldığında 60m/s² ivme değerinde RMS akım istatistiksel olarak önemli miktarda artarken (P < 0,05), 20 ve 40 m/s² için hızın 1 km/h ve 3 km/h arasında artışı RMS akım önemli miktarda arttırmış (P < 0,05), diğer ivme değerlerinde ise hız artışı RMS akımı değişimine etkisi önemsiz çıkmıştır (P > 0,05). Çalışma da en küçük akım değeri 2,5 m/s² ivme için 1 km/h ve 2 km/h konveyör hızlarında, en büyük akım değeri ise 60 m/s² ivme için sırasıyla 4 km/h ve 3 km/h konveyör hızlarında elde edilmiştir. Bu sonuçlar, büyük ivme değerlerinde hız artışının RMS akım değerini arttırdığını ve hızın ivme üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

5.2.2.2. Bulanık PID kontrol sonuçları

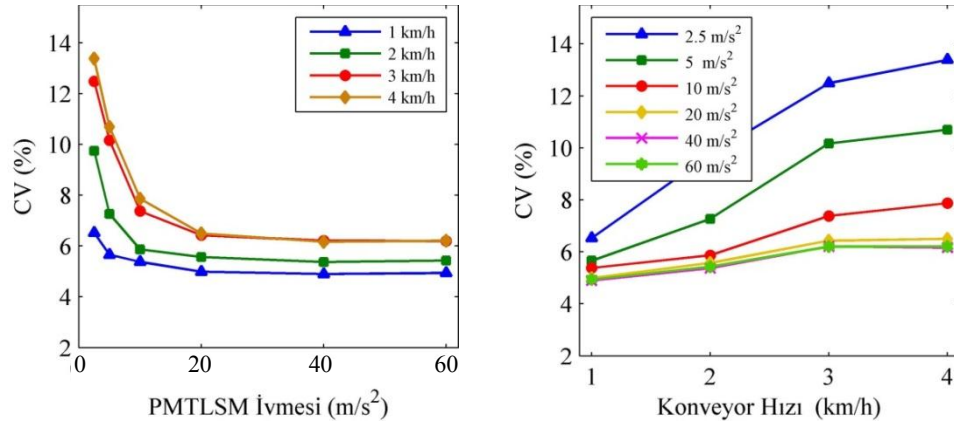
Püskürtücü yükseklik kontrol sisteminin Bulanık PID kontrolünde, bulanık kontrol için üçgen üyelik fonksiyonu kullanılarak bulanıklaştırma yapılmış ve 25 kural tanımlanmıştır. Kontrolör için giriş ölçekleme çarpanları $K_e = 0,4$, $K_{de}=0,03$, ve çıkış ölçekleme çarpanları $\alpha =3$, $\beta =20$ olarak elde edilmiştir. Bulanık PID kontrol yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle ilişkili bazı grafikler Şekil 5.13.'de verilmiştir. Grafiklere göre kullanılan kontrol yönteminin farklı PMTLSM ivme değeri ve konveyör bant hızlarına göre farklı salınım genlikleri ile püskürtücüyü ayarlanan set değeri etrafında tutmaya çalışmaktadır. Tüm hız değerlerinde, ivme $2,5 \text{ m/s}^2$ ve 5 m/s^2 olduğunda oluşan salınımın büyük genlikli olduğu ivmenin arttırılmasıyla birlikte salınım genliklerinde azalma olduğu görülmektedir.



Şekil 5.13. Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol çalışmasında püskürtücü yükseklik kontrolü

Deneilerin üç tekrarından elde edilen verilerle hesaplanan CV değerleri ortalamalarının PMTLSM ivme ve konveyör hızına göre değişimi Şekil 5.14.'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ivme 20 m/s^2 değerine kadar arttırıldığında CV değerinde belirgin bir azalma olurken, ivmenin daha fazla arttırılması CV değerinde çok fazla azalma sağlayamamıştır. Diğer taraftan konveyör hızının arttırılması ile birlikte $2,5 \text{ m/s}^2$ ivme değeri için CV değerinde büyük oranda artış meydana gelmiş, ivme 5 m/s^2 ve 10 m/s^2 olduğunda CV değerinde hıza göre artış oranı azalmaya başlamıştır. Hız artışına bağlı olarak CV değerindeki artışın en fazla $2,5 \text{ m/s}^2$ ivme

değerinde olmuş bunu 5 m/s^2 ve 10 m/s^2 ivmeler için elde edilen CV değerleri izlemiştir.



Şekil 5.14. Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol çalışmasında PMTSLM ivmesi ve konveyör hızı ile CV arasındaki ilişki

Püskürtücü yükseklik kontrol sisteminin Bulanık PID yöntemine göre kontrol edildiği deneylerde PMTSLM ivmesi ve konveyör bant hızı değiştirilmesiyle elde edilen CV değerleri ortalamaları arasındaki farkın anlamlı olup olmadığının belirlenmesi amacıyla varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizi sonuçları, Tablo 5.11.'de verilmiştir.

Tablo 5.11. Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol çalışmasında CV ortalama değerlerine ilişkin varyans analizi sonuçları

Varyasyonun kaynağı	CV		
	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F oranı
İvme (A)	5	0,63	108,26*
Hız (S)	3	0,37	104,38*
AxS	15	0,08	4,55*
Hata	48	0,06	
Toplam	71	1,13	

* $P < 0,05$ anlamlı

Tablo görüldüğü gibi ivme, hız ve ikisinin interaksyonu CV değeri üzerinde istatistiksel olarak önemli bir etkiye sahiptir ($P < 0,05$). CV değerleri arasındaki farkın kaynaklandığı alt grupları belirlemek için verilere uygulanan LSD testi sonuçları Tablo 5.12.'de verilmiştir.

Tablo 5.12. Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol çalışmasında CV ortalama değerleri ve önem derecesi grupları

İvme	CV (%)				
	1 km/h	2 km/h	3 km/h	4 km/h	Ortalama I
2,5 m/s ²	0,814 ^{d-f}	0,989 ^b	1,090 ^a	1,114 ^a	1,002 ^A
5,0 m/s ²	0,753 ^{g-k}	0,862 ^{c-e}	1,008 ^b	1,029 ^b	0,913 ^B
10 m/s ²	0,731 ^{j-l}	0,769 ^{f-j}	0,868 ^{cd}	0,896 ^c	0,816 ^C
20 m/s ²	0,698 ^{kl}	0,746 ^{h-l}	0,808 ^{e-g}	0,813 ^{d-f}	0,766 ^D
40 m/s ²	0,690 ^l	0,730 ^{j-l}	0,793 ^{f-h}	0,79 ^{f-i}	0,751 ^D
60 m/s ²	0,694 ^l	0,735 ^{i-l}	0,792 ^{f-h}	0,793 ^{f-h}	0,753 ^D
Ortalama II	0,730 ^C	0,805 ^B	0,893 ^A	0,906 ^A	
LSD _{0,05}	A: 0,022	S: 0,028	AxS: 0,056		

A, PMTLISM ivmesi; S, Konveyör bant hızı; Büyük harfler A ve S gruplarını, küçük harfler AxS interaksiyon gruplarını temsil etmektedir; (P <0,05).

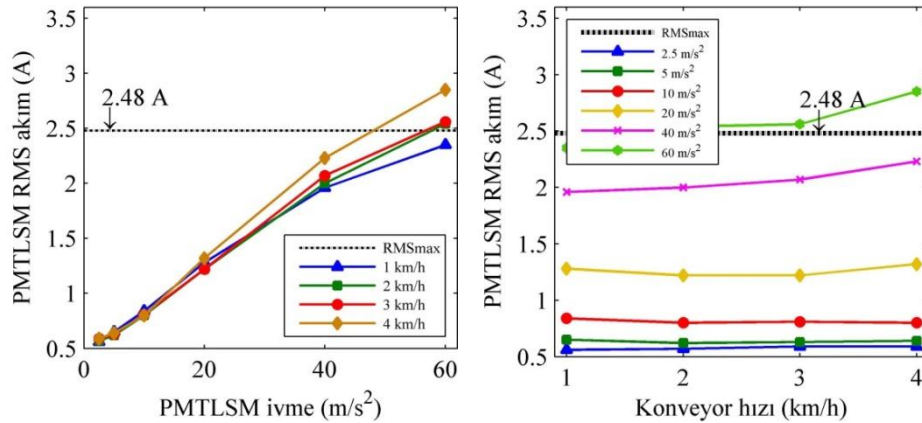
Tablo 5.12.'de verilen LSD testi sonuçlarına göre, CV değeri hem PMTLISM ivmesinden hem de konveyör bant hızından etkilenmiştir. Her bir ivme için tüm hız değerlerinde elde edilen CV değerleri ortalamalarından (ortalama I), ivme 40 m/s² değerine kadar arttırıldığında CV değeri azalmış, 40 m/s² ivme değerinden sonra CV bir miktar artış göstermiştir. Ancak, CV değerindeki azalma 20 m/s² ivme artışına kadar istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (P<0,05). İvmenin 20-60 m/s² arasındaki artışının sebep olduğu CV değeri değişimi ise önemsiz çıkmıştır (P>0,05). Konveyör bant ilerleme hızına göre karşılaştırma yapıldığında ise, her bir hız değeri için tüm ivme değerlerinden elde edilen CV değerleri ortalamalarından (ortalama II), konveyör bant hızının 1 ve 3 km/h aralığında artışı CV değerini önemli miktarda arttırmıştır (P<0,05). Ancak hız 3 km/h'den 4 km/h değerine arttırıldığında ise, CV değerinde önemli bir artış olmamıştır (P>0,05). Azalan ilerleme hızı ve artan PMTLISM ivmesi CV değerinde önemli azalmalar gerçekleştirmiştir. Çalışma da en küçük CV değeri 1 km/h hız ve 40 m/s² ivme değeri için, en büyük CV değeri ise 4 km/h konveyör hızı ve 2,5 m/s² ivme değeri için elde edilmiştir. CV değeri PMTLISM ivmesi açısından değerlendirildiğinde; 40 m/s² ivme için en küçük CV değeri elde edilirken, en küçük ivme değeri 2,5 m/s² için en büyük CV değeri elde edilmiştir. Her bir hız değeri için inceleme yapıldığında, 3 km/h ve 4 km/h hız değerlerinde ivmenin 20 m/s² değerine kadar arttırılması CV değerinin istatistiksel olarak önemli miktarda azalmasını sağlarken (P<0,05), 20 m/s² den daha büyük ivme değerleri için CV değerindeki değişim önemsiz bulunmuştur (P>0,05). Diğer taraftan 2 km/h hız için ivmenin 10 m/s² değerine kadar arttırılması, 1 km/h hız değerinde ise ivmenin 5 m/s² değerine kadar arttırılması CV'yi istatistiksel olarak önemli miktarda azaltmış (P<0,05), her iki hız için ivmenin belirtilen bu değerlerinden sonraki artışlar

CV değerini önemli miktarda değiştirmemiştir ($P>0,05$). Burada, artan hız değerlerinde ivmenin etkisinin arttığı görülmektedir. Bu sonuçlara göre hızın artması ivmenin etkisini arttırmıştır. Yani yüksek hız değerlerinde, artan PMLTSM ivmesi CV değerlerini düşük hızlara göre daha büyük oranda azaltmıştır. Sensör üst konumlu bulanık PID kontrol çalışması laboratuvar deneylerinde, koşulun üç tekrarının ortalamasından elde edilen ortalama yükseklik değerleri Tablo 5.13.'de görüldüğü gibi minimum 49,57 cm ve maksimum 50,04 cm arasında bulunmuştur.

Tablo 5.13. Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol çalışmasında ortalama yükseklik değerleri

	Ortalama yükseklik (cm)			
	1 km/h	2 km/h	3 km/h	4 km/h
2,5 m/s ²	50,02	49,97	49,85	49,57
5,0 m/s ²	50,03	50,00	49,86	49,74
10 m/s ²	50,02	50,03	49,90	49,89
20 m/s ²	50,03	50,01	49,94	49,88
40 m/s ²	50,03	50,01	49,95	49,91
60 m/s ²	50,04	50,00	49,99	49,89

Püskürtücü yükseklik kontrol sisteminin Bulanık PID kontrol yöntemine göre kontrol edildiği deneylerde PMTLMS RMS akımının, PMTLMS ivmesi ve konveyör bant hızına göre değişimi Şekil 5.15.'de verilmiştir.



Şekil 5.15. Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol çalışmasında PMTLMS ivmesi ve konveyör hızı ile PMTLMS RMS akımı arasındaki ilişki

Şekil 5.15.'e göre tüm konveyör hız değerlerinde PMTLMS ivmesinin artışı, RMS akımının artmasına neden olmuştur. İvmeye göre, 20 m/s² ve üzerindeki ivme değerlerinde her bir ivme değeri için en büyük akım değeri 4 km/h hız değerinde olduğu görülmektedir. Hız 1 km/h değerinden büyük olduğunda 60 m/s² ivme için

RMS akım izin verilen sürekli akım değerini aşmıştır. Konveyör hızı RMS akım ilişkisine bakıldığında, RMS akımda en büyük değişim 60 m/s^2 değerinde gerçekleşmiş bunu 40 m/s^2 ve 40 m/s^2 ivme değerinde elde edilen CV değerleri izlemiştir. Bulanık PID kontrol çalışmasında, PMTLISM ivmesi ve konveyör bant hızındaki artışın RMS akım değişimi üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak öneminin belirlemek için varyans analizi yapılmış ve sonuçları Tablo 5.14.'de verilmiştir.

Tablo 5.14. Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol çalışmasında PMTLISM RMS akım ortalama değerlerine ilişkin varyans analizi sonuçları

Varyasyon kaynağı	PMTLISM RMS akım		
	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F oranı
İvme (A)	5	41,01	2264,95*
Hız (S)	3	0,19	17,05*
AxS	15	0,36	6,54*
Hata	48	0,17	
Toplam	71	41,72	

* $P < 0,05$ anlamlı

Bu tablo lineer motor ivmesi, konveyör hızı ve bunların interaksiyonun RMS akım değişimi üzerinde istatistik olarak önemli etkiye sahip olduklarını göstermektedir ($P < 0,05$). Bu önemli etkinin hangi alt gruplardan kaynaklandığını belirlemek için yapılan LSD çoklu karşılaştırma testi sonuçları Tablo 5.15.'de verilmiştir.

Tablo 5.15. Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol çalışmasında PMTLISM RMS akım ortalama değerleri ve önem derecesi grupları

İvme	PMTLISM RMS akım (A)				Ortalama I
	1 km/h	2 km/h	3 km/h	4 km/h	
$2,5 \text{ m/s}^2$	0,56 ⁱ	0,57 ^j	0,59 ^j	0,59 ^j	0.58 ^F
$5,0 \text{ m/s}^2$	0,65 ⁱ	0,62 ^j	0,63 ^j	0,64 ^j	0.63 ^E
10 m/s^2	0,84 ⁱ	0,80 ^j	0,81 ⁱ	0,80 ^j	0.81 ^D
20 m/s^2	1,28 ^{gh}	1,22 ^h	1,22 ^h	1,32 ^g	1.26 ^C
40 m/s^2	1,96 ^f	2,00 ^{ef}	2,07 ^e	2,23 ^d	2.07 ^B
60 m/s^2	2,35 ^e	2,54 ^b	2,56 ^b	2,85 ^a	2.58 ^A
Ortalama II	1.28 ^B	1.29 ^B	1.31 ^B	1.41 ^A	
LSD _{0,05}	A: 0,049 S: 0,04 AxS: 0,098				

A, PMTLISM ivmesi; S, Konveyör bant hızı; Büyük harfler A ve S gruplarını, küçük harfler AxS interaksiyon gruplarını temsil etmektedir; ($P < 0,05$).

Tablo 5.15.'de ivmeye göre karşılaştırma yapıldığında ise, her bir ivme değeri için, tüm hız değerlerinden elde edilen RMS akımı ortalamalarından (ortalama I), ivme 5 m/s^2 ve 60 m/s^2 aralığında kademeli olarak arttırıldığında, RMS akımı istatistiksel olarak önemli miktarda arttırmıştır ($P < 0,05$). Hıza göre karşılaştırma yapıldığında,

tüm ivme değerlerinden elde edilen RMS akım ortalamalarından (ortalama II), hız arttıkça RMS akımın arttığı ancak bu artışın sadece 3 km/h ve 4 km/h hız aralığında önemli olduğu görülmektedir ($P < 0,05$). Hızın 1 km/h ve 3 km/h aralığında artışı RMS akımı önemli miktarda değiştirmemiştir ($P > 0,05$). Her bir konveyör hızı için ivme artışının etkisine bakıldığında, ayrı ayrı tüm hız değerlerinde ivmenin artışı RMS akımı arttırmakta, ancak RMS akımındaki artış ivme 5 m/s^2 ve 60 m/s^2 aralığında olduğunda önemli çıkmıştır ($P < 0,05$). Çalışma da en küçük akım değeri $2,5 \text{ m/s}^2$ ivme için sırasıyla 1 km/h ve 2 km/h konveyör hızlarında, en büyük akım değeri ise 60 m/s^2 ivme için sırasıyla 4 km/h ve 3 km/h konveyör hızlarında elde edilmiştir.

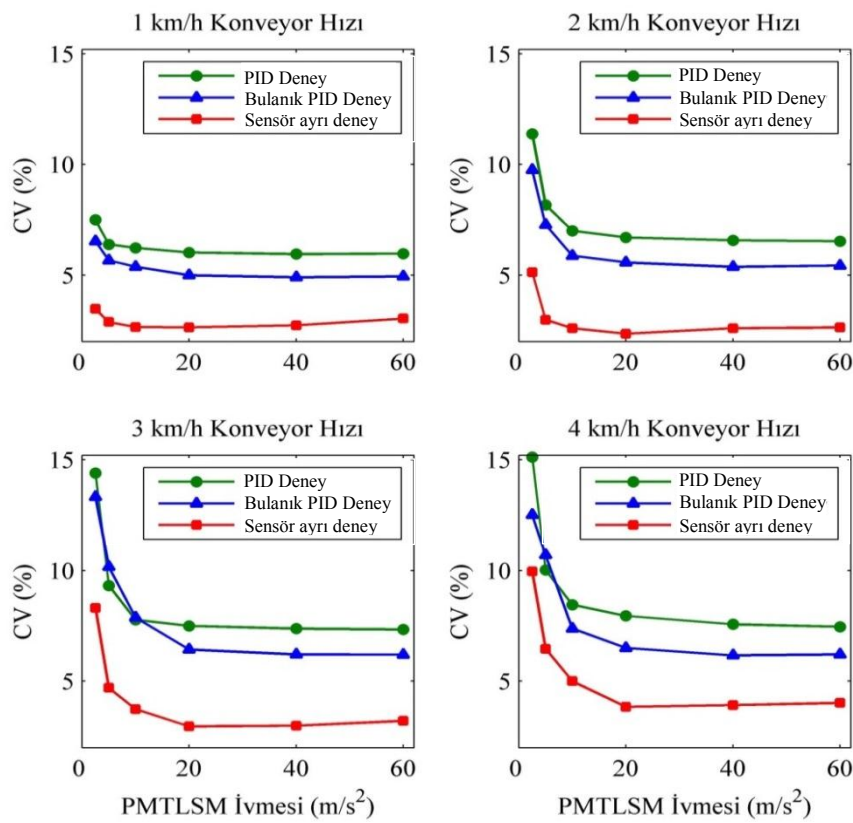
5.2.3. Laboratuvar deneylerinden elde edilen bulguların karşılaştırılması

Laboratuvar deneyleri üç tekrarlı olarak dört farklı konveyör hızı ve altı farklı PMTLSM ivmesi kullanılarak sensör ayrı konumlu çalışma, sensör üst konumlu PID kontrol ve Bulanık PID kontrol püskürtücü yükseklik kontrolü için gerçekleştirilmiştir.

Laboratuvar deneylerinden sensör ayrı konumlu çalışma, sensör üst konumlu PID kontrol ve Bulanık PID kontrol çalışmalarından elde edilen bulgulara göre her üç kontrol yönteminde de PMTLSM ivmesi ve konveyör hızı değişiminin ve bunların interaksiyonunun CV ve RMS akım üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. İnteraksiyonun etkisinin önemli çıkması, artan ivmenin etkisinin farklı konveyör hız değerlerine göre değiştiğini göstermektedir. Deneylerde, PMTLSM ivmesi ile CV değeri arasında eğrisel bir ilişki bulunmuştur. Bu ilişki belirli bir değere kadar ivme artışının CV değerinin çok miktarda azalmasını sağlarken, bu değerden sonra ivmenin CV değerini azaltma etkisinin düştüğünü göstermektedir. Bu durumun yüksek ivme değerlerinde motorda artan titreşimlerin tüm sistemi etkilemesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Konveyör bant hızı artışının ise her üç yöntemde küçük ivme değerlerinde daha fazla olmak üzere CV değerinin artmasına neden olduğu diğer bir ifade ile referans değer etrafında sapma miktarını arttırdığı bu artışın yüksek hızlarda daha belirgin olduğu görülmüştür. Hız artışı ile

birlikte PMTLISM ivmesinin CV değeri üzerindeki azaltma etkisinde düşme meydana gelmiştir. Bunun nedeninin ultrasonik mesafe sensörünün artan konveyör bant hızlarından olumsuz etkilenerek hatalı ölçme yapmasından kaynaklandığı söylenebilir (İida ve Bursk 2002; Zaman ve ark., 2007; Koç ve Keskin 2011).

Püskürtücü yükseklik kontrol sisteminin, sensör ayrı konumlu çalışmada bir, sensör üst konum çalışmada iki, toplamda üç farklı kontrol yöntemi için gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinden elde edilen CV değerleri karşılaştırılması Şekil 5.16.'da verilmiştir.



Şekil 5.16. Laboratuvar deneylerinde uygulanan üç farklı kontrol yöntemi için, PMTLISM ivmesi ve CV arasındaki ilişki

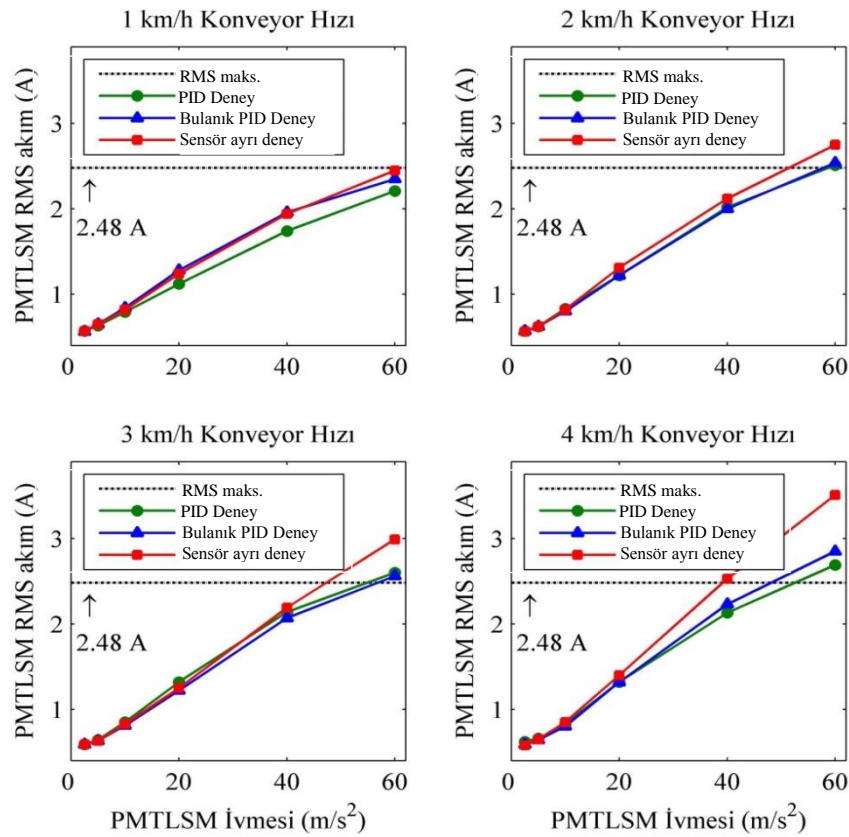
Her bir yöntem için 24 farklı koşulda üç tekrarlı deneylerden elde edilen CV değerleri ortalamaları karşılaştırılmıştır. Tüm hızlarda, her bir ivme değeri için en küçük CV değeri sensör ayrı konumlu çalışma yönteminde elde edildiği belirgin bir şekilde görülmektedir. Bunu bulanık PID kontrol yönteminden elde edilen CV

değerleri izlemiştir. En büyük CV değerleri ise PID kontrol yönteminden elde edilmiştir. Laboratuvar deneylerinde yapay bitkilerle oluşturulan bitki profili üzerine yükseklik kontrolü uygulanmadığında, CV değeri %10,79 olarak bulunmuştur. Sisteme yükseklik kontrolü uygulandığında en küçük CV değeri sensör ayrı konumlu çalışmada 2 km/h konveyör hızı ve 20 m/s² PMTLSM ivmesi için %2,35 olarak elde edilmiştir. Bu, 2 km/h hız için yükseklik kontrolü uygulandığında CV değerinde %78,22 oranında azalma olduğu anlamına gelmektedir. Konveyör hızı 4 km/h olduğunda ise 20 m/s² ivme için CV değerinde %64,41 azalma olmuştur. Sensör üst konumlu çalışmada ise PID kontrol uygulandığında 4 km/h hız ve 20 m/s² ivme için CV değerinde %26,32 azalma olurken, Bulanık PID kontrol uygulandığında ise %39,76 azalma elde edilmiştir. Üç kontrol yöntemi karşılaştırıldığında tüm koşullarda en küçük CV değeri sensör ayrı konumlu çalışma da elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sensör ayrı konumlu çalışmada tüm hız değerlerinde en uygun ivme değeri 20 m/s² bulunmuştur.

Laboratuvar deneylerinde 4 km/h en yüksek ilerleme hızında, PMTLSM ivmesi 20 m/s² iken referans değerinin \pm %5 (47,5-42,5 cm) aralığında püskürtücünün kalıcılığı, sensör ayrı konumlu çalışmada %81,07 olarak hesaplanırken, sensör üst konumlu PID kontrol çalışmasında %45,44, sensör üst konumlu bulanık PID kontrol çalışmasında ise %55,27 bulunmuştur.

RMS akım motor sargılarının ısınması ve enerji tüketimi açısından önemli bir kriter olduğundan üç kontrol yöntemi için PMTLSM ivmesi ve konveyör hızı değişiminin PMTLSM RMS akımına etkisi araştırılmıştır. Üç yöntem için gerçekleştirilen deneylerden elde edilen bulgulara göre PMTLSM ivmesi ve konveyör hızı artışının PMTLSM RMS akımını attırmıştır. Üç yöntem içinde, her bir hız değeri için elde edilen RMS akım değerlerinin karşılaştırması grafikleri Şekil 5.17.'de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi tüm hız değerleri için ivme artışı (Kremer ve ark. 2007) belirtildiği şekilde motor RMS akımının artmasına neden olmuştur. İvme artışı ile yamuk şeklindeki hareket profilinde motor maksimum hız değerine daha kısa sürede ulaşmakta, tepki süresi azalmakta ve motor hedef pozisyona daha kısa sürede gitmektedir. Hedef bitkilerin yüksekliği çok hızlı değiştiğinden, bu değişimi takip

etmek isteyen motor fazla akım çekmektedir. Hız artışı ile birlikte de RMS akımda artış meydana gelmiş, özellikle 4 km/h hız değerine geçiş, akımın önemli miktarda artmasına neden olmuştur.



Şekil 5.17. Laboratuvar deneylerinde uygulanan üç farklı kontrol yöntemi için, PMTSLM ivmesi ve PMTSLM RMS akımı arasındaki ilişki

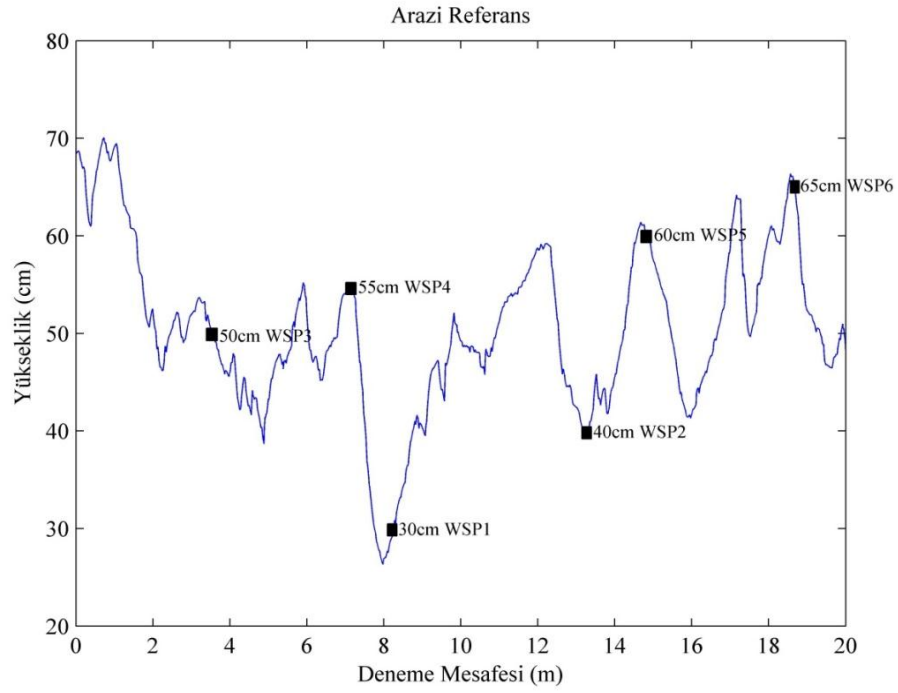
Akım değerlerine göre sensör ayrı konumlu çalışmada RMS akımı, artan hız ile birlikte diğer iki yönteme göre daha fazla artmıştır. Üç kontrol yönteminde de sistemin, 2, 3 ve 4 km/h hız değerinde, 60 m/s² ivme değeri için izin verilen 2,48 A maksimum sürekli akım değerini aştığı görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan PMTSLM'un maksimum izin verilen anlık akımı değeri 11 A'dır ancak maksimum sürekli akım değeri 2,48 A'dır. Motor sargılarında bakır kayıplarının neden olduğu ısınma motor akımının karesi ile orantılı olduğundan (Wang et al 2012, Gieras ve ark., 2012), limit değerden sonra RMS akım artışı motor sargılarının aşırı ısınmasına, aşırı ısınma ise, sargıların izolasyonunun bozulmasına, kullanım ömrünün azalmasına (Badran ve ark., 2012) ve rotordaki sabit mıknatıslarda

demanyetizasyona (Xing ve ark., 2010) neden olabileceğinden ivme değerinin arttırılmasında RMS akım sınırlayıcı bir faktör olmuştur. Çalışmada kullanılan PMTLSM'nin aşırı ısınmasını önlemek için ivme değerinin 60 m/s^2 den küçük seçilmesi gerektiği belirlenmiştir.

Laboratuvar denemelerinde üç kontrol yöntemi için elde edilen istatistiksel analiz sonuçlarına göre, geliştirilen püskürtücü yükseklik kontrol sisteminde PMTLSM ivmesi ve konveyör bant hızı, CV ve RMS akım değerlerini etkileyen önemli değişkenler olarak bulunmuştur.

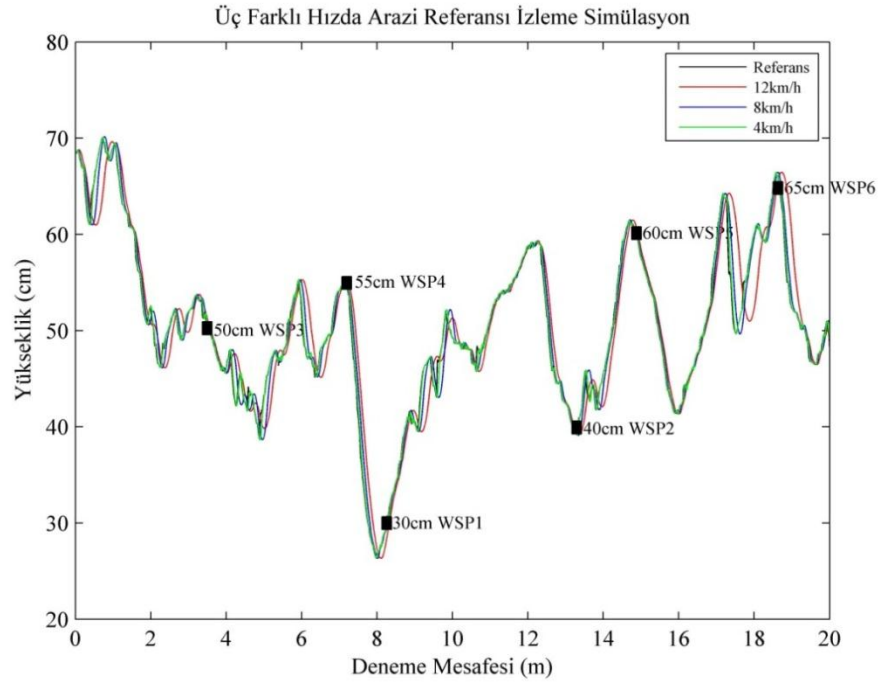
5.3. Arazi Deneyleri Bulguları

Laboratuvar ortamında geliştirilen yükseklik kontrol sistemi, arazi deneyleri için bir traktöre adapte edilmiştir. arazi şartlarında, yükseklik kontrol performans deneyleri ve aktif püskürtücü ile sıvı püskürtme deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar deneylerinde elde edilen verilerin analizi sonucunda, minimum RMS akımla en küçük CV değeri sensör ayrı konumlu çalışmada 20 m/s^2 için elde edildiğinden, arazi deneylerinde sensör ayrı konumlu çalışma ve PMTLSM ivmesi de 20 m/s^2 olarak ayarlanmıştır. Arazi deneylerinde de sensör ayrı konumlu çalışma durumuna göre ultrasonik sensör püskürtücüden 50 cm önde konumlandırılmış ve referans yükseklik olarak 50 cm değeri seçilmiştir. Arazi deneyleri, farklı boydaki gerçek bitkilerin bulunduğu ortamda, 20m deney mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Deney mesafesinde sabit ultrasonik mesafe sensörü ile püskürtücü ve gerçek bitkiler arasındaki mesafe ölçülerek Şekil 5.18.'deki bitki profili elde edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ayrıca farklı mesafelerdeki bitkiler üzerine suya duyarlı kağıtlar tutturulmuştur. Suyu duyarlı kağıtlar, yapay hedef olarak kullanılmış ve püskürtme örnekleri alınmıştır.



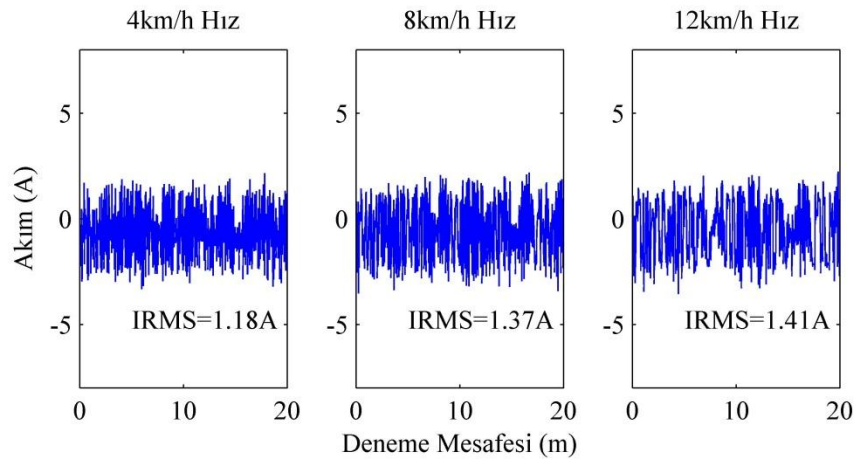
Şekil 5.18. Arazi deneyleri referans bitki profili

Arazi çalışmalarını gerçekleştirmeden önce yükseklik kontrol sisteminin simülasyon modeli kullanılarak, farklı hız değerlerinde arazi bitki profilini simülasyon modelinin izleme performansı test edilmiş ve sonuçlar Şekil 5.19.'da verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi bitki profili tüm hız değerlerinde simülasyon modelinde motor rotoru tarafından takip edilmektedir. Ancak grafikte kırmızı renkte gösterilen 12 km/h ilerleme hızı için izleme hatasının daha fazla olduğu grafiğin bazı bölgelerinde (16-20m arası gibi) daha belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 5.19. Simülasyonun modelinin üç farklı hız değeri için, arazi bitki profilini izleme performansı

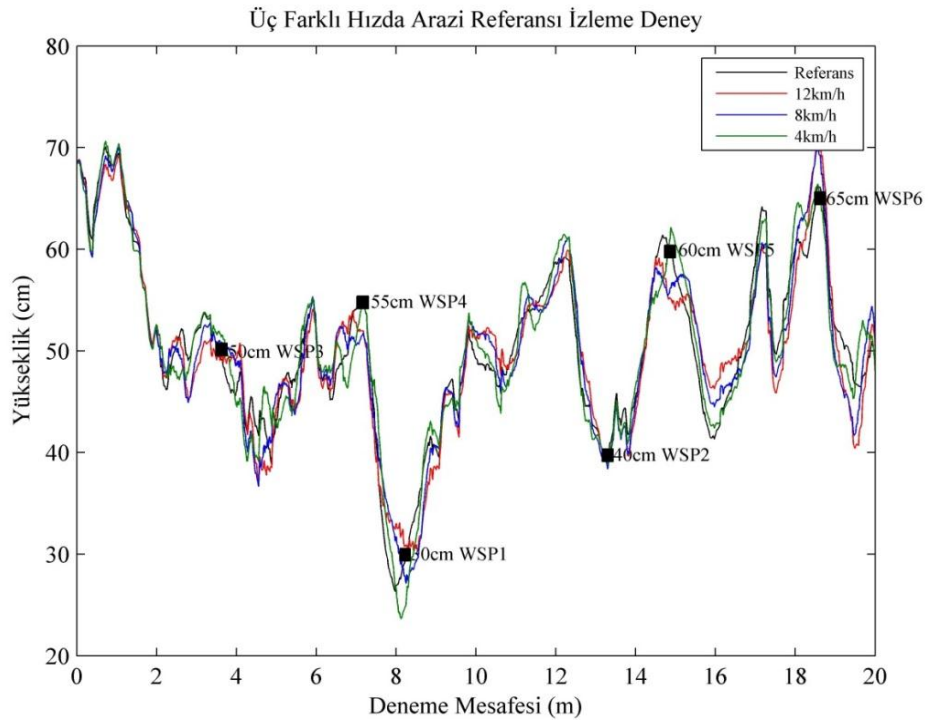
Simülasyon çalışmasında, modelinin referans bitki profilini takip performansı verileri ile birlikte her hız değeri için akım verileri de alınmış RMS akım değerleri hesaplanmıştır. Üç hız değeri için simülasyon çalışmasından elde edilen anlık akım değerlerinde oluşturulan grafikler ve akımın RMS değerleri Şekil 5.20.'de görülmektedir.



Şekil 5.20. Arazi bitki profili için üç farklı hız değerinde simülasyon modeli PMTLSM RMS akımları

Traktörün 4, 8 ve 12 km/h hızları için RMS akım sırasıyla 1,18, 1,37 ve 1,41 olarak hesaplanmıştır. İlerleme hızı artışının, PMTLSM RMS akımında artışa neden olduğu ancak akım değerlerindeki bu artışa rağmen elde edilen akım değerlerinin izin verilen maksimum sürekli akım değeri olan 2,48 A'den küçük olduğu görülmektedir.

Arazi deneylerinde, 20 m deney mesafesinde, üç farklı hız değerinde (4, 8, 12 km/h), deney düzeneği motor rotor ucunda bulunan püskürtücünün referans bitki profilini izleme performansı Şekil 5.21.'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.21. Simülasyonun modelinin üç farklı hız değeri için arazi bitki profilini izleme performansı

Arazi deneylerinden elde edilen püskürtücünün ortalama yükseklik ve CV değerleri Tablo 5.16.'da görülmektedir.

Tablo 5.16. Arazi deneylerinde farklı ilerleme hızları için püskürtücü yüksekliğinin ortalama ve CV değerleri

Yükseklik kontrolü	İlerleme hızı(km/h)	Ortalama yükseklik (cm)	CV(%)
Var	4	49,77	4,09
	8	49,94	4,98
	12	50,70	5,17
Yok	--	50,33	16,77

Tablo 5.16.'da görüldüğü gibi, püskürtücü sabitken (yüksek kontrolü olmaksızın) CV değeri %16,77 hesaplanmıştır. Yükseklik kontrolü uygulandığında ise CV değeri, 4, 8, 12 km/h sürüş hızları için sırasıyla %4,09, %4,98 ve %5,17 olarak elde edilmiştir. Seçilen bitki profiline göre 4, 8 ve 12 km/h hızlarda CV değerindeki azalma oranı sırasıyla %75,61, %70,30 ve %69,17 olarak bulunmuştur. CV değerindeki en fazla azalma 4 km/h hız değeri için elde edilmiştir. Ayrıca 4, 8 ve 12 km/h traktör ilerleme hızlarında 50 cm referans yüksekliğinin \pm %5 (47,5-52,5 cm) aralığında püskürtücü yüksekliğinin kalıcılığı sırasıyla %76,88, %63,35 ve %60,27 olarak bulunmuştur.

Herbst ve ark. (2015), sabit bir deney düzeneği ile gerçekleştirdikleri bum yükseklik kontrol çalışmasında 50 cm referans yükseklik için ortalama CV değerini %20,9 ve %25,8 bulmuşlardır. Herbst ve ark. (2018), deney düzeneği üzerinde ürettikleri düşük frekanslı sinyal ve farklı engebe yapılarındaki arazi referans sinyallerini kullanarak gerçekleştirdikleri yükseklik kontrolü deneylerinde elde ettikleri en iyi standart sapma değerleri 36 ve 43 mm (50 cm referans yükseklik için CV değerleri %7,2 ve %8,6) olarak bulmuşlardır. Sartori ve ark. (2002), 100 cm referans yüksekliğinin \pm %20 (80-120 cm) aralığında bum yüksekliğinin kalıcılığını otomatik kontrol için %47,4 bulmuşlardır. Verilen çalışma sonuçları ile karşılaştırıldığında sabit mknatsız tüp tipi lineer senkron motor ile gerçekleştirilen püskürtücü yükseklik kontrol sisteminin referansı daha iyi takip edebildiği ve sistemi ayarlanan referans değerde tutabildiği görülmektedir.

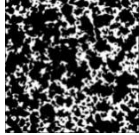
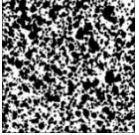
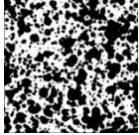
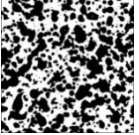
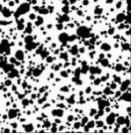
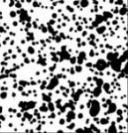
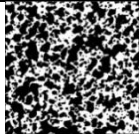
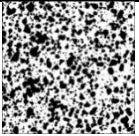
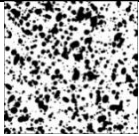
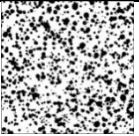
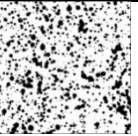
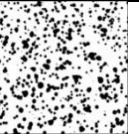
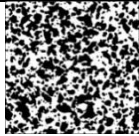
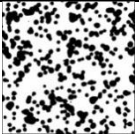
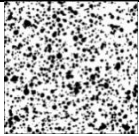
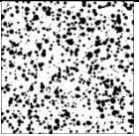
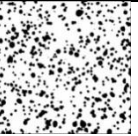
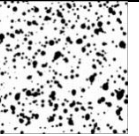
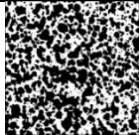
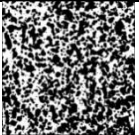
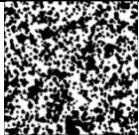
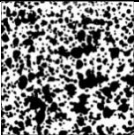
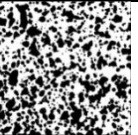
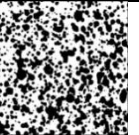
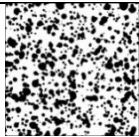
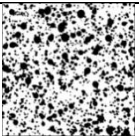
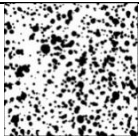
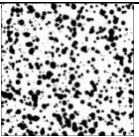
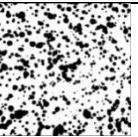
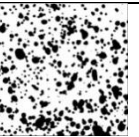
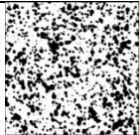
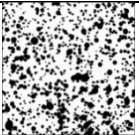
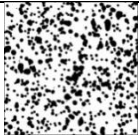
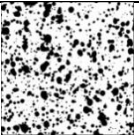
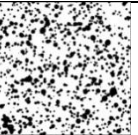
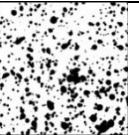
Traktör ilerleme hızı artışının CV değerinin artmasına neden olduğu görülmektedir. Bu artış hız arttığında püskürtücü pozisyonunun ayarlanan 50 cm yükseklik değerinden daha çok saptığı anlamına gelmektedir. Hız artışıyla birlikte CV değerindeki artışın nedeni şu şekilde açıklanabilir; ilerleme hızındaki artış, deney düzeneği titreşiminin artmasına neden olmakta (Langenakens ve arkadaşları 1999;

Pontelli ve Mucheroni, 2012) ve ultrasonik sensörün ölçme doğruluğunu azaltmaktadır (Iida ve Bursk, 2002; Zaman ve ark., 2007; Koç ve Keskin, 2011).

Arazi deneylerinde 4, 8, 12 km/h ilerleme hızlarında aktif püskürtücü kullanılarak yapılan çalışmada püskürtücü yükseklik kontrol sisteminin, ıslak alan yüzdesi (kaplama oranı) ve ilerleme yönündeki dağılım düzgünlüğüne katkısı araştırılmıştır. Bu amaçla her bir ilerleme hızı için yükseklik kontrolü uygulanmadan ve yükseklik kontrolü uygulanarak püskürtme testleri yapılmıştır. Püskürtme verilerini almak için kullanılan altı adet suya duyarlı kağıt (WSP) örnekleri Şekil 5.21.'de görüldüğü gibi konumlandırılmıştır. Her bir hız için gerçekleştirilen püskürtme işleminden sonra alınan WSP kart örneklerinde görüntü işleme tekniği kullanılarak ıslak alan yüzdeleri belirlenmiştir. Islak alan yüzdeleri kullanılarak ilerleme yönündeki dağılım düzgünlüğü hesaplanmıştır.

Üç farklı ilerleme hızı için arazi deneylerinden elde edilen WSP kart örnekleri, her bir kart için ıslak alan yüzdesi, ortalama ıslak alan yüzdesi ve her bir deneme için dağılım düzgünlüğü değerleri Tablo 5.17.'de verilmiştir.

Tablo 5.17. Arazi deneylerinde ıslak alan yüzdesi ortalaması ve farklı ilerleme hızları için dağılım düzensizliği

		Örnek numarası (Püskürtücü yüksekliği (cm))							
Hız (km/h)	1 (30)	2 (40)	3 (50)	4 (55)	5 (60)	6 (65)	WA (%)	UD (%)	
Püskürtücü yükseklik kontrolü uygulanmadığında									
4	 70,54	 54,30	 53,37	 50,69	 38,90	 34,79	50,43	74,83	
8	 58,51	 40,65	 32,02	 28,89	 22,24	 20,44	33,79	58,21	
12	 51,34	 31,85	 26,82	 25,03	 19,46	 16,73	28,50	56,57	
Püskürtücü yükseklik kontrolü uygulandığında									
4	 55,84	 55,67	 52,52	 47,67	 43,25	 42,82	49,59	88,06	
8	 32,62	 30,59	 27,55	 27,44	 26,51	 26,66	28,56	91,33	
12	 30,35	 29,28	 27,67	 25,79	 23,71	 20,62	26,23	86,11	

Tablo 5.17.'deki bilgiler yükseklik kontrolü uygulanmadığında ıslak alan yüzdesi ya da kaplama oranının ilerleme yönünde farklı yüksekliklerde değiştiğini ortaya koymaktadır. Yüksek kontrolü uygulanmadığında püskürtücü yüksekliği bütün hızlar için 30 cm'de en alçak değerinde olduğunda bir numaralı örnek WSP kart üzerinde ıslak alan yüzdesi en büyük değerinde olduğu açıkça görülebilmektedir. (Al-Gaadi, 2010) tarafından yapılan çalışmada, püskürtücü ve hedef arasındaki mesafe az olduğunda, en yüksek hacim ve uygulama oranı doğrudan püskürtücünün altında dar bir alanda bulunmuştur. Diğer taraftan püskürtücü ile hedef arasındaki yükseklik arttığında spreysel hacmi ve uygulama oranı püskürtücü altında azalmış ve daha geniş

bir alan ilaçlanmıştır. Yoshida ve ark., (1971) ve Crease ve ark., (1991), kısa mesafelerde (nozul ile hedef bitki arasındaki mesafe az olduğunda) damlacıkların hedefe doğru hareketlerinde, büyük damlacıkların hedefe çarpıp damlacık sıçraması ve parçalanması meydana gelebileceğini belirtmektedir. Bu durumun ise hedef üzerindeki birikim miktarını ve dağılım düzgünlüğünü olumsuz olarak etkilediği vurgulanmaktadır.

Tablo 5.17.'de görüldüğü gibi, yükseklik kontrolü uygulanmadığı durum için püskürtücü yüksekliğinin en fazla olduğu altı numaralı örnek kart üzerinde ise ıslak alan yüzdesi en küçük değerindedir. Püskürtücü ve hedef arasındaki mesafe fazla olduğunda daha geniş alan ilaçlanmakta aynı zamanda damlacıkların hedef alanın dışına sürüklenmesi anlamına gelen sürüklenmenin ıslak alan yüzdesinin küçük olmasının nedeni olduğu söylenebilir. Balsari ve ark., (2017), püskürtme yüksekliği 30 cm'den 50 cm'ye, 50 cm'den 70 cm'e çıkarıldığında ilaç sürüklenmesinin önemli bir miktarda arttığını ve bum yüksekliğinin etkisinin püskürtücü tipinden bağımsız olduğunu belirtmiştir. De Jong ve ark., (2000) geleneksel ilaçlamada bum yüksekliği 70 cm'den 50 cm'e indiğinde sürüklenme azalmasının %54, bum yüksekliği 50 cm'den 30 cm'e indiğinde sürüklenme azalmasının %56, bum yüksekliği 70 cm'den 30 cm'e indiğinde ise sürüklenme azalmasının %80 olduğunu belirtmektedir. Nyutten (2007), ilaçlama yüksekliği olması gerekenden fazla olduğunda damlacıkların rüzgâra maruz kalma süresi arttığından sürüklenmenin etkisinin arttığını belirtmektedir. Lardoux ve ark., (2007) göre, yükseklik arttığında kayıplar nedeniyle hektar başına hedefe ulaşan ilaç miktarı azalmaktadır. Kayıplar buharlaşma, sürüklenme ve damlacıkların dağılımından meydana gelmektedir.

Traktör ilerleme hızı arttığında yükseklik kontrolünden bağımsız olarak, bütün deneylerden elde edilen WSP kart örneklerinde ıslak alan yüzdesi Tablo 5.17.'de görüldüğü gibi azalmaktadır. En büyük ıslak alan yüzdeleri ve ortalamaları 4 km/h hız değerinde, en küçük ıslak alan yüzdeleri ve ortalamaları ise 12 km/h ilerleme hızında elde edilmiştir. Wolf ve ark., (1997), artan ilerleme hızının nozul merkezi altındaki bölge de sprey birikim miktarını azalttığını belirtmektedir. Ooms ve ark., (2003), laboratuvarında ve saha koşullarında gerçekleştirdikleri deneylerde yatay

hareket ile boylamasına ilaç kaplama oranı arasında güçlü bir korelasyon olduğunu ve ilaç kaplama oranının yatay hız ile ters orantılı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca hız artışının ilaç sürüklenmesi riskini arttırdığını belirtmektedir. Miller ve Smith (1997)'in arazi deneylerinden el ettikleri sonuçlara göre hız 4 den 8 km/h'ye artırıldığında ilaç sürüklenmesi yaklaşık %51 oranında artmaktadır. Langenakens ve ark. (1995), hız 4 km/h den daha fazla olduğunda istenen etkiyi elde edebilmek için uygulanan kimyasalın miktarının artırılması gerektiğini belirtmektedir. Filintas ve ark. (2009), hız değişiminin etken maddenin düzgün dağılımını etkilediğini bu nedenle hız değiştiğinde uygulama oranının değiştirilmesi gerektiğini belirtmektedir. Çelen ve ark (2007) gerçekleştirdikleri deneylerde, ilerleme hızındaki artışın bağ ilaçlamasında kalıntı miktarında değişen miktarlarda azalmaya neden olduğunu bulmuşlardır. Speelman ve Jansen (1974), traktör/püskürtücünün ilerleme hızının 6 km/h'den 9 km/h'e çıkarmak ilaç dağılımı varyasyon katsayısının değerinin değiştiğini bulmuşlardır. Luck ve ark. (2011), değişen hız ve dönüş manevralarının istenen ve gerçek uygulama oranları arasında bir hata kaynağı olduğunu belirtmektedir.

Geliştirilen püskürtücü yükseklik kontrol sistemi ile 50 cm referans yükseklik için püskürtücü yükseklik kontrolü uygulandığında, ıslak alan yüzdesi Tablo 5.17.'de görüldüğü gibi 4 km/h ilerleme hızında %55,8 ile %42,82 arasında, 8 km/h ilerleme hızında %32,62 ile %26,66 arasında, 12 km/h ilerleme hızında ise %30,35 ile %20,62 arasında bulunmuştur. Ortalama ıslak alan yüzdeleri açısından bakıldığında ise, 4, 8 ve 12 km/h hız değerlerinde sırasıyla %49,59, %28,56 ve %26,23 olarak hesaplanmıştır. Etkili bir tarımsal ilaçlama için ıslak alan yüzdesinin ya da kaplama oranının %20-%50 arasında olması istenmekte, %20' daha az olan kaplama oranı ise yetersiz olarak değerlendirilmektedir (Mangado ve ark., 2013). Buna göre, yükseklik kontrolü uygulandığında tüm hızlar için elde edilen WSP kart örneklerindeki ıslak alan yüzdelерinin %55,80 ile %20,62 arasında değiştiği dikkate alındığında bu çalışmada geliştirilen püskürtücü yükseklik kontrol sistemi ile etkili bir ilaçlama gerçekleştirilebileceği söylenebilir.

Arazi deneylerinde yükseklik kontrolünün uygulanmadığı ve uygulandığı durumlara göre ilerleme yönündeki dağılım düzgünlüğü verileri Tablo 5.17.'de verilmiştir. Bu

tablodaki veriler incelendiğinde görülmektedir ki yükseklik kontrolü uygulandığında traktör ilerleme yönündeki dağılım düzgünlüğü artmıştır. İlerleme yönünde dağılım düzgünlüğü değerleri sabit yükseklikteki püskürtücü şartlarına göre 4 km/h hız için %74,83'den %88,06'ya, 8 km/h hız için %58,21'den %91,33'e ve 12 km/h hız için %56,57'den %86,11'e artmıştır. Bu sonuçlara göre püskürtücü yükseklik kontrolü uygulandığında ilerleme yönündeki dağılım düzgünlüğü 4 km/h hız için %17,69 artmış, 8 km/h hız için %56,90, 12 km/h için %52,21 artmıştır. Dağılım düzgünlüğündeki en büyük artış 8 km/h hız değerinde elde edilmiştir. Buradan püskürtücü yükseklik kontrolü uygulandığında, sistemin ilerleme yönünde daha iyi bir püskürtme dağılımı oluşturduğu sonucuna varılabilir.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, bir püskürtücü yükseklik kontrol sistemi geliştirilmiştir ve sistemin performansı laboratuvar ortamında ve arazi şartlarında test edilmiştir. Geliştirilen sistemde literatürde yapılan çalışmalardan ve mevcut saha uygulamalarından farklı olarak, dikey yönde doğrusal hareket üretmek için yüksek performanslı PMTLSM kullanılmıştır. PMTLSM, maksimum hız sınırlandırılmış ivme interpolasyon yöntemine (yamuk/üçgen hareket profili) göre çalıştırılarak, motor rotorunun farklı ivme değerlerinde belirli bir yörüngeye göre hareket etmesi sağlanmıştır. Laboratuvar ortamında, sistemin seçilen referans yükseklik değerini takip performansı altı farklı PMTLSM ivmesi ve dört farklı konveyör hızı için üç tekrarlı olarak test edilmiştir. Karşılaştırma performans indeksi olarak varyasyon katsayısı (CV) kullanılmıştır. Ayrıca, sargılardan geçen akım motorun ısınma miktarını veya termal yüklenmeyi önemli ölçüde etkilediğinden, değişen PMTLSM ivmesi ve konveyör bant hızının PMTLSM RMS akımına etkisi de araştırılmıştır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerde, ultrasonik mesafe sensörü iki farklı şekilde konumlandırılmıştır. Sensör ayrı konumlu çalışmada bir yükseklik kontrol yöntemi ve sensör üst konumlu çalışmada iki farklı yükseklik kontrol yöntemi kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen sistem için, laboratuvar deneylerinden elde edilen verilere göre en uygun ivme değeri 20 m/s^2 olarak bulunmuştur. Laboratuvar deneylerinde yükseklik kontrolü uygulandığında, en yüksek hız olan 4 km/h için CV değerinde %64,41 azalma elde edilmiş, püskürtücünün $\pm\%5$ referans değerinde kalıcılığı %81,07 olmuştur. Arazi deneylerinde ise CV değerindeki en büyük azalma 4 km/h hız değerinde %75,61 bulunmuştur. Arazi deneylerinde 12 km/h hız değerinde CV değerinde %69,17 azalma olurken püskürtücünün $\pm\%5$ referans değerinde kalıcılığı %60,27 bulunmuştur. Hem laboratuvar hem de saha deneyleri, püskürtücü sisteme

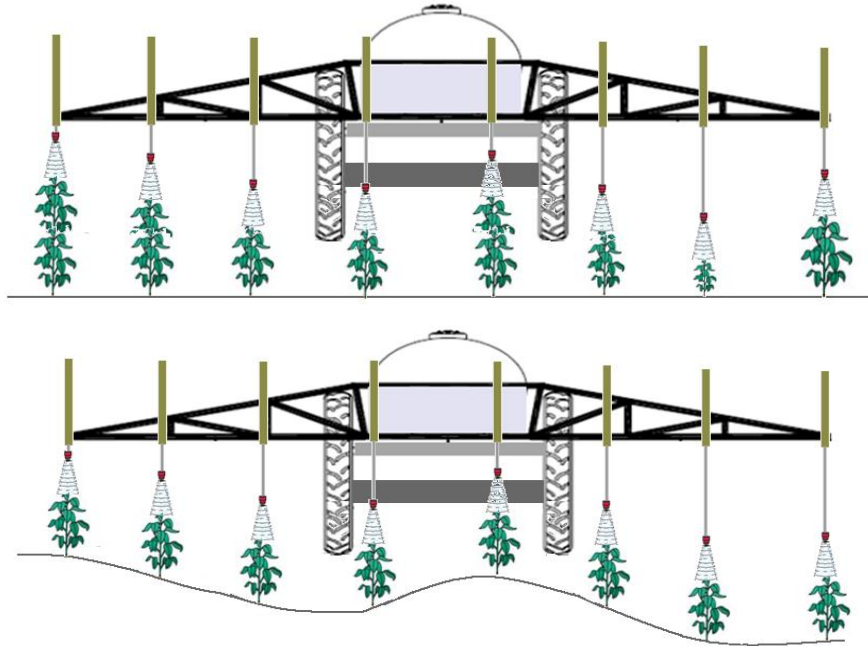
yükseklik kontrolü uygulandığında, CV değerinin azaldığını göstermiştir. Ayrıca PMTLSM RMS akımının ivmenin artırılmasında sınırlayıcı bir faktör olduğu ve motorda aşırı ısınma oluşmaması için PMTLSM ivmesinin 60 m/s^2 'den daha küçük değerlere ayarlanması gerektiği tespit edilmiştir. Araştırmadan elde edilen bulgulara göre, geliştirilen yükseklik kontrol sisteminin PMTLSM ivmesi ve ilerleme hızından etkilendiği söylenebilir. Araştırmadan elde edilen bulgulara göre, geliştirilen püskürtücü yükseklik kontrol sisteminde PMTLSM ivmesi ve konveyör bant hızı, CV ve RMS akım değerlerini etkileyen önemli değişkenler olmuştur.

Püskürtücü yükseklik kontrolünün uygulandığı arazi deneylerinde, ilerleme yönündeki dağılım düzgünlüğü önemli miktarda artmıştır. Bu artış 8 km/h hız için %56,90 olmuştur. Sonuçlara göre, bu sistem geleneksel bir tarımsal ilaçlama makinasına uyarlanırsa, arazi uygulamalarında tarım ilaçlarının aşırı ve eksik püskürtülmesi azaltılacaktır. Elde edilen deneysel sonuçlar bu çalışmada kullanılan PMTLSM sisteminin, sıraya ekimde püskürtücüyü, farklı boylardaki bitkilerin üzerinde minimum hata ile ayarlanan yükseklikte tutabileceği saptanmıştır. Bu durum, sistemin mevcut laboratuvar ve arazi koşullarında etkinliğini ve fizibilitesini göstermektedir. Bu çalışmada geliştirilen sistem, geleneksel bir ilaçlama makinasına uyarlandığında, bitki boy farklılıklarından kaynaklanan ilaçlama yüksekliği hatalarını azaltabilecektir. Böylece saha uygulamalarında ilaçlama yüksekliği ayarlanan değere yakın değerlerde tutularak, ilaçlama yükseklik hatalarından kaynaklanan tarım ilaçlarının aşırı ve eksik püskürtülme miktarı azaltabilecektir. Ayrıca bu çalışmanın tarımsal ilaçlama yükseklik kontrolü uygulamalarında sabit mıknatıslı tüp tipi lineer senkron motorların kullanımı ile ilgili çalışmaların temelini oluşturabileceği düşünülmektedir.

Araştırmadan elde edilen bulgulara göre bundan sonraki çalışmalar da aşağıda belirtilen öneriler gerçekleştirilebilir;

- Sabit mıknatıslı tüp tipi lineer senkron motorun hareket profili S eğrisi hareket profili olarak değiştirilebilir,

- Sabit mıknatıslı tüp tipi lineer senkron motor sistemine manyetik damper eklenebilir,
- Farklı kontrol yöntemleri kullanılarak, kontrolöre ait parametreler sezgisel optimizasyon yöntemleri ile optimize edilebilir,
- Bitkileri tespit etmek için kamera kullanılabilir,
- İlerleme hız değişimleri ve rüzgar etkisi dikkate alınarak, değişen hızlarda ve rüzgar şiddetine göre yükseklik kontrolü ile birlikte sistemde oransal valf kullanılarak püskürtme oranı değiştirilebilir,
- Bu çalışmada geliştirilen sistem, Şekil 6.1.'deki gibi bir ilaçlama makinasına adapte edilip, entegre bir kontrol ünitesi ile kontrolü gerçekleştirilebilir. Sıraya ekim yapılan uygulamalarda, bitki boyları farklı olduğunda ya da dalgalı arazi yapılarında her bir sıra üzerindeki püskürtücünün yüksekliği diğerinden bağımsız olarak ayarlanarak tüm bitkiler için ayarlanan yükseklikte ilaçlama yapılması sağlanabilir.



Şekil 6.1. Gerçek bir ilaçlama makinası üzerinde geliştirilmesi önerilen püskürtücü yükseklik kontrol sistemi

KAYNAKLAR

- Åström, K. J., Hägglund, T., 1984a. Automatic tuning of simple regulators. IFAC Proceedings Volumes, 17(2): 1867-1872.
- Åström, K. J., Hägglund, T., 1984b. Automatic tuning of simple regulators with specification on phase and amplitude margins. Automatica, 20, 645-651.
- Åström, K. J., Hägglund, T., 1995. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. Instrument Society of America, Research Triangle Park, USA, 1-338.
- Al-Gaadi, K. A., 2010. Effect of nozzle height and type on spray density and distribution for a ground field sprayer. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 9(1): 1-12.
- Ang, K. H., Chong, G., Li, Y., 2005. PID control system analysis, design, and technology. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 13(4): 559-576.
- Anthonis, J., Audenaert, J., Ramon, H., 2005. Design optimisation for the vertical suspension of a crop sprayer boom. Biosystems Engineering, 90(2): 153-160.
- Badran, O., Sarhan, H., Alomour, B., 2012. Thermal performance analysis of induction motor. International Journal of Heat and Technology, 30(1):75-88.
- Balsari, P., Gil, E., Marucco, P., Van de Zande, J. C., Nuyttens, D., Herbst, A., Gallart, M., 2017. Field-crop-sprayer potential drift measured using test bench: effects of boom height and nozzle type. Biosystems Engineering, 154: 3-13.
- Bangji, W., Qingxiang, L., Lei, Z., Yanrong, Z., Xiangqiang, L., Jianqiong, Z., 2011. Velocity profile algorithm realization on FPGA for stepper motor controller. Proceedings of the 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce, Dengleng, China, 6072-6075.
- Belforte, G., Eula, G., Raparelli, T. A., 2011. New Technique for Safe Pesticide Spraying in Greenhouses. In Tech, Croatia, 129-154.
- Bellman, R. E., Zadeh, L. A., 1970. Decision-making in a fuzzy environment. Management science, 17, 141-164.
- Bisesi, M., Koren, H., 2003. Handbook of Environmental Health: Biological, Chemical, and Physical Agents of Environmentally Related Disease. CRC press Boca Raton, USA, 347-385.
- Bode, L. E., Bretthauer, S. M., 2008. Agricultural chemical application technology: a remarkable past and an amazing future. Transactions of the ASABE, 51(2): 391-395.

- Boldea, I., Nasar, S. A., 1999. Linear electric actuators and generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14(3): 712-717.
- Bondesson, Å., 1986. Sprutbommens rörelser - verkan, orsaker och reducering. SLU, Institutionen för växt- och skogsskydd, Växtskyddsrapporter, 39, 26-35.
- Bongaarts, J., 2009. Human population growth and the demographic transition. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 364, 2985–2990.
- Boz, A. F., 1999. Computational approaches to and comparisons of design methods for linear controllers, University of Sussex, PhD Thesis.
- Chen, C. S., Lee, A. C., 1998. Design of acceleration/deceleration profiles in motion control based on digital FIR filters. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(7): 799-825.
- Chen, H., Mu, H., Zhu, Y., 2016. Real-time generation of trapezoidal velocity profile for minimum energy consumption and zero residual vibration in servomotor systems. *IEEE American Control Conference*, Boston, USA, 2223-2228.
- Chiu, H. W., Lee, F. F., Liang, L. S., 1999. Using image processing technique to measure spray coverage. *Journal of Agricultural Research of China*, 48(4): 96-110.
- Combella, J. H., 1981. History and trends in the design of ground boom sprayers Australian conditions. In *Proceedings of the Sixth Australian Weeds Conference*, Queensland, Australia, 87-91.
- Crease, G. J., Hall, F. R., Thacker, J. R. M., 1991. Reflection of agricultural sprays from leaf surfaces. *Journal of Environmental Science and Health Part B, Pesticides Food Contaminants and Agricultural Wastes*, 26, 383-407.
- Çelen, İ. H., Arın, S., Durgut, M. R., Okur, E., 2007. Bağlarda kalıntı ve damla dağılımı üzerinde pülverizatör ilerleme hızı değişiminin etkisi. *Tarımsal Mekanizasyon 24. Ulusal Kongresi*, Kahramanmaraş, 407-414.
- Çilingir, İ., Dursun, E., 2002. Bitki Koruma Makinaları. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, 1-248.
- Da Silva, A. M., 2015. Mechatronics design process with energy optimization for industrial machines. Marquette University, PhD Thesis.
- De Jong, A., Michielsen, J. M. G. P., Stallinga, H., Van De Zande, J. C., 2000. Effect of sprayer boom height on spray drift. *Mededelingen Faculteit Landbouwwetenschappen, Universiteit Gent*, 65(2b): 919-930.
- De Moor, A., Langenakens, J., Vereecke, E., Jaeken, P., Lootens, P., Vandecasteele, P., 2000. Image analysis of water sensitive paper as a tool for the evaluation of spray distribution of orchard sprayers. *Aspects of Applied Biology*, 57, 329-342.
- De Schampheleire, M., Spanoghe, P., Brusselman, E., Sonck, S., 2007. Risk assessment of pesticide spray drift damage in Belgium. *Crop Protection*, 26(4): 602-611.

- Deprez, K., Anthonis, J., Ramon, H., Van Brussel, H., 2002. Development of a slow active suspension for stabilizing the roll of spray booms, part 1: hybrid modelling. *Biosystems Engineering*, 81(2): 185-191.
- Deprez, K., Anthonis, J., Ramon, H., 2003. System for vertical boom corrections on hilly fields. *Journal of Sound and Vibration* 266(3): 613-624
- Dong, F., 2014. Design, modeling and control of an autonomous field robot for white asparagus harvesting. University of Magdeburg, Faculty of Mechanical Engineering, PhD Thesis.
- Eryilmaz, B., and Wilson, B. H., 2001. Improved tracking control of hydraulic systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 123(3): 457-462.
- Evans, M. D., Law, S. E., Cooper, S. C., 1994. Fluorescence spray deposit measurement via light intensified machine vision. *Applied Engineering in Agriculture*, 10(3): 441-447.
- Ezair, B., Tassa, T., Shiller, Z., 2014. Planning high order trajectories with general initial and final conditions and asymmetric bounds. *The International Journal of Robotics Research*, 33(6): 898-916.
- Famouri, P., Cooley, W. L., 1994. Design of DC traction motor drives for high efficiency under accelerating conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30(4): 1134-1138.
- FAO, 2009. How to feed the world in 2050. Food and Agriculture Organization of the United Nations, High-Level Expert Forum, 1-35.
- Filintas, A. G., Hatzopoulos, J., Parlantzas, V., 2009. Agriculture spray machinery pattern testing and validation by the use of GIS and the use of a dilution of active ingredient in wastewater. In *Proceeding of 5th international conference on energy, environment, ecosystems and sustainable development*, Athens, Greece, 334-339.
- Fox, R. D., Salyani, M., Cooper, J. A., Brazee, R. D., 2001. Spot size comparisons on oil and water sensitive paper. *Applied Engineering in Agriculture*, 17(2): 131-136.
- Fox, R. D., Derksen, R. C., Cooper, J. A., Krause, C. R., Ozkan, H. E., 2003. Visual and image system measurement of spray deposits using water-sensitive paper. *Applied Engineering in Agriculture*, 19(5): 549-552.
- Frost, A. R., 1984. Simulation of an active spray boom suspension. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 30: 313-325.
- Frost, A. R., O'Sullivan, J. A., 1986. Verification of a mathematical model for a passive spray boom suspension. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 34(3): 245-255.
- Gerelli, O., Bianco, C. G. L., 2010. A discrete-time filter for the on-line generation of trajectories with bounded velocity, acceleration, and jerk. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, USA, 3989-3994.

- Gholap, B. S., 2012. Design development and performance evaluation of tractor mounted hydraulic boom sprayer for cotton crop. Maharana Pratap University of Agriculture and Technology, Master of Engineering.
- Gieras, J. F., Piech, Z. J., Tomczuk, B., 2012. Linear Synchronous Motors: Transportation And Automation Systems. CRC Press, USA, 1-497.
- Gil, E., Badiola, J., 2007. Design and verification of a portable vertical patternator for vineyard sprayer calibration. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 23(1): 35-42.
- Golob, M., 2001. Decomposed fuzzy proportional–integral–derivative controllers. Applied Soft Computing, 1, 201-214.
- Griffith, J., Strelhoff, B., Schnaider, J., 2012. The Hockley Index. ASABE Annual International Meeting, 1-8.
- Gustavi, M., Andersson, L., 2017. Implementation of control algorithm for mechanical image stabilization. Lund University, Department of Automatic Control, MSc Thesis.
- Güzelkaya, M., Eksin, I., Yesil, E., 2003. A new self-tuning design for PID-type fuzzy logic controllers. IFAC Proceedings Volumes, 36(7): 65-70.
- Ha, C. W., Lee, D., 2018. Analysis of embedded prefilters in motion profiles. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65(2): 1481-1489.
- Haddad, M., Khalil, W., Lehtihet, H. E., 2010. Trajectory planning of unicycle mobile robots with a trapezoidal-velocity constraint. IEEE Transactions on Robotics, 26(5): 954-962.
- Haschke, R., Weitnauer, E., Ritter, H., 2008. On-line planning of time-optimal, jerk-limited trajectories. IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems, Nice, France, 3248-3253.
- Herbst, A., Osteroth, H., Flier, W., Stendel, H., 2015. A method for testing automatic spray boom height control systems. ASABE Annual International Meeting, 1-6.
- Herbst, A., Osteroth, H. J., Stendel, H., 2018. A novel method for testing automatic systems for controlling the spray boom height. Biosystems Engineering, 174, 115-125.
- Hicks, B.G., 2005. Effect of tilt actuator manipulation on suspended boom sprayer roll. Saskatchewan University, Department of Mechanical Engineering, Master of Science.
- Hirvonen, M., 2006. On the analysis and control of a linear synchronous servomotor with a flexible load. Lappeenranta University of Technology, Department of Mechanical Engineering, PhD thesis.
- Holterman, H. J., Van de Zande, J. C., Porskanp, H. A. J., Huijsmans, J. F. M., 1997. Modelling spray drift from boom sprayers. Computers and Electronics in Agriculture, 19(1): 1-22.
- Hor, P. J., Zhu, Z. Q., Howe, D., 1999. Eddy current loss in a moving-coil tubular permanent magnet motor. IEEE Transactions on Magnetics, 35(5): 3601-3603.

- Iida, M., Bursk, T. F., 2002. Ultrasonic sensor development for automatic steering control of orchard tractor. Proceeding Of The Conference Automation Tecnology For Off-Road Equipment, Illinois, USA, 221-229.
- Ilıca, A., Boz, A. F., 2018. Design of a nozzle-height control system using a permanent magnet tubular linear synchronous motor. Journal of Agricultural Sciences, 24(3): 374-385.
- Johnson, P. A., 1996. Uncertainty of hydraulic parameters. Journal of Hydraulic Engineering, 122(2): 112-114.
- Johnston, D., Edge, K., 1991. In-situ measurement of the wavespeed and bulk modulus in hydraulic lines. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 205(3): 191-197.
- Jones, B. J., 2006. Mechanised spraying systems for herbicide use in forestry. Technical Note, UK Forestry Commission, 1-12.
- Jeon, H. Y., Womac, A. R., Gunn, J., 2004. Sprayer boom dynamic effects on application uniformity. Transactions of the ASAE, 47(3): 647-658.
- Kansu, İ. A., 1994. Genel Entomoloji, Kıvanç Basımevi, 1-426.
- Karaçar, E., 2001. Hidrolik ve Pnömatik'e Alternatif Çözüm; Doğrusal Motorlar, II. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi, İzmir, 493-493.
- Karadöl, H., Arslan, S., Aybek, A., 2017. PID control for sprayer sections under laboratory conditions. Agronomy Research, 15(1): 187-195.
- Karasakal, O., 2012. Bulanık PID kontrolörleri için çevrim içi kural ağırlıklandırma yöntemleri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi.
- Kaul, P., Schmidt, K., Koch, H., 1996. Distribution quality of orchard sprayers. Eppo Bulletin, 26(1), 69-77.
- Kennes, P., Ramon, H., Baerdemaeker, J. D., 1999. Modelling the effect of passive vertical suspensions on the dynamic behavior of sprayer booms. Journal of Agricultural Engineering Research, 72(3): 217-229.
- Kim, W. J., Berhan, M. T., Trumper, D.L., Lang, J.H., 1996. Analysis and implementation of a tubular motor with Halbach magnet array. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 471-478.
- Kim, W. J., Murphy, B. C., 2004. Development of a novel direct-drive tubular linear brushless permanent-magnet motor. 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, Sait Lake City, USA, 1664-1671.
- Klein, R. N., Kruger, G. R., 2011. Spray boom set-up on field sprayers. Cooperative Extension g2091, Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska Lincoln, USA.
- Koç, C., Keskin, R., 2011. Tarla pülverizatörleri için PIC kontrollü aktif bir bum dengeleme sisteminin geliştirilmesi. Tarım Bilimleri Dergisi, 17(1): 24-33.

- Kurtulan, S., 2005. Sayısal PID kontrolörü. İçinde: PLC İle Endüstriyel Otomasyon. 4. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 306-312.
- Kremer, V., Zhu, Z. Q., Howe, D., 2007. Indirect and direct force control of a two-phase tubular permanent magnet machine. *IEEE Transaction Power Electronics*, 22(2): 654-662.
- Lambrechts, P., Boerlage, M., Steinbuch, M., 2005. Trajectory planning and feedforward design for electromechanical motion systems. *Control Engineering Practice*, 13(2): 145-157.
- Langenakens, J. J., Ramon, H., De Baerdemaeker, J. D., 1995. A model for measuring the effect of tire pressure and driving speed on the horizontal sprayer boom movements and spray patterns. *Transactions of the ASAE*, 38(1): 65-72.
- Langenakens, J. J., Clijmans, L., Ramon, H., Baerdemaeker, J. D., 1999. The effects of vertical sprayer boom movements on the uniformity of spray distribution. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74(3): 281-291.
- Lardoux, Y., Sinfort, C., Enfalt, P., Sevila, F., 2007. Test method for boom suspension influence on spray distribution, part i: experimental study of pesticide application under a moving boom. *Biosystems Engineering*, 96(1): 29-39.
- LinMot, 2016. Linear motors introduction and overview.pdf, Edition 16, Sulzer Electronics, Zürich, Switzerland, <http://www.linmot.com> (Retrieve November 2016).
- Lee, S., Kim, W. J., 2010. Active suspension control with direct-drive tubular linear brushless permanent-magnet motor. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18(4): 859-870.
- Liu, X., Zheng, Z., Ye, Y., Lu, Q., 2008. Position detecting for the air-cored TPMLSM with linear Hall-effect sensors; *Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, China, 1417-1420.
- Liu, J., Han, J., Lv, H., Li, B. 2015. An ultrasonic sensor system based on a two dimensional state method for highway vehicle violation detection applications. *Sensors*, 15(4): 9000-9021.
- Liu, Y., 2017. Design and simulation of agricultural spray rod control system. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 32(5), 623-631.
- Lu, H., Li, M., 2009. Fuzzy PID controller design for PMLSM direct drive system. *IEEE Information and Automation Conference*, Zhuhai, Macau, China, 41-45.
- Luck, J. D., Pitla, S. K., Zandonadi, R. S., Sama, M. P., Shearer, S. A., 2011. Estimating off-rate pesticide application errors resulting from agricultural sprayer turning movements. *Precision Agriculture*, 12(4): 534-545.
- Luis, R., Quadrado, J. C., Silva, J. F., 2007. Application of PM tubular linear motor drive as the electromechanical linear actuator of a 6 dof parallel manipulator. *Inovação e Desenvolvimento*, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 1-6.

- Mamdani, E. H., 1974. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. In Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 121(12): 1585-1588.
- Mamdani, E. H., Assilian, S., 1975. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1): 1-13.
- Mangado, J., Arazuri, S., Arnal, P., Jarén, C., López, A., 2013. Measuring the accuracy of a pesticide treatment by an image analyzer. *Procedia Technol*, 8, 498-502.
- Marchant, J. A., Frost, A. R., 1989. Simulation of the performance of state feedback controllers for an active spray boom suspension. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 43(2): 89-101.
- Marck, P., Luyckx, A., 1993. *Het imago van de Europese landbouw bij de publieke opinie*. Leuven Acco, Leuven, Belgium.
- Marçal, A. R. S., Cunha, M., 2008. Image processing of artificial targets for automatic evaluation of spray quality. *Transactions of the ASABE*, 51(3): 811-821.
- Martins, I., Esteves, J., Marques, G. D., Da Silva, F. P., 2006. Permanent-magnets linear actuators applicability in automobile active suspensions. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 55(1): 86-94.
- Matthews, G. A., 2000. *Pesticide Application Methods*. Third Edition, Blackwell Science, United Kingdom, 1-426.
- Meessen, K. J., Paulides, J. J., Lomonova, E. A., 2010. Modeling and experimental verification of a tubular actuator for 20-g acceleration in a pick-and-place application. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(5): 1891-1898.
- Miles, L., 2018. Developing general procedure to quantitatively analyze boom height control performance on self-propelled agricultural sprayers. Iowa State University, Department of Agricultural Engineering, Master of Science.
- Miller, P. C. H., Smith, R. W., 1997. The effect of forward speed on the drift from boom sprayers. *Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference-Weeds*, Farnham, UK, 399-407.
- Miller, P. C. H., Lane, A. G., O'Sullivan, C. M., Tuck, C. R., Ellis, M. C. B., 2008. Factors influencing the risk of spray drift from nozzles operating on a boom sprayer. *Aspects of Applied Biology*, 84, 9-16.
- Moudgalya, K. M., 2007. *Digital Control*. John Wiley and Sons, Chichester, England, 1-535.
- Murphy, B. C., 2004. Design and construction of a precision tubular linear motor and controller. Texas A&M University, Department of Mechanical Engineering, Master of Science.
- Musillami, S., Goffre, P., Sevilla, F., 1982. Les traitements par pulvérisation et les pulvérisateurs en agriculture. *Toine 2. Études Du Cnemagref*, Antony, France, p. 59.

- Mutlu, B. R., Yaman, U., Dolen, M., Koku, A. B., 2009. Performance evaluation of different real-time motion controller topologies implemented on a FPGA. International Conference on Electrical Machines and Systems, Tokyo, Japan, 1-6.
- Nalavade, P. P., Salokhe, V. M., Jayasuriya, H. P., Nakashima, H., 2008. Development of a tractor mounted wide spray boom for increased efficiency. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 6(2): 164-169.
- Nation, H. J., 1978. Developments in sprayer boom design. British Crop Protection Conference-Weeds, UK, 649-656.
- Nguyen, K. D., Ng, T. C., Chen, I. M., 2008. On algorithms for planning s-curve motion profiles. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 5(1): 99-106.
- Nielsen, H. S., Sørensen, P. H., 1998. Active suspension for a field sprayer boom. *IFAC Proceedings Volumes*, 31(12), 277-282.
- Norac, 2015., Spray height control system. UC4+UC5 rogorator b2.pdf. Erişim tarihi. 11.05.2015.
- Nuyttens, D., 2007. Drift from field crop sprayers: The influence of spray application technology determined using indirect and direct drift assessment means, Katholieke Universiteit Leuven, PhD Thesis.
- Nuyttens, D., De Schampheleire, M., Baetens, K., Sonck, B., 2007. The influence of operator-controlled variables on spray drift from field crop sprayers. *Transactions of the ASABE*, 50(4): 1129-1140.
- Nuyttens, D., De Schampheleire, M., Verboven, P., Sonck, B., 2010. Comparison between indirect and direct spray drift assessment methods. *Biosystems Engineering*, 105(1): 2-12.
- Oerke, E. C., Dehne, H. W., 1997. Global crop production and the efficacy of crop protection current situation and future trends. *European Journal of Plant Pathology*, 103(3): 203-215.
- Ooms, D., Ruter, R., Lebeau, F., Destain, M. F., 2003. Impact of the horizontal movements of a sprayer boom on the longitudinal spray distribution in field conditions. *Crop Protection*, 22, 813-820.
- O'Sullivan, J. A., 1986. Simulation of the behaviour of a spray boom with an active and passive pendulum suspension. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 35(3): 157-173.
- Ozkan, H. E., Reichard, D. L., 1993. Effect of orifice wear on flow rate, spray pattern and droplet size distributions of fan-pattern nozzles. *Proceedings of the 2th International Symposium on Pesticides Application Techniques*, Strasbourg, France, 159-166.
- Ozkan, H. E., 1995. Handbook of weed management systems. In: *Herbicide Formulations, Adjuvants and Spray Drift Management*. Marcel Dekker, New York, USA, 217-244.

- Pan, S., Commins, P. A., Du, H., 2015. Tubular linear motor position detection by hall-effect sensors. Australasian Universities Power Engineering Conference, Wollongong, NSW, Australia, 1-5.
- Pan, S., 2016. Development of permanent magnet tubular linear motor and position feedback device based on Hall sensor. University of Wollongong, School of Electrical, Computer and Telecommunication Engineering, Master of Philosophy.
- Panneton, B., 2002. Image analysis of water-sensitive cards for spray coverage experiments. *Applied Engineering in Agriculture*, 18(2): 179-182.
- Park, B. J., Lee, H. J., Oh, K. K., Moon, C. J., 2017. Jerk-limited time-optimal reference trajectory generation for robot actuators. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 17(4), 264-271.
- Paul, S., Chang, J., 2015. A new approach to detect mover position in linear motors using magnetic sensors. *Sensors*, 15(10): 26694-26708.
- Pontelli, C. O., Mucheroni, M. F., 2012. Co-simulation procedure for PID and fuzzy logic active controls strategies applied to a sprayers boom suspension. In: *Technology and Engineering Applications of Simulink*, In Tech, Croatia, 69-96.
- Qasem, J. R., 2011. Herbicides Applications: Problems and Considerations. In: *Herbicides and Environment*. InTech, Croatia, 643-664.
- Qiao, W. Z., Mizumoto, M., 1996. PID type fuzzy controller and parameters adaptive method. *Fuzzy Sets and Systems*, 78(1): 23-35.
- Rahman, M.A., Slemon, G. R., 1985. Promising applications of neodymium boron iron magnets in electrical machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 21(5): 1712-1716.
- Ramon, H., Missotten, B., Baerdemaeker, J. D., 1997. Spray boom motions and spray distribution: part 2, experimental validation of the mathematical relation and simulation results. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66(1): 31-39.
- Röhrig, C., Jochheim, A., 2001. Motion control of linear permanent magnet motors with force ripple compensation. *Proceedings of the Third International Symposium on Linear Drives for Industry Applications*, Nagano, Japan, 128, 1-6.
- Rymansaib, Z., Irvani, P., Sahinkaya, M. N., 2013. Exponential trajectory generation for point to point motions. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Wollongong, NSW, Australia, 906-911.
- Salyani, M., Zhu, H., Sweeb, R. D., Pai, N., 2013. Assessment of spray distribution with water-sensitive paper. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(2): 101-111.
- Sama, M. P., Evans, J. T., Turer, A. P., Dasika, S. S., 2016. As-applied estimation of volumetric flow rate from a single sprayer nozzle series using water-sensitive spray cards. *Transactions of the ASABE*, 59(3): 861-869.

- Sánchez-Hermosilla, J., Medina, R., 2004. Adaptive threshold for droplet spot analysis using watersensitive paper. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(5): 547-551.
- Saramago, S. F. P., Steffen JR, V., 1998. Optimization of the trajectory planning of robot manipulators taking into account the dynamics of the system. *Mechanism and Machine Theory*, 33(7): 883-894.
- Sartori, S., Domingues, E. L., Kimura, J. B., Garrito, S. A., 2002. Automatic control of boom height and positioning on a self-propelled sprayer. *Proceedings of the World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources*, Iguacu Falls, Brazil, 421-431.
- Satow, T., Miyamoto, K., Matsuda, K., 1992. Control of spraying height with ultrasonic sensor for boom sprayer-part 1. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 54(2): 31-39.
- Satow, T., Miyamoto, K., Matsuda, K., 1994. Control of spraying height with ultrasonic sensor for boom sprayer-part 2. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 56(6): 59-67.
- Sies, M. F., Madzlan, N. F., Asmuin, N., Sadikin, A., Zakaria, H., 2017. Determine spray droplets on water sensitive paper (WSP) for low pressure deflector nozzle using image J. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 243(1), 1-9.
- Sinfort, C., Miralles, A., Sevilla, F., Maniere, G. M., 1994. Study and development of a test method for spray boom suspensions. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 59(4): 245-252.
- Sinfort, C., Herbst, A., 1996. Evaluation of the quality of spray distribution from boom sprayers in practical conditions, *European and Mediterranean Plant Protection Organization Bulletin*, 26(1), 27-36.
- Smith, D. B., Bode, L. E., Gerard, P. D., 2000. Predicting ground boom spray drift. *Transactions of the ASAE*, 43(3): 547-553.
- Snider, D., Yang, S. M., Pai, R. M., 1991. A control for a crank shear which minimizes the RMS current. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Dearborn, USA, 374-379.
- Subramanian, V., Burks, T. F., Singh S., 2005. Autonomous greenhouse sprayer vehicle using machine vision and ladar for steering control. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(5): 935-943.
- Sun, J., Miao, Y., 2011. Modeling and simulation of the agricultural sprayer boom leveling system. *Measuring Technology and Mechatronics Automation*, IEEE Conference, Shanghai, China, 613-618.
- Suresh, J., Manikanta, D., 2017. Modeling approach of agricultural cantilever sprayer boom leveling system. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(11): 525-529.
- Speelman, L., Jansen, J. W., 1974. The effect of spray-boom movement on the liquid distribution of field crop sprayers. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 19(2): 117-129.

- Tadić, V., Marković, M., Plaščak, I., Stošić, M., Lukinac-Čačić, J., i Vujčić, B., 2014. Impact of technical spraying factors on leaf area coverage in an apple orchard. *Tehnički vjesnik*, 21(5): 1117-1124.
- Tahmasebi, M., Rahman, R. A., Mailah, M., 2013. Roll movement control of a spray boom structure using active force control with artificial neural network strategy. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 32(3): 189-202.
- Tahmasebi, M., 2014. Intelligent active torque control for vibration reduction of a sprayer boom suspension system. Department of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Doctoral dissertation.
- Taylor, W. A., Womac, A. R., Miller, P. C., H., Taylor, B. P., 2004. An attempt to relate drop size to drift risk. *Proceedings of the International Conference on Pesticide Application for Drift Management*, Washington State University, USA, 210-223.
- Thirachai, S., Komeswarakul, P., Supakchukul, U., Suwatthikul, J., 2010. Trapezoidal velocity trajectory generator with speed override capability. *International Conference on Control, Automation and Systems*, Gyeonggi-do, South Korea, 1468-1472.
- Uchiyama, N., Honda, Y., Sano, S., 2014. Residual vibration suppression and energy saving in industrial machines using a trapezoidal velocity profile. *American Control Conference*, Portland, USA, 323-328.
- Vese, I. C., Radulescu, M. M., Marginenan, C. I., Teodosescu, P. D., 2012. Hardware-in-the-loop simulation and implementation of direct thrust-force control of two phase tubular permanent magnet actuator. *IEEE Conference, Automation, Quality and Testing Robotics*, Cluj-Napoca, 156-160.
- Vossoughi, G., Donath, M., 1995. Dynamic feedback linearization for electrohydraulically actuated control systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 117(4): 468-477.
- Wang, L., Zhang, N., Slocombe, J. W., Kuhlman D. K., 1993. Measurement of spray distribution uniformity for agricultural nozzles using spectral analysis. *American Society for Testing and Materials*, STP1183, Philadelphia, USA, 13, 265-279.
- Wang, L., Zhang, N., Slocombe, J. W., Thierstein, G. E., Kuhlman, D. K., 1995. Experimental analysis of spray distribution pattern uniformity for agricultural nozzles. *Applied Engineering in Agriculture*, 11(1): 51-55.
- Wang, J., Jewell, G. W., Howe, D., 2001. Design optimisation and comparison of tubular permanent magnet machine topologies. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 148(5): 456-464.
- Wang, L., Xiong, C., Wu, Y., Gan, Z., 2012. Study on iron loss in two kinds of moving-magnet linear motors. *International Compressor Engineering Conference*, Purdue University, USA, 1453, 1-5.
- Wang, S., Zhao, C., Wang, X., 2014. Design and experiments on boom height adjusting system. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 8, 161-164.

- Wei, X., Shao, J., Miao, D., Li, L., Xie, X., 2015. Online control system of spray boom height and balance. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 8, 66-71.
- Wen, P., Kidd, J. G., 2005. Electronic height indicator for agricultural machines. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2(1): 13-19.
- Wilson, J., Nowatzki, J., Hofman, V., 2008. Selecting drift-reducing nozzles. South Dakota Cooperative Extension Service, FS 919, Rev. 6/08.
- Wolf, T. M., Liu, S. H., Caldwell, B. C., Hsiao, A. I., 1997. Calibration of greenhouse spray chambers: the importance of dynamic nozzle patternation. *Weed Technology*, 11(3): 428-435.
- Wolf, R. E., Gardisser, D. R., Williams, W. L., 1999. Spray droplet analysis of air induction nozzles using WRK dropletscan technology. ASAE Paper No: 991026.
- Womac, A. R., Etheridge, R., Seibert, A., Hogan, D., Ray, S., 2001. Sprayer speed and venturi-nozzle effects on broadcast application uniformity. *Transactions of the ASAE*, 44(6): 1437-1444.
- Xiao, L., Yunyue, Y., Zhuo, Z., 2007. Study of the linear Hall-effect sensors mounting position for PMLSM. In 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Harbin, China, 1175-1178.
- Xing, J., Wang, F., Wang, T., Zhang, Y., 2010. Study on anti-demagnetization of magnet for high speed permanent magnet machine. *IEEE Transactions on Applied Super Conductivity*, 20(3): 856-860.
- Yao, B., Bu, F., Reedy, J., and Chiu, G.C., 2000. Adaptive robust motion control of single-rod hydraulic actuators: theory and experiments. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 5(1): 79-91.
- Yoshida, K., Maybank, J., 1971. Effect of the dynamic stability of spray booms on the dispersion characteristics of a flat fan spray. *The Journal of Canadian Agricultural Engineering*, 13(1): 23-28.
- Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3): 338-353.
- Zaman, Q. U., Schumann, A. W., Hostler, H. K., 2007. Quantifying Sources of Error in Ultrasonic Measurements of Citrus Orchards. *Applied Engineering in Agriculture*, 23(4): 449-453.
- Zaman, Q. U., Esau, T. J., Schumann, A. W., Percival, D. C., Chang, Y. K., Read, S. M., Farooque, A. A., 2011. Development of prototype automated variable rate sprayer for real-time spot-application of agrochemicals in wild blueberry fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2): 175-182.
- Zhu, H., Salyani, M., Fox, R. D., 2011. A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76, 38-43.
- Ziegler, J. G., Nichols, N. B., 1942. Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 64, 759-768.

EKLER

EK 1: Yamuk/üçgen hareket profili programı

Referans yükseklik verilerinden yamuk hareket profili verilerinin elde edilmesi

(<https://github.com/AerDronix/MotionGenerator>)

```
clear all
close all
clc

MG = MotionGenerator(5,20,0);% hız, ivme, pos, şeklinde pos=0 kalacak,
tt=xlsread('Deneyveri.xlsx','A:A'); % zaman x eksenini
ut=xlsread('Deneyveri.xlsx','B:B'); % veri y eksenini
t=tt';
u=ut';

pos = [];
vel = [];
acc = [];
tt = [];

    for kk = 1:length(u)

        MG.update(u(kk),t(kk));
        pos = [pos; MG.pos];
        vel = [vel; MG.vel];
        acc = [acc; MG.acc];

    end

lw = 1.5;
figure(1),
s1 = subplot(311);
stairs(t, u, '-', 'LineWidth', lw); hold on
plot(t, pos, '-.', 'LineWidth', 3, 'MarkerSize', 1);
ylabel('Pozisyon [cm]'); %Simulink model girişlerine uygulanan referans yükseklik vektörü
verileri;
grid
s2 = subplot(312);
plot(t, vel, '-.', 'LineWidth', lw, 'MarkerSize', 10); hold on
ylabel('Hız [m/s]'); %Simulink model girişlerine uygulanan referans hız vektörü verileri;
grid
s3 = subplot(313);
stairs(t, acc, '-', 'LineWidth', lw, 'MarkerSize', 10); hold on
grid
xlabel('Time [s]')
ylabel('ivme [m/s^2]');
```



```
linkaxes([s1 s2 s3], 'x');
tson='t'
```

```
classdef MotionGenerator < handle % matlab.System

    properties (SetAccess = private)
        maxVel = 0;
        maxAcc = 0;
        pos = 0;
        vel = 0;
        acc = 0;
        oldPos = 0;
        oldPosRef = 0;
        oldVel = 0;

        dBrk = 0;
        dAcc = 0;
        dVel = 0;
        dDec = 0;
        dTot = 0;

        tBrk = 0;
        tAcc = 0;
        tVel = 0;
        tDec = 0;

        velSt = 0;

        oldTime = 0;
        lastTime = 0;
        deltaTime = 0;

        signM = 1; % 1 = positive change, -1 = negative change
        shape = 1; % 1 = trapezoidal, 0 = triangular
    end

    methods
        % Constructor
        function MG = MotionGenerator(aVelMax,aAccMax,aPosInit)
            MG.maxVel = aVelMax;
            MG.maxAcc = aAccMax;
            MG.oldPos = aPosInit;
            MG.oldPosRef = aPosInit;
            MG.pos = aPosInit;
        end

        % Public methods
        function update(MG, posRef, time)

            if (MG.oldPosRef ~= posRef) % reference changed
                % Shift state variables
                MG.oldPosRef = posRef;
                MG.oldPos = MG.pos;
                MG.oldVel = MG.vel;
                MG.oldTime = MG.lastTime;

                % Calculate braking time and distance (in case is needed)
            end
        end
    end
end
```

```

MG.tBrk = abs(MG.oldVel) / MG.maxAcc; % same as for shape = 0
MG.dBrk = MG.tBrk * abs(MG.oldVel) / 2;

% Calculate Sign of motion
MG.signM = sign(posRef - (MG.oldPos + sign(MG.oldVel)*MG.dBrk));

if (MG.signM ~= sign(MG.oldVel)) % means brake is needed
    MG.tAcc = (MG.maxVel / MG.maxAcc);
    MG.dAcc = MG.tAcc * (MG.maxVel / 2);
else
    MG.tBrk = 0;
    MG.dBrk = 0;
    MG.tAcc = (MG.maxVel - abs(MG.oldVel)) / MG.maxAcc;
    MG.dAcc = MG.tAcc * (MG.maxVel + abs(MG.oldVel)) / 2;
end

% Calculate total distance to go after braking
MG.dTot = abs(posRef - MG.oldPos + MG.signM*MG.dBrk);

MG.tDec = MG.maxVel / MG.maxAcc;
MG.dDec = MG.tDec * (MG.maxVel) / 2;
MG.dVel = MG.dTot - (MG.dAcc + MG.dDec);
MG.tVel = MG.dVel / MG.maxVel;

if (MG.tVel > 0) % trapezoidal shape
    MG.shape = 1;
else % triangular shape
    MG.shape = 0;
    % Recalculate distances and periods
    if (MG.signM ~= sign(MG.oldVel)) % means brake is needed
        MG.velSt = sqrt(MG.maxAcc*(MG.dTot));
        MG.tAcc = (MG.velSt / MG.maxAcc);
        MG.dAcc = MG.tAcc * (MG.velSt / 2);
    else
        MG.tBrk = 0;
        MG.dBrk = 0;
        MG.dTot = abs(posRef - MG.oldPos); % recalculate total distance
        MG.velSt = sqrt(0.5*MG.oldVel^2 + MG.maxAcc*MG.dTot);
        MG.tAcc = (MG.velSt - abs(MG.oldVel)) / MG.maxAcc;
        MG.dAcc = MG.tAcc * (MG.velSt + abs(MG.oldVel)) / 2;
    end
    MG.tDec = MG.velSt / MG.maxAcc;
    MG.dDec = MG.tDec * (MG.velSt) / 2;
end

end

% Calculate time since last set-point change
MG.deltaTime = (time - MG.oldTime);
% Calculate new setpoint
MG.calculateTrapezoidalProfile(posRef);
% Update last time
MG.lastTime = time;

end
% =====
function calculateTrapezoidalProfile(MG, posRef)

```

```

t = MG.deltaTime;

if (MG.shape) % trapezoidal shape
    if (t <= (MG.tBrk+MG.tAcc))
        MG.pos = MG.oldPos + MG.oldVel*t + MG.signM * 0.5*MG.maxAcc*t^2;
        MG.vel = MG.oldVel + MG.signM * MG.maxAcc*t;
        MG.acc = MG.signM * MG.maxAcc;
    elseif (t > (MG.tBrk+MG.tAcc) && t < (MG.tBrk+MG.tAcc+MG.tVel))
        MG.pos = MG.oldPos + MG.signM * (-MG.dBrk + MG.dAcc + MG.maxVel*(t-
MG.tBrk-MG.tAcc));
        MG.vel = MG.signM * MG.maxVel;
        MG.acc = 0;
    elseif (t >= (MG.tBrk+MG.tAcc+MG.tVel) && t <
(MG.tBrk+MG.tAcc+MG.tVel+MG.tDec))
        MG.pos = MG.oldPos + MG.signM * (-MG.dBrk + MG.dAcc + MG.dVel +
MG.maxVel*(t-MG.tBrk-MG.tAcc-MG.tVel) - 0.5*MG.maxAcc*(t-MG.tBrk-MG.tAcc-MG.tVel)^2);
        MG.vel = MG.signM * (MG.maxVel - MG.maxAcc*(t-MG.tBrk-MG.tAcc-MG.tVel));
        MG.acc = - MG.signM * MG.maxAcc;
    else
        MG.pos = posRef;
        MG.vel = 0;
        MG.acc = 0;
    end
else % triangular shape
    if (t <= (MG.tBrk+MG.tAcc))
        MG.pos = MG.oldPos + MG.oldVel*t + MG.signM * 0.5*MG.maxAcc*t^2;
        MG.vel = MG.oldVel + MG.signM * MG.maxAcc*t;
        MG.acc = MG.signM * MG.maxAcc;
    elseif (t > (MG.tBrk+MG.tAcc) && t < (MG.tBrk+MG.tAcc+MG.tDec))
        MG.pos = MG.oldPos + MG.signM * (-MG.dBrk + MG.dAcc + MG.velSt*(t-
MG.tBrk-MG.tAcc) - 0.5*MG.maxAcc*(t-MG.tBrk-MG.tAcc)^2);
        MG.vel = MG.signM * (MG.velSt - MG.maxAcc*(t-MG.tBrk-MG.tAcc));
        MG.acc = - MG.signM * MG.maxAcc;
    else
        MG.pos = posRef;
        MG.vel = 0;
        MG.acc = 0;
    end
end

end

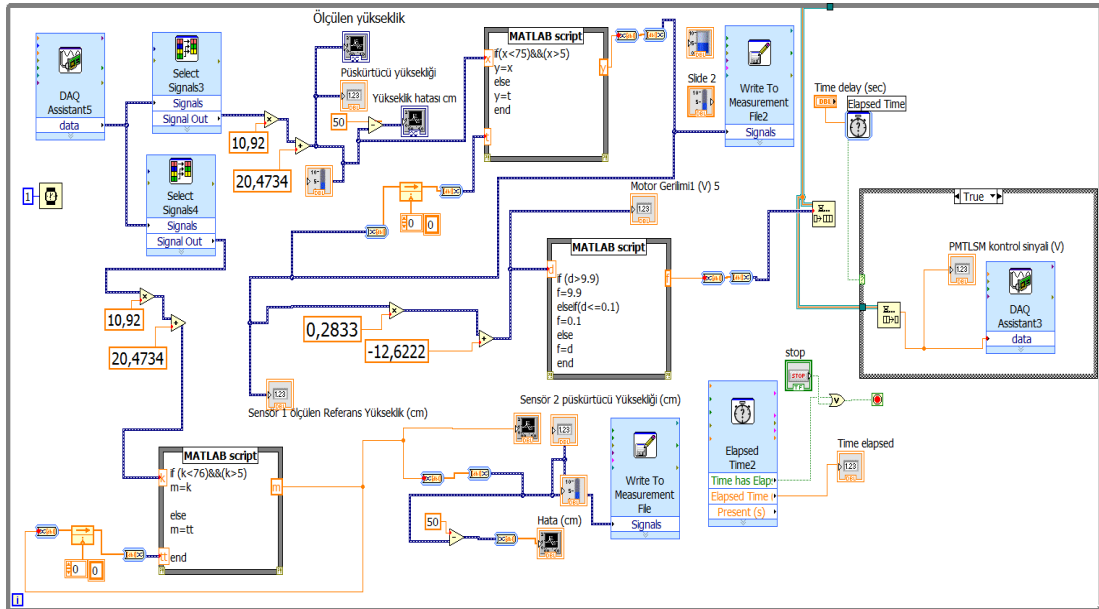
end

end
end
end
end

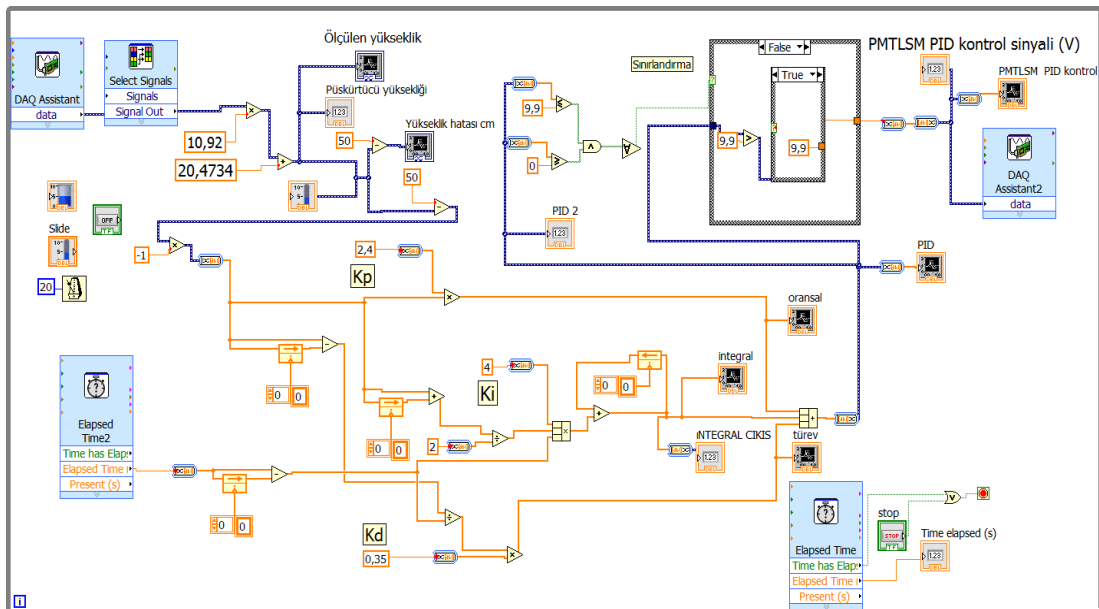
```

EK 2: Sensör ayrı konumlu çalışma, sensör üst konumlu PID ve Bulanık PID kontrol programları

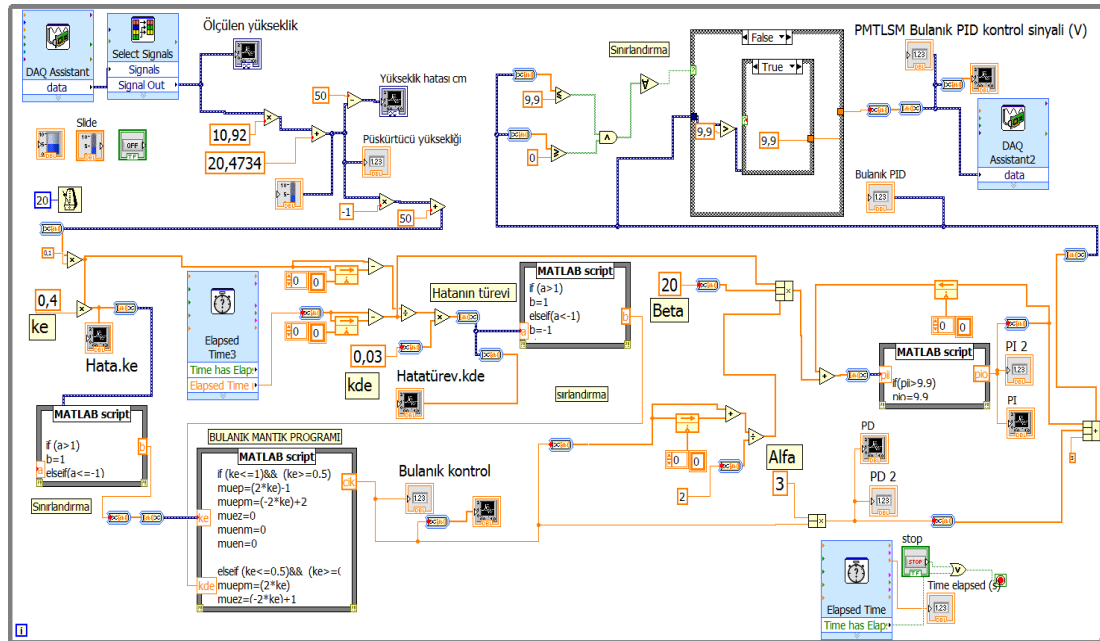
Sensör ayrı konumlu çalışma programı



Sensör üst konumlu PID kontrol programı



Sensör üst konumlu Bulanık PID kontrol programı



Bulanık Mantık Programı

```

if (ke<=1)&& (ke>=0.5)
muep=(2*ke)-1
muepm=(-2*ke)+2
muez=0
muenm=0
muen=0
elseif (ke<=0.5)&& (ke>=0)
muepm=(2*ke)
muez=(-2*ke)+1
muep=0
muenm=0
muen=0
elseif (ke<=0.0)&& (ke>=-0.5)
muez=(2*ke)+1
muenm=-2*ke
muep=0
muepm=0
muen=0

```

```

elseif (ke<=0.0)&& (ke>=-0.5)
muez=(2*ke)+1
muenm=-2*ke
muep=0
muepm=0
muen=0
elseif (ke<-1)
muen=1
muenm=0
muez=0
muepm=0
muep=0
elseif (ke>1)
muep=1
muepm=0
muez=0
muenm=0
muen=0

```

```

if (kde<=1)&& (kde>=0.5)
mudep=(2*kde)-1
mudepm=(-2*kde)+2
mudez=0
mudenm=0
muden=0
elseif (kde<=0.5)&& (kde>=0)
mudepm=(2*kde)
mudez=(-2*kde)+1
mudep=0
mudenm=0

```

```

elseif (kde<=-0.5)&& (kde>=-1)
mudenm=2*kde+2
muden=(-2*kde)-1
mudep=0
mudez=0
mudepm=0
elseif (kde<-1)
muden=1
mudenm=0
mudez=0
mudepm=0

```

```

muden=0
elseif (kde<=0.0)&& (kde>=-0.5)
mudez=(2*kde)+1
mudenm=-2*kde
mudep=0
mudepm=0
muden=0

mudep=0
elseif (kde>1)
mudep=1
mudepm=0
mudez=0
mudenm=0
muden=0

if (muen<=muden)      %Kural 1
w1=muen
wtoplam1=w1
wctoplaml1=1*w1
elseif(muden<=muen)
w1=muden
wtoplam1=w1
wctoplaml1=1*w1
end

if (muep<=mudep)      %Kural
25
w25=muep
wtoplam25=w25
wctoplaml25=-1*w25
elseif(mudep <=muep)
w25= mudep
wtoplam25=w25
wctoplaml25=-1*w25
end

wt=
wtoplam1+wtoplam2+wtoplam3+wtoplam4+wtoplam5+wtoplam6+wtoplam7+
wtoplam8+wtoplam9+wtoplam10+wtoplam11+wtoplam12+wtoplam13+wtopl
am14+wtoplam15+wtoplam16+wtoplam17+wtoplam18+wtoplam19+wtoplam
20+wtoplam21+wtoplam22+wtoplam23+wtoplam24+wtoplam25
wct=
wctoplaml1+wctoplaml2+wctoplaml3+wctoplaml4+wctoplaml5+wctoplaml6+wcto
plaml7+wctoplaml8+wctoplaml9+wctoplaml10+wctoplaml11+wctoplaml12+wctop
lam13+wctoplaml14+wctoplaml15+wctoplaml16+wctoplaml17+wctoplaml18+wct
oplaml19+wctoplaml20+wctoplaml21+wctoplaml22+wctoplaml23+wctoplaml24+
wctoplaml25
u= wct/ wt

```

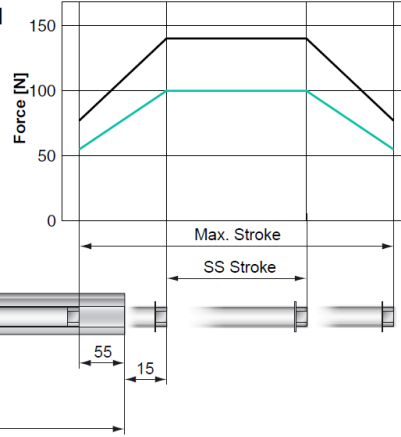
EK 3: Arazi deneyleri WSP kart ıslak alanı yüzdesi hesaplama programı

```
Image = imread('resim.jpg');  
BW = im2bw(Image,0.45);  
  
nBlack = sum(BW(:))  
nWhite = numel(BW) - nBlack  
kaplama_alani=(nWhite/nBlack)*100  
  
subplot(2,1,1);imshow(Image)  
subplot(2,1,2);imshow(BW)
```

EK 4: Yüksek performanslı PMTLISM özellikleri

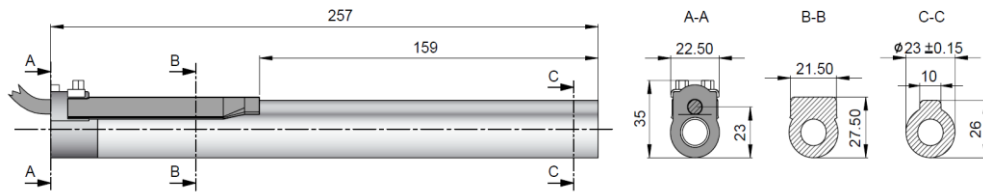
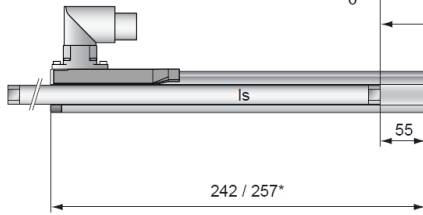
P01-23x160H-HP **LinMo**

Peak Force: 137N
Max. Stroke: 690

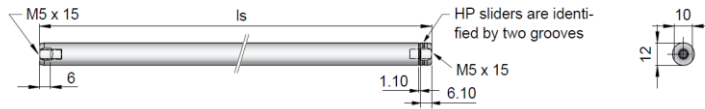


Motor Connector Wiring
Cable Length:
P01-23x160...-HP-R20 0.2m

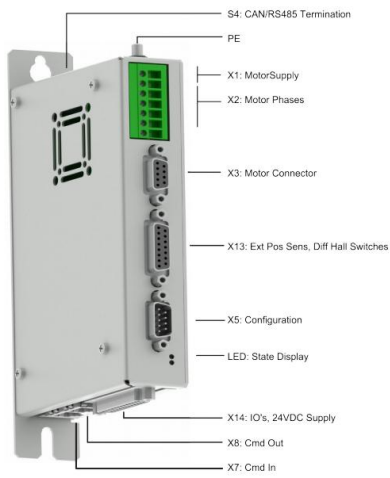
Ph 1+	red
Ph 1-	pink
Ph 2+	blue
Ph 2-	gray
+5VDC	white
GND	inner Shield
Sine	yellow
Cosine	green
Temp.	black
Shield	outer Shield



PL01-12x...-HP

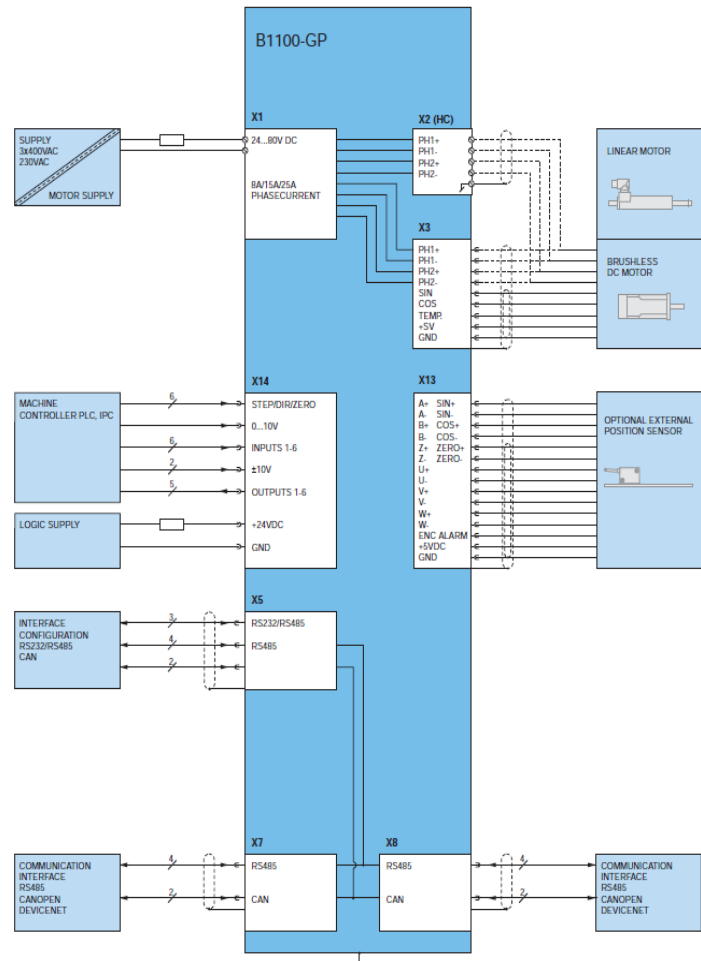


EK 5: Servo sürücü özellikleri

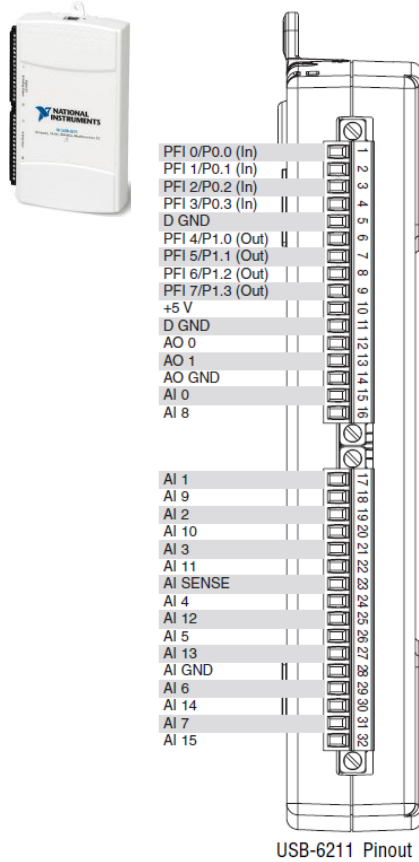


Technical Specifications

Interface	CanOpen, LinRS
Motor Supply	24..72 VDC
Motor Current	8 A
Analog Inputs 0..10V	1
Analog Inputs +-10V	1
Digital In and Outputs	6 / 6



EK 6: Veri toplama kartı özellikleri



NI USB-6211 M Series Multifunction DAQ, Bus-Powered

Analog Input	
Channels	16
Resolution	16 bits
Sample Rate	250 kS/s
Max Voltage	10 V
Maximum Voltage Range	-10 V , 10 V
Maximum Voltage Range Accuracy	2.69 mV
Analog Output	
Channels	2
Resolution	16 bits
Max Voltage	10 V
Maximum Voltage Range	-10 V , 10 V
Maximum Voltage Range Accuracy	3.512 mV
Update Rate	250 kS/s
Current Drive Single	2 mA
Bidirectional Channels	0
Input-Only Channels	4
Output-Only Channels	4
Current Drive Single	16 mA
Maximum Input Range	0 V , 5.25 V
Maximum Output Range	0 V , 3.8 V
Counter/Timers	
Counters	2
Maximum Range	0 V , 5.25 V
Max Source Frequency	80 MHz
Resolution	32 bits

EK 7: Tekerlek tip artımlı enkoder özellikleri

ENC Series

Wheel type of Incremental Rotary Encoder

■ Features

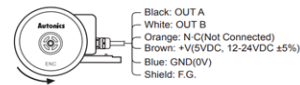
- Suitable for measuring the length or speed of target moving successively by wheel type
- The output waveform according to measuring distance is proportional to the unit of International Measurement type (Meter or inch)
- Power supply : 5VDC, 12-24VDC ±5%

■ Applications

- Various packing machine, sheet manufacturing, textile machinery, and general industrial machinery etc.

■ Connections

◎ Cable type



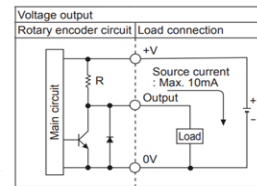
Counter clockwise(CCW)
※Unused wires must be insulated.
※The metal case and shield wire of encoder must be grounded(F.G.)

◎ Connector cable type

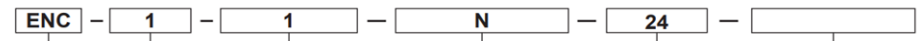
Pin No	Cable color	Function
①	Black	OUT A
②	White	OUT B
③	Orange	N.C
④	Brown	+V
⑤	Blue	GND
⑥	Shield	F.G.

※F.G.(Field Ground) : It must be grounded separately.

Autonics



information



Series	Output phase	Min. measuring unit	Output	Power supply	Cable
Wheel type	1 : A, B phase	1 : 1mm 3 : 1m 5 : 0.1yd	2 : 1cm 4 : 0.01yd 6 : 1yd	T : Totem pole output N : NPN open collector output V : Voltage output	5 : 5VDC ±5% 24 : 12-24VDC ±5%

※Cable length : 250mm

EK 8: Ultrasonik mesafe sensörü özellikleri

SICK

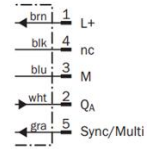
Sensor Intelligence.

UM30-213113 | UM30
ULTRASONIC SENSORS



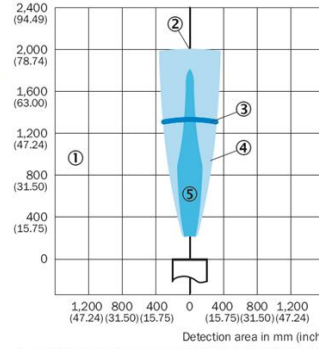
Connection diagram

UM30-21x113 Connector M12, 5-pin



Detection area

Detection area in mm (inch)



- ① Detection range dependent on reflection properties, size, and alignment of the object
- ② Limiting range
- ③ Operating range
- ④ Example object: aligned plate 500 mm x 500 mm
- ⑤ Example object: pipe with 27 mm diameter

Performance

Operating range, limiting range	200 mm ... 1,300 mm, 2,000 mm
Target	Natural objects
Resolution	≥ 0.18 mm
Repeatability	± 0.15 % ¹⁾
Accuracy	± 1 % ^{1) 2)}
Temperature compensation	✓
Response time	92 ms
Output time	23 ms
Ultrasonic frequency (typical)	200 kHz

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet ILICA, 1974 yılında Manisa'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Manisa'da tamamladı. Abant İzzet Baysal Üniversitesi Düzce Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği bölümünden 2002 yılında mezun oldu. 2002 yılında Dumlupınar Üniversitesi Simav Meslek Yüksekokulunda öğretim görevlisi olarak çalışmaya başladı. Yüksek lisans eğitimini Dumlupınar Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde 2008 yılında tamamladı. Halen Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalında doktora eğitimine devam etmektedir.