



**TARLA PÜLVERİZATÖRÜ İÇİN  
TELESKOPİK KANAT TASARIMI**

**Hasan Berk ÖZYURT**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. İlker Hüseyin ÇELEN**

**2021**

**T.C.**  
**TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TARLA PÜLVERİZATÖRÜ İÇİN TELESKOPİK KANAT TASARIMI**

**Hasan Berk ÖZYURT**

**BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN: Prof. Dr. İlker Hüseyin ÇELEN**

**TEKİRDAĞ-2021**

**Her hakkı saklıdır.**





Bu tez ..... (TÜBİTAK / SANTEZ / NKÜBAP vb.) ..... tarafından  
..... numaralı proje ile desteklenmiştir.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TARLA PÜLVERİZATÖRÜ İÇİN TELESKOPIK KANAT TASARIMI

**Hasan Berk ÖZYURT**

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İlker Hüseyin ÇELEN

Tarımda pestisit kullanımının artışıyla beraber, pestisit uygulamalarının verimliliği önemli hale gelmiştir. Pestisit uygulamalarında en önemli bileşenlerin başında ilaçlama makineleri gelmektedir. Pülverizatörler, pestisitlerin bitki üzerine homojen bir şekilde püskürtülmesi amacıyla kullanılmaktadır. Tarla tipi ilaçlama makinelerinde, ilaçlama bumu, pestisitlerin hedef yüzey üzerine homojen dağılması açısından önemli yere sahiptir. İlaçlama düzgünlüğünü bozacak ilaçlama kanatları üzerine etkiyen momentlerin sönümlenmesi için bum tasarımı kritik öneme sahiptir. Bu sebeple, yapılan çalışmada 12 metre iş genişliğine sahip 24 adet püskürtme memesini taşıyabilecek, teleskopik olarak katlanabilir 5 adet parçadan oluşan bir ilaçlama makinesi bumu tasarlanmıştır. Tasarımda malzeme olarak St-37 kare profil ve St-52 çelik bükme saçlar, özel şekillendirilerek kullanılmıştır. Bum parçalarının birbiri üzerinde izafi hareketi radyal bilyalı rulmanlarla yataklanan hareket tekerlekleri ile sağlanmıştır. Hareket, bir elektrik motorunun çıkış miline bağlanan düz dişlinin, bir kremayer üzerinde bağlı olduğu kanat parçasını ilerletmesiyle sağlanmıştır.

Tasarımın dayanımını test etmek için, Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak Solidworks programında simülasyon modülünde yapısal statik analizler yapılmıştır. Bu analizlerde, her kanat parçası, hareket tekerlekleri ve kanatların pülverizatöre bağlantı lamaları ayrı ayrı incelenmiştir. Serbest cisim diyagramları yardımıyla X-Y ve Y-Z düzleminde kanatlar üzerine etkiyen kuvvetler hesaplanmıştır. Analizlerde, öncelikle mesnet noktaları belirlenmiş, daha sonra ağırlık ve dış kuvvetler tanımlanmıştır. Mesh oluşturma işleminden sonra analizler yürütüldüğünde Von-Mises gerilmeleri ve yer değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Analiz sonuçlarına göre kritik gerilmelerin olduğu bölgeler belirlenmiş, gerekli yerlerde tasarım iyileştirmesi yapılmıştır. Son olarak cıvata kesme hesapları ve rulman ömür hesapları yapılarak tasarımın mukavemeti kontrol edilmiştir. Tasarım ve yapısal analizlerden sonra pülverizatör kanatlarının üretim aşamasına geçilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** tarla pülverizatörü, ilaçlama kanadı, sonlu elemanlar analizi, Solidworks

## ABSTRACT

MSc. Thesis

DESIGNING A TELESCOPIC BOOM FOR FIELD SPRAYERS

**Hasan Berk ÖZYURT**

Tekirdağ Namık Kemal University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Biosystems Engineering

Supervisor: Prof. Dr. İlker Hüseyin ÇELEN

The efficiency of the pesticide applications has become an important issue with the increasing amount of pesticide usage in agriculture around the world. One of the most vital components of the pesticide applications is sprayer. Sprayers are used to spray the pesticides over the target organism homogeneously. Sprayer boom is a crucial component of the field sprayers with regards to spraying homogeneity. In order to eliminate the yaw and roll moments on the sprayer booms, the design of those components is crucial. For that reason, a sprayer boom consists of 5 parts that holds 24 flat fan nozzles, telescopically foldable was designed. Materials used in the boom design are St-37 welded square and St-52 bended sheet metal. The relative motion of the boom parts is provided by wheels that are beared with radial ball bearings. The propulsion is created with the rack-pinion mechanism and a DC motor.

In order to examine the strength of the design, static structural analysis are carried out in Solidworks-Simulation module by using Finite Elements Method (FEM). All boom parts, wheels and boom-chassis support points are investigated individually. All forces affected on the boom parts both on X-Y and Y-Z planes are calculated with the help of the free-body diagrams. Support points, gravity and external forces are applied before the analysis carried out. Then, meshes are created. After the mesh creation, the analysis are carried out and Von-Mises stress and displacement graphs are created. According the graphical results, critical zones on the boom parts are identified and design improvement are performed when necessary. Finally, bolt shear stresses and bearing fatigue are calculated. After the design and structural analysis, the boom was manufactured in a workshop

**Key words:** field sprayer, sprayer boom, finite element analysis, Solidworks

2021, 111 pages

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER.....</b>	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL DİZİNİ.....</b>	<b>vi</b>
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR.....</b>	<b>ix</b>
<b>TEŞEKKÜR .....</b>	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Tarla Pülverizatörleri .....	8
1.1.1. Depo.....	9
1.1.2. Pompa .....	10
1.1.3. Filtreler .....	10
1.1.4. Armatürler ve Regülatörler.....	11
1.1.5. Memeler.....	12
1.1.6. Püskürtme Çubukları (Bum, Kanat) .....	14
<b>2. LİTERATÜR ÖZETİ.....</b>	<b>20</b>
<b>3. MATERYAL - YÖNTEM.....</b>	<b>27</b>
3.1. Materyal.....	27
3.1.1. Pülverizatör.....	27
3.1.2. Püskürtme Sistemi .....	28
3.1.3. Yapı Elemanları .....	29
3.1.4. Kanat Tasarımında Kullanılan Elemanlar .....	31
3.1.5. Teleskopik Hareket Mekanizması .....	31
3.1.6. Sönümleyici Yaylar .....	33
3.1.7. Solidworks Programı .....	35
3.2. Yöntem .....	35
3.2.1. Tasarım .....	39
3.2.2. Yükleme Hesaplamaları.....	52
3.2.3. Cıvata Hesaplamaları.....	62
3.2.4. Rulman Ömür Hesaplamaları .....	62
3.2.5. Sonlu Elemanlar Analizi.....	63
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>66</b>
4.1. Kuvvet Hesaplamaları .....	66

4.1.1. Ölçüler .....	66
4.1.2. Dış Kanada Etkiyen Kuvvetler .....	69
4.1.3. Orta Kanada Etkiyen Kuvvetler.....	70
4.1.4. Ana Kanada Etkiyen Kuvvetler .....	71
4.2. Sonlu Elemanlar Analizleri Sonuçları .....	72
4.2.1. Dış Kanat Analiz Sonuçları .....	72
4.2.2. Orta Kanat Analiz Sonuçları.....	74
4.2.3. Ana Kanat Analiz Sonuçları .....	77
4.2.4. Hareket Tekerlekleri Analiz Sonuçları .....	83
4.2.5. Kanat Taşıyıcı Profil Analizi Sonuçları.....	88
4.3. Civata Kesme Hesapları .....	90
4.4. Rulman Ömür Hesapları .....	92
<b>5. SONUÇ .....</b>	<b>94</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>96</b>



## **ÇİZELGE DİZİNİ**

Çizelge 3.1. St 37 ve St 52 Çeliklerinin Kimyasal İçerik Karşılaştırması (Khalifeh vd, 2018) .....	29
Çizelge 3.2. St37 ve St52 Çeliklerinin Mekanik Özellikleri (Seitl vd. 2020) .....	29
Çizelge 3.4. SKF 6202 Radyal Bilyalı Rulman Teknik Özellikleri .....	49
Çizelge 3.5. SKF 61900 Radyal Bilyalı Rulman Teknik Özellikleri .....	50



## ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 1.1. Dünya tarım alanlarının gösterimi (FAOSTAT,2020).....	2
Şekil 1.2. Birleşmiş Milletler Nüfus Projeksiyonu (BM,2019).....	2
Şekil 1.3. Tarım arazilerinin yıllara göre değişimi (FAOSTAT,2020) .....	3
Şekil 1.4. Ülkemizde pestisit kullanımının yıllara bağlı değişimi (FAOSTAT,2017).....	4
Şekil 1.5. Sırta Takılan Benzinli İlaçlama Makinesi (Anonim,2021a) .....	5
Şekil 1.6. Radyal Fanlı Bahçe Tipi Pülverizatör (Anonim,2021b) .....	6
Şekil 1.7. Kendi Yürür Tarla Pülverizatörü (Anonim,2021c).....	7
Şekil 1.8. Pervaneli Tek Motorlu İlaçlama Uçağı (Anonim,2021d) .....	7
Şekil 1.9. İlaçlama İçin Kullanılan İnsansız Hava Aracı (Anonim,2021e) .....	8
Şekil 1.10. Tarla Pülverizatörü (Anonim, 2021f).....	9
Şekil 1.11. Manuel (a) ve elektronik (b) kontrollü regülatörler (Anonim,2021g).....	11
Şekil 1.12. İlaçlama Kontrol Sistemi (Anonim,2021h).....	12
Şekil 1.13. Bir konik hüzmeli meme gövdesinin kesit görünüşü (Herbst, Osteroth, Fleer, Stendel, 2015).....	13
Şekil 1.14. Meyve Bahçeleri İlaçlamasında İlaç Sürüklenmesi (Anonim, 2021i) .....	14
Şekil 1.15. İlaçlama makinesi kanadının tarla ve yol konumlarındaki görüntüsü (Anonim,2021j) .....	15
Şekil 1.16. Tarla pülverizatörü kanat yapısı (Amazone Co,2020) .....	15
Şekil 1.17. Farklı tipte ve genişlikteki ilaçlama kanatları (Anonim, 2021k) .....	16
Şekil 1.18. Kanat hareketlerinin ilaç dağılımına etkisi (Anonim,2020k).....	17
Şekil 1.19. İlaçlama izlerinin ağacın etrafından dolanması (Anonim, 2021m).....	19
Şekil 3.1. Kullanılacak Pülverizatörün Katı Model Gösterimi.....	28
Şekil 3.2. Tekli meme başlığı (Anonim,2021n) .....	28
Şekil 3.3. St 37 ve St 52 Malzemelerin Gerilme-Şekil Değişirme Grafikleri Karşılaştırması (Khalifeh vd, 2018) .....	30
Şekil 3.4. Elektrik Motoru .....	33
Şekil 3.6. Burulma Yay Mekanizması.....	34
Şekil 3.7. Isı Tesiri Altındaki Bölge Oluşumu (Anonim,2021o).....	36
Şekil 3.8. Bir cıvata deliği etrafında oluşan gerilmeler (Savruk ve Kazberuk,2009).....	37
Şekil 3.9. İlaçlama Memelerinin Kanat Profili İçerisine Yerleştirildiği Tasarımlar (Anonim, 2021p).....	37
Şekil 3.10. Bir Rulmana Etkiyen Kuvvetler (Temiz, 2021) .....	38
Şekil 3.11. Tasarımın şematik olarak önden görünümü .....	39

Şekil 3.12. Teleskopik Kanat Sistemi Yol ve Çalışma Konumu.....	40
Şekil 3.13. Teleskopik Kanat Sistemi Çalışma Konumu .....	40
Şekil 3.14. Ana Kanat Ön Görünümü.....	42
Şekil 3.15. Ana Kanat Yan Görünümü (Sacların Bükümünü Göstermek amacıyla yan destek levhaları şeffaflaştırılmıştır.) .....	42
Şekil 3.16. Ana Kanat İzometrik Görünümü.....	42
Şekil 3.17. Orta Kanadın Ön Görünümü .....	43
Şekil 3.18. Orta Kanadın Yan Görünümü (Sacların Bükümünü Göstermek amacıyla yan destek levhaları şeffaflaştırılmıştır.) .....	44
Şekil 3.19. Orta Kanadın İzometrik Görünümü .....	44
Şekil 3.20. Dış Kanadın Ön Görünümü.....	45
Şekil 3.21. Dış Kanadın Yan Görünümü.....	46
Şekil 3.22. Dış Kanadın İzometrik Görünümü.....	46
Şekil 3.23. Dış Kanat (a) ve Orta Kanat (b) Hareket Tekerleklerinin Görünümü.....	47
Şekil 3.24. Orta Kanat Taşıyıcı Tekerleği Ön Görünümü.....	48
Şekil 3.25. Orta Kanat Taşıyıcı Tekerleği Kesit Görünümü .....	48
Şekil 3.26. Dış Kanat Taşıyıcı Tekerleğin Ön Görünümü .....	49
Şekil 3.27. Dış Kanat Taşıyıcı Tekerleğin Kesit Görünümü.....	50
Şekil 3.28. Yeni Bağlantı Lamalarının Yandan Görünümü .....	51
Şekil 3.29. Dengeleme Yaylarının Montaj Üzerinde Görünümü .....	51
Şekil 3.30. X-Y düzleminde çalışma pozisyonunda kütle merkezlerinin mesnetlere olan mesafeleri.....	52
Şekil 3.31. Y-Z düzleminde çalışma pozisyonunda kütle merkezlerinin mesnetler olan mesafeleri ve etkiyen kuvvetler.....	53
Şekil 3.32. Dış Kanadın X-Y Düzlemindeki Serbest cisim diyagramı .....	54
Şekil 3.33. Dış Kanadın Y-Z Düzlemindeki Serbest Cisim Diyagramı .....	55
Şekil 3.34. Orta Kanadın X-Y Düzlemindeki Serbest Cisim Diyagramı .....	57
Şekil 3.35. Orta Kanadın Y-Z Düzlemindeki Serbest Cisim Diyagramı.....	58
Şekil 3.36. Ana Kanadın X-Y Düzlemindeki Serbest Cisim Diyagramı.....	60
Şekil 3.37. Ana Kanadın Y-Z Düzlemindeki Serbest Cisim Diyagramı.....	61
Şekil 3.38. Bir parçanın Solidworks Simulasyon Modülünde Gerilme Analizi (Anonim,2021r) .....	64
Şekil 4.1. 24 m bum genişliğine sahip ilaçlama makinesinin tümsekten geçmesi sonrası bumun en uç noktasındaki ivme grafiği (Jeon vd.2004). .....	68
Şekil 4.2. Dış Kanatta Oluşturulan Meshler .....	72

Şekil 4.3. Dış Kanat Von-Mises Gerilmeleri.....	73
Şekil 4.4. Dış Kanadın Maksimum Gerilmeye Maruz Kalan Bölgesi.....	73
Şekil 4.5. Dış Kanat Yer Değiştirme Grafiği.....	74
Şekil 4.6. Orta Kanatta Oluşturulan Meshler, Mesnet Noktaları ve Harici Yükler.....	75
Şekil 4.7. Orta Kanadın Von-Mises Gerilme Grafiği.....	75
Şekil 4.8. Orta Kanat Üzerinde Maksimum Gerilmeye Maruz Kalan Bölgeler.....	76
Şekil 4.9.Orta Kanat Yer Değiştirme Grafiği.....	77
Şekil 4.10. Ana Kanatta Oluşturulan Meshler, Mesnet Noktaları ve Harici Yükler .....	78
Şekil 4.11. Ana Kanadın Von-Mises Gerilme Grafiği .....	78
Şekil 4.12. Üçgen Lama Desteği Eklenmesi Sonucu Oluşan Von-Mises Gerilme Grafiği.....	79
Şekil 4.13. Üçgen Lama Desteği ve Çapraz Destek Profilleri Eklenmesi Sonucu Oluşan Von-Mises Gerilme Grafiği .....	80
Şekil 4.14. Ana Kanat Üzerindeki İyileştirmeler Sonucu Oluşan Maksimum Gerilme Bölgesi .....	80
Şekil 4.15. Orta Kanadın Ray Sacında Oluşan Maksimum Gerilmeler .....	81
Şekil 4.16. Ana Kanat İlk Tasarımının Yer Değiştirme Grafiği.....	82
Şekil 4.17. Ana Kanat İlk İyileştirme Sonrası Yer Değiştirme Grafiği.....	82
Şekil 4.18. Ana Kanat İkinci İyileştirme Sonrası Yer Değiştirme Grafiği.....	83
Şekil 4.19. Orta Kanat Hareket Tekerleklerinde Oluşturulan Meshler, Mesnet Noktaları ve Harici Yükler .....	84
Şekil 4.20. Dış Kanat Hareket Tekerleklerinde Oluşturulan Meshler, Mesnet Noktaları ve Harici Yükler .....	84
Şekil 4.21. Orta Kanat Hareket Tekerleğinin Von-Mises Gerilme Grafiği.....	85
Şekil 4.22. Dış Kanat Hareket Tekerleğini Von-Mises Gerilme Grafiği .....	86
Şekil 4.23. Orta Kanat Hareket Tekerleği Yer Değiştirme Grafiği .....	87
Şekil 4.24. Dış Kanat Hareket Tekerleği Yer Değiştirme Grafiği.....	87
Şekil 4.25. Kanat Sistemi ve Asansör Şasisi Bağlantısı.....	88
Şekil 4.26. Kanat Sistemi ve Asansör Şasisi Bağlantı Lamalarında Oluşturulan Meshler, Mesnet Noktaları ve Harici Yükler .....	89
Şekil 4.27. Kanat Sistemi ve Asansör Şasisi Bağlantı Lamaları Von-Mises Gerilme Grafiği.....	89
Şekil 4.28. Kanat Sistemi ve Asansör Şasisi Bağlantı Lamaları Yer Değiştirme Grafiği.....	90
Şekil 4.29. DIN 267'ye Göre Cıvata ve Somunlar için Mukavemet ve Sertlik Değerleri (Anonim,2021s).....	92

## SİMGELER VE KISALTMALAR

MPa	: Megapaskal
Kg	: Kilogram
N	: Newton
HAZ	: Heat Affected Zone – Isı Tesiri Altındaki Bölge
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
FEM	: Finite Elements Method – Sonlu Elemanlar Metodu
$\tau$	: Kesme Gerilmesi
DIN	: Deutsches Institut für Normung – Alman Standartları Enstitüsü
HB	: Hardness Brinell
kN	: Kilonewton
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
BM	: Birleşmiş Milletler
FAO	: Food and Agriculture Organization – Gıda ve Tarım Örgütü
FAOSTAT	: Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database – Gıda ve Tarım Örgütü Kurumsal İstatistikler Veritabanı

## TEŞEKKÜR

İlaçlama uygulamalarının kalitesini ÷lkemizde iyileőtirmek için önümüzde kat etmemiz gereken uzun bir yol bulunmaktadır. Yazdığım bu tez ile ve ürettiğimiz bu tasarım ile bu yolda küçük de olsa bir katkı olsun istedim. Gelecekte yapılacak çalışmalar ile, ilaçlama uygulamalarının daha iyi koşullar altında yapılabilmesini sağlayacak bir çok tasarım ve fikir ortaya çıkacağına eminim.

Yüksek lisans aşaması başından sonuna kadar kolay bir süreç değildi. Bu yolda en büyük yol göstericim olan Prof. Dr. İlker Hüseyin ÇELEN hocama sonsuz teşekkürlerimi sunuyor, beraber yapacağımız bir çok çalışma için şimdiden heyecan duyuyorum.

Tasarımın üretim aşamasında bizi destekleyen Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi'ne ve Nedimler Ziraat Aletleri A.Ş. ekibine yardımları için teşekkür ediyorum.

Hayatımın her anında, aldığım her kararda, başarılarımda, başarısızlıklarında yanımda olan canım aileme; her zaman desteğini, varlığını ve sevgisini hissettiğim Selin'e ve lisans hayatımdan beri yanımda olan meslektaşım ve dostum Fatih'e, her zaman yanımda olduğunuz için teşekkür ederim.

Haziran, 2021

Hasan Berk ÖZYURT  
Makine Mühendisi

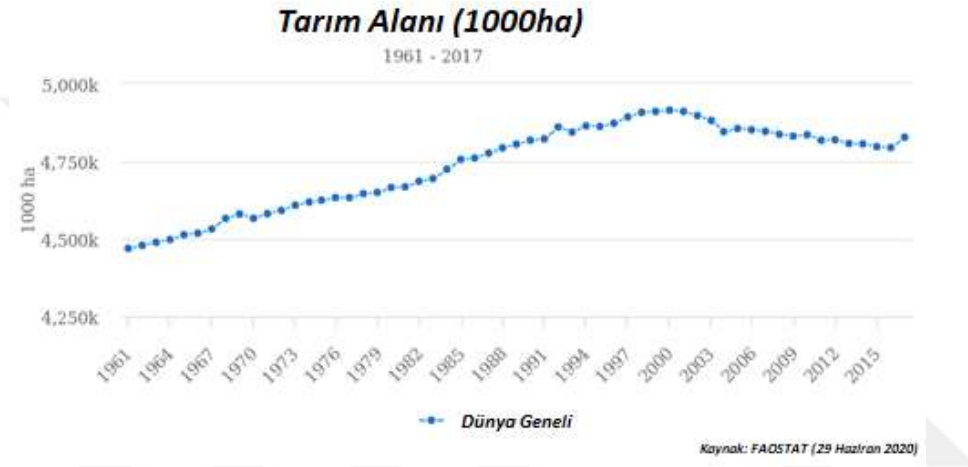
## 1. GİRİŞ

İnsanlar, yaşamsal faaliyetlerini devam ettirebilmek için beslenmeye ihtiyaç duymaktadır. Geçmişten günümüze, insanların beslenme şekilleri farklılık göstermiştir. Tarihte bilinen ilk insanlar, hayvanları çeşitli yöntemlerle avlayarak veya yaşadığı çevredeki bitkilerin yenebilecek kısımlarını tüketerek beslenme ihtiyaçlarını karşılamışlardır. Bu süreçte göçebe bir yaşam süren insanoğlu, hayvan avlamanın ve gelişigüzel bitki toplamanın her zaman riskli olduğunun bilincindeydi. Daha sonraları insanlar, doğada gördükleri bitkileri kendi kontrollü çevrelerinde yetiştirebileceğini keşfetti ve böylece tarım yapmayı öğrendi.

Tarım, insanlara günlük besin kaynaklarını güvenli yoldan elde edebilme olanağı sunuyordu. Hayvan avlamak gibi uğraştırıcı ve riskli değildi. Tohumu toprağa yerleştiriyorlardı ve bir zaman sonra kendiliğinden meyveleri oluşuyordu. Ayrıca bunun için her an yer değiştirmelerine gerek de yoktu. Böylece yerleşik hayata geçtiler ve bitkisel besin kaynaklarından faydalanmanın tadına vardılar. Her geçen zaman tarımı giderek daha profesyonelce ve bilinçli yapmaya başladılar. Önce çapa, kazma, kürek gibi el aletlerini geliştirdiler. Nüfus artışı ve besin ihtiyacının artışıyla daha büyük arazilerde tarım yapmaya başladılar. Bu işin insan eliyle yavaş ve zor olduğunu anlayınca, hayvanları güç kaynağı olarak kullanmak akıllarına geldi ve sabanı keşfettiler. İki öküz tarafından çekilen ve toprağı kolayca işleyebilen saban ile, on insanın bir günde yaptığı işi, iki öküz ve bir insanla yapmayı öğrendiler.

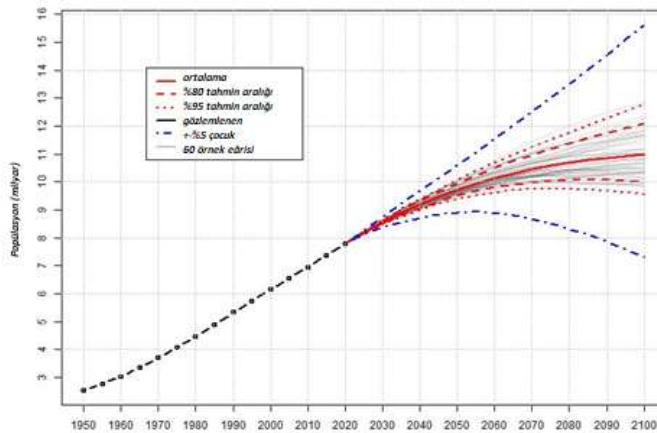
Sanayi devrimine kadar tarımda alet ve makine kullanımı saban ve türevlerini içerse de devrimden sonra her sektörde olduğu gibi tarım sektörü de payını aldı. Hayvan ve insan gücünün hızla artan insan nüfusuna daha önce olduğu gibi yetersiz kaldığını fark ettiler ve tarlayı işleyecekleri ekipmanları çekmek için buhar gücünden yararlanmayı keşfettiler. Dünya literatüründe traktör diye tabir edilen makinelerinin atası, buhar basıncıyla dönme momenti yaratıp, pulluk çeken makineler olarak tarihe geçti. 19. yy. sonlarında içten yanmalı motorların keşfiyle beraber, buhar gücü kendini dizel ve benzinli motorlara bıraktı ve bir sürücüyü, motora ve aktarma organları ile beraber çeki gücü üreten üniteye sahip, günümüzde tasarımsal şeklini koruyabilen traktörler ortaya çıktı. Güç kaynağı olarak traktör kullanımı ile beraber, tarımda yapılan her uygulama, traktör tarafından çekilen veya traktörden güç alan makinalarla yapılmaya başlandı. Günümüzde dünya tarımında insan veya hayvan gücünden başka alternatifi olmayan çok az sayıda tarımsal uygulama kalmıştır.

Dünyada insan nüfusunu beslemek için yapılan tarımsal uygulamalarda ulaşılan rakamlara göz atacak olursak, artık için ne kadar büyük boyutlara geldiğini anlayabiliriz. Bu makalenin yazıldığı anda, dünya nüfusunu canlı olarak sayan sayaçtan alınan verilere göre, dünya üzerinde 7.791.364.000 insan yaşamaktadır ve bu cümleyi yazarken 120 insan daha doğmuştur. Dünyada bu insan popülasyonunu beslemek için 4.827.000 ha büyüklüğünde tarım alanı mevcuttur (FAOSTAT,2017). Bu rakam da kentleşme, kuraklık, erozyon, küresel ısınma, bilinçsiz tarım uygulamaları gibi sebeplerle her yıl azalmaktadır (Şekil 1.1.).



Şekil 1.1. Dünya tarım alanlarının gösterimi (FAOSTAT,2020)

Birleşmiş Milletler nüfus projeksiyonuna göre insan nüfusu 2050’de 11 milyar olarak öngörülmektedir.



Şekil 1.2. Birleşmiş Milletler Nüfus Projeksiyonu (BM,2019)



Aynı şekilde tarım arazilerinin de azalması beklenmektedir. Dünyadaki tarımsal üretim şu an insanlığın beslenmesine yeterli olsa da 2050 yılındaki öngörülere göre, bitkisel ve hayvansal üretimdeki verimin %50 artması gerekmektedir. Bunun gerçekleşmesi için, tarım teknolojilerinin gelişimi önem arz etmektedir ve bilim adamlarının bu konuda yaptığı çalışmalar değer kazanmaktadır.

Ülkemiz de cumhuriyetin kurulmasından bu yana, tarım ve tarıma dayalı sanayisi ile var olmaya devam etmektedir ve bir tarım ülkesi olarak anılmaktadır. Artan nüfusumuz ve bununla ters orantılı olarak küçülen tarım arazilerimizle de dünyanın genelinden farkımız yoktur. Ülkemizin tarımsal üretimine baktığımızda, 37.712.000 ha alanda tarımsal üretim gerçekleşmektedir. (Şekil 1.3.).



Şekil 1.3. Tarım arazilerinin yıllara göre değişimi (FAOSTAT,2020)

Tarımsal üretimde güç kaynağı olarak 1.354.000 adet traktör ve diğer önemli bir tarım makinesi olarak 17.190 adet biçerdöver kullanılmaktadır. (TÜİK,2019)

Dünyada, tarımsal üretimin verimini arttırabilmek amacıyla izlenen yollardan biri de pestisit kullanımınıdır. Pestisit kullanımının tarihi M.Ö. 2000 yılında Mezopotamya’da Sümerlilere dayanmaktadır. Tarımsal üretimde çeşitli zararlıların yarattığı kaybı önlemek amacıyla ilk kimyasal kullanmışlardır. Bunun kanıtı, arkeolojik kazılarda bulunan kükürt kalıntılarıdır. Kükürt ile bit ve böcekleri öldürmeyi amaçlamışlardır (Felsott vd.,2010).

Ülkelerarası savaşlar da pestisitlerin tarımda kullanılma sürecine katkı sağlamıştır. İkinci Dünya Savaşı'nda düşmana karşı kullanılmak üzere araştırmaları yapıp geliştirilen kimyasallar, savaş sonrasında Amerika Birleşik Devletleri'nde yabancı ot ve böcekleri de öldürme yetenekleri sayesinde tarım ilacı olarak piyasaya sürülmüştür

Tarımın neredeyse başından beri kullanılmakta olan pestisitler, günümüzde tarımda mekanizasyondan sonra en fazla girdi oluşturan uygulamaların başında gelmektedir (Çelen ve Demir,2006). Ülkemizde yaklaşık 54.098 ton pestisit kullanılmıştır (FAO,2017). Şekil 1.4.'teki grafikte görüleceği üzere, pestisit kullanımını son 10 yıldır artış trendindedir.



Şekil 1.4. Ülkemizde pestisit kullanımının yıllara bağlı değişimi (FAOSTAT,2017)

Pestisitler, genellikle traktöre monte edilebilen veya sırtta taşınan pülverizatörler tarafından uygulanmaktadır. Son yıllarda kendi yürür ilaçlama makineleri de piyasaya sürülmüştür. Üzerindeki ilaç deposunda önceden hazırlanan ilaç-su homojen çözeltisinin, bir pompa yardımıyla, uygun basınçta ve debide, memeler yardımıyla bitki üzerine püskürtülmesi prensibi ile çalışmaktadır. Uygulama alanına göre (tarla, bağ, bahçe veya sera) farklı pülverizatör tipleri kullanılmaktadır.

Sırt takılan ilaçlama makineleri, traktörün giremeyeceği eğimli, dar arazilerde veya sık yapraklı bahçelerde kullanılmaktadır. Sırt çantası gibi insan sırtına takılabilen bu makineler iki şekilde işlev görür. İlk olarak, kullanıcının kol kuvvetiyle yarattığı pompalama etkisi ile püskürtme sağlanır. İkinci tipte de, pompalamayı sağlayan elektrikli veya benzinli motor

yardımıyla püskürtme işlemi yapılmaktadır. Ülkemizde resmi olarak kayıtlı 656,669 adet sırt pülverizatörü bulunmaktadır. (TÜİK,2019). Şekil 1.5.'te bir sırt pülverizatörü görülmektedir.



Şekil 1.5. Sırt Takılan Benzinli İlaçlama Makinesi (Anonim,2021a)

Bir diğer ilaçlama makinesi türü de, bahçe tipi ilaçlama makineleridir. Bu tarz makineler genellikle meyve bahçelerinde ve bağlarda kullanılır. Tarla tipi ilaçlama makineleriyle benzerlik taşımakla beraber, en belirgin farkı memelerin dairesel bir bum üzerine yerleştirilmiş olmasıdır. Ayrıca püskürtülen ilaçlama sıvısının yüksek dallara ve bitki kanopisinin derinlerine kadar ulaşması amacıyla, yardımcı hava akımı kullanılır. Püskürtülen sıvı hedef ağaçlara doğru yüksek hızda hava ile ittilir. Bu şekilde yüksek ağaçlara veya geniş yapraklı bitkilere ilacın tam nüfuz etmesi sağlanır.. Ülkemizde resmi olarak kayıtlı 124.950 adet yardımcı hava akımlı atövizör tipli ilaçlama makinesi bulunmaktadır (TÜİK,2019). Şekil 1.6.'da radyal fanlı bir bahçe tipi ilaçlama makinesi görülmektedir.



Şekil 1.6. Radyal Fanlı Bahçe Tipi Pülverizatör (Anonim,2021b)

Dünyada tarım arazilerinin büyümesi, zamandan tasarruf ihtiyacının artmasıyla, tarım makinelerinin iş kapasitelerinin de artması ihtiyacını doğurmuştur. Normal şartlarda, bir ilaçlama makinesinin traktöre takılması ve traktör kuyruk milinden hareket alması yeterli iken, artan iş kapasitesi ihtiyacı ile, traktörden bağımsız, kendi motoru ve aktarma organlarına ve sürücü kabineğine sahip, traktöre takılır ilaçlama makinelerinden daha fazla iş kapasitesine sahip kendi yürür ilaçlama makineleri kullanılmaya başlanmıştır.

Çalışma prensibi olarak konvansiyonel tarla pülverizatörlerinden fazla farkları yoktur. Ancak artan kanat genişliği sebebiyle, yatay ve dikey hareketleri sönmölemek için özel süspansiyon ve cimbal sistemleri ile donatılmaları gerekmektedir. Ayrıca sürücü hatalarını elimine etmek için uydu kontrollü otomatik dümenleme sistemleri de bu tarz ilaçlama makinelerinde standart olarak sunulmaktadır. Bunlara ek olarak, otomatik dolum sistemleri, ön dolum ünitesi, otomatik karışım oranı oluşturma üniteleri de bu makinelerde kullanılmaktadır. Şekil 1.7.'de bir kendi yürür ilaçlama makinesi görölmektedir.



Şekil 1.7. Kendi Yürür Tarla Pülverizatörü (Anonim,2021c)

Günümüzde ülkemizde kullanımı yasaklanmış olsa da, uçak ile ilaçlama dünyanın çeşitli bölgelerinde geniş alanların ilaçlanmasında kullanılan yöntemdir. Ülkemizde çeltik alanlarında karadan ilaçlamanın zor olduğu alanlarda özel izinlerle kullanılabilir. 2019 TÜİK verilerine göre ülkemizde kayıtlı 5 adet ilaçlama uçağı bulunmaktadır. Şekil 1.8.'de bir ilaçlama uçağının çalışması gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Pervaneli Tek Motorlu İlaçlama Uçağı (Anonim,2021d)

İnsansız hava araçlarının son on yılda hızlıca gelişmesinden tarım sektörü de faydalanmaya başlamıştır. Bu teknolojinin tarıma en büyük uygulamalarından biri, ilaçlama amaçlı dizayn edilen dronlardır. İlaçlama dronları, üzerinde kapasiteye göre değişen bir ilaç

deposu, elektronik pompa ve püskürtme memelerinden oluşan, kaldırma kuvveti ihtiyacına göre pervane sayısı 12 adede kadar çıkabilen insansız hava araçları olarak tarımda kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 1.9.)



Şekil 1.9. İlaçlama İçin Kullanılan İnsansız Hava Aracı (Anonim,2021e)

### 1.1. Tarla Pülverizatörleri

Bitki koruma makinelerinde, ülkemizde en çok tercih edilen tip, traktör askı kollarına takılan tarla pülverizatörleridir (Bayat ve İtmeç, 2018). Bu tipteki ilaçlama makineleri, kısa boylu, tek yıllık buğday, ayçiçeği, kanola, mısır, soya, pamuk gibi tarla bitkilerini üstten püskürtme yoluyla ilaçlamaktadır. Depodaki ilaç çözeltisi, pompa yardımıyla belirli iş genişliğine sahip kanat üzerine eşit aralıklarla yerleştirilmiş püskürtme memelerine ilaçlama boruları vasıtası ile iletilerek bitki üzerine püskürtülür. Ülkemizde resmi olarak kayıtlı 365.171 adet kuyruk milinden hareketli ilaçlama makinesi bulunmaktadır (TÜİK,2019). Şekil 1.10'da bir tarla pülverizatörü görülmektedir.



Şekil 1.10. Tarla Pülverizatörü (Anonim, 2021f)

Tarla pülverizatörlerinin ana organlarını depo, pompa, filtre, bum ve memeler, şasi, armatür ve regülatörler olarak sıralayabiliriz. İlaç deposu kapasitesin 1000-1200 litreye kadar olan tarla pülverizatörleri genellikle traktörün üç nokta askı sistemine bağlanarak kullanılmaktadır.

İlaç deposu kapasitesi ve iş genişliği daha fazla olan ilaçlama makineleri, traktöre aşırı yük bindirmemek ve buna bağlı olarak toprak sıkışmasını arttırmamak amacıyla çekilir tip olarak imal edilirler. Bu tip pülverizatörlerde ana yapı elemanları asılır tiplerle benzerlik göstermekle beraber, makinenin şasisi römorka benzer şekilde imal edilir ve diğer yapı elemanları bu şasinin üzerine oturtulur. Kapasiteye göre tek ve iki dingile bağlanan lastik tekerlekler makineyi taşır, makine çeki oku vasıtasıyla traktöre bağlanarak çekilir. Traktöre asılır tip ve traktörle çekilir tip ilaçlama makinelerinde kullanılan ana elemanlar depo, pompa, filtreler, regülatör-armatürler, püskürtme çubukları ve memelerdir.

### 1.1.1. Depo

İlaçlama makinelerinde ilaç ve su karışımının bulunduğu bölümdür. Makinenin ana şasisine oturtularak cıvata veya kayışlarla şasiye bağlanır. İlacın aşındırıcı ve zararlı etkilerine karşı genellikle polietilen ve polyester malzemelerden yapılmaktadır. İç ve dış yüzeyleri kolay bir temizlik için pürüzsüz ve şekil olarak düzgün yapıdadır. Traktör büyüklüğü, iş kapasitesi

gibi etmenlere bağlı olarak depo hacimleri değişmektedir. Genellikle anma hacimlerinin %10'u fazla hacimde imal edilirler.

Deponun üst tarafında, ilacın rahat doldurulması için geniş bir ağız ve süzgeç bulunmaktadır. Depo kapağı kullanım kolaylığı açısından çember sistemi veya basit vida sistemi ile sıkılmaktadır. Deponun yanında genellikle 30-40 litre hacimli temiz su deposu da bulunmaktadır. Bu depoyla operatör, ilaçla temasından sonra temiz su ihtiyacını karşılar. Son yıllarda ilaç-su karışımının önceden hazırlanıp ana depoya iletildiği ön karışım odaları da ilaçlama makinelerinde standart veya opsiyonel olarak satılmaya başlanmıştır.

### **1.1.2. Pompa**

İlaçlama makinalarında depodaki ilaçlı sıvıyı sabit basınç ve sabit debi ile memelere ileten yapılardır. Depolara benzer olarak, ilaçların aşındırıcı etkilerine dayanabilmeleri için özel malzemelerden yapılmaktadır. Pompaların tahrik kaynağı genellikle traktör kuyruk mili olmakla birlikte, hidromotor, elektrik motoru veya çekilir tiplerde tekerlekten tahrikli pompalar da mevcuttur. İlaçlama makinalarında en çok kullanılan pompa tipleri; membranlı, pistonlu, pistonlu-membranlı ve döner silindirik pompalardır.

### **1.1.3. Filtreler**

Depodaki ilaç-su karışımında veya harici bir su kaynağından çekilen suyun içerisinde tortu, yabancı madde, ince partiküller gibi sıvı olmayan maddeler bulunabilir. Bunlar temizlenmediği takdirde pompa, regülatör, vana, hortum ve özellikle meme uçları zarar görebilir veya aşınabilir. Bu gibi durumları önlemek amacıyla depo ağzından meme uçlarına kadar çeşitli aşamalarda ve çeşitli gözenek boyutlarına sahip filtreler bulunmaktadır. İlaçlama makinelerinde en çok kullanılan filtreler ve gözenek boyutları aşağıdaki gibidir.

Depo aęzı filtresi, 1 mm

Emme filtreleri, 0,4 mm

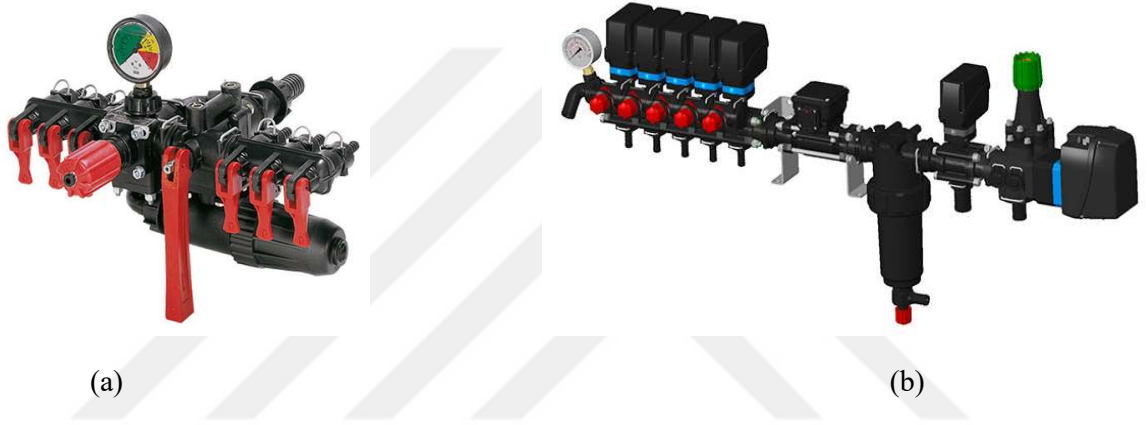
Basma filtreleri, 0,3 mm

Meme filtreleri, 0,5 mm



#### 1.1.4. Armatürler ve Regülatörler

Regülatör üniteleri, ilaçlama makinelerinde ilaç-su karışımının dolaşımını ve basıncını ayarlayan sistemlerdir. İlaç-su karışımının memelere, geri dönüşüme veya başka bir dağıtım merkezine yönlendirilmesini ayarlamakla beraber, pompanın memelere ilettiği suyun basıncını da düzenleyen merkezlerdir. Bu denetleme ve ayar işlemleri regülatörler üzerindeki vanalarla sağlanmaktadır. Vanalar elle, elektro mıknatıslarla veya elektrik motoruyla açılıp kapanabilmektedir. Manuel ve elektronik kontrollü vanalar Şekil 1.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.11. Manuel (a) ve elektronik (b) kontrollü regülatörler (Anonim,2021g)

Tarımda elektronik kullanımının artması ile birlikte ilaçlama makinelerinde de elektronik kontrolcüler kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistemlerle traktör kabininden ilaçlama makinesinin regülatörlerini kontrol etmek; debi, norm ve basınç ayarı yapmak mümkün olmaktadır. Şekil 1.12.'de traktör kabinine monte edilen bir kontrol sistemi gösterilmiştir.

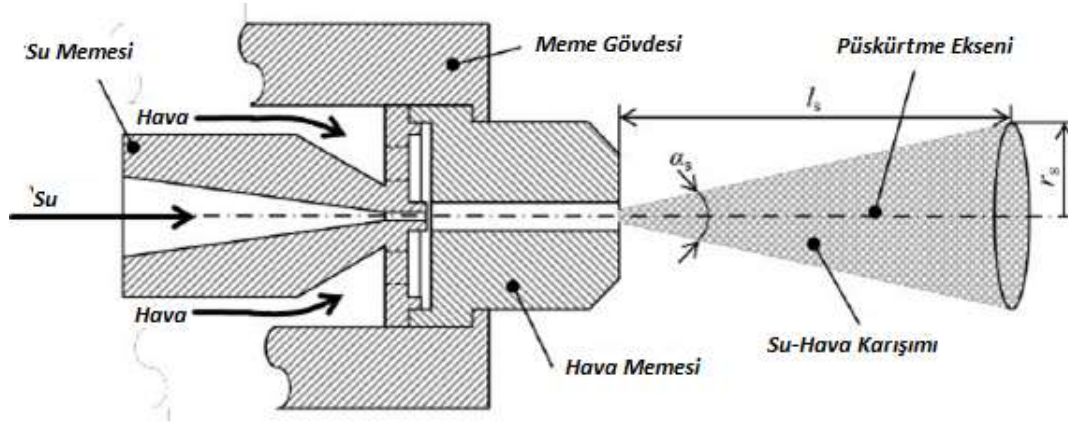


Şekil 1.12. İlaçlama Kontrol Sistemi (Anonim,2021h)

### 1.1.5. Memeler

İlaçlama uygulamalarında sıvı haldeki ilaç-su karışımının çeşitli çaptaki damlalar halinde hedef yüzeye yönlendirilmesi gerekmektedir. Sıvının hedef yüzeye püskürtülmesi işlemi memeler tarafından sağlanmaktadır. Memeler, püskürtme damlalarını oluştururlar ve damlaların uygun normda ve homojen olmasını sağlamaktadırlar. Püskürtme memelerinin içerisinde süzgeç ve meme ucu bulunmaktadır. Süzgeç, meme ucunu zamanla aşındırabilecek veya tıkayabilecek partiküllerin süzülmesini sağlar, meme ucu ise ilacın hedef yüzeye püskürtülmesini sağlar.

İlaçlama memeleri farklı debi, açı ve hüzmeye sahip olabilirler. Bunların sınıflandırılması ISO tarafından yapılmış ve meme üreticileri tarafından kabul görmüştür. Renk farklılıklarını baz alan bu sınıflandırmada her renk farklı bir meme delik çapını ifade etmektedir. Meme delik çapı arttıkça, memeden çıkan sıvının debisi artmaktadır. Bu yüzden uygun ilaç normu ve ilerleme hızı için bu tablolardan yararlanılmalıdır. Bir memenin kesit görünüşü Şekil 1.13.'te gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Bir konik hüzmeli meme gövdesinin kesit görünüşü (Herbst, Osteroth, Fler, Stendel, 2015)

Tarımsal üretimde önemli girdilerden olan pestisitlerin kullanımı insan, gıda ve çevre sağlığı açısından içerdiği riskler nedeniyle kullanımı hassasiyet gerektirmektedir. Pestisit uygulamalarının başarısı, uygulamada kullanılan alet ve makinelerin performansına, bu performans da makineleri oluşturan parçalara bağlıdır (Çelen,2016). Durumu ilaçlama makineleri özelinde ele alırsak, ilaçlama makinelerinin pompa karakteristikleri, uygun meme kullanımı, ilaç püskürtme yüksekliği, ilerleme hızı, ilaç püskürtme düzgünlüğü gibi kriterler, ilaçlama makinelerinin püskürtme performanslarını etkileyen faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bunların arasında en çok üzerinde çalışılan konu, çeşitli etmenlere bağlı olarak değişen ilaç sürüklenmesidir. İlaç sürüklenmesi, uzun yıllardır çevresel bir sorun olarak ele alınmaktadır (Çelen,2010). Amerikan Ulusal İlaç Sürüklenmesini Önleme Komisyonu (NCODM)'nun tanımıyla ilaç sürüklenmesi, ilaçlama sırasında veya sonrasında pestisitlerin havada hedeflenen alan dışına doğru hareketidir (Hewitt, 2000). Bu hareket, hedeflenen alan dışındaki bitkilere, hayvanlara, insanlara ve yapılara zarar verebilmektedir. İlaç sürüklenmesi sonucu pestisitlere maruz kalan insanlar, çevre sakinleri, ahır hayvanları, karada ve suda yaşayan canlılar olumsuz etkilenmektedir (Hilz ve Vermeer,2013). İlaç sürüklenmesi ile taşınan partiküller oldukça ince zerrecikler haline gelebildiği için solunum yoluyla, temas yoluyla, hatta açık havada duran besinlerin üzerine bile nüfuz ederek ağız yoluyla canlı vücuduna girip sağlık problemleri yaratabilmektedir. Hava koşullarının ve rüzgarın yardımıyla pestisit zerrecikleri kilometrelerce uzağa taşınabilir. Bunların yanında, tarlaya uygulandığında ekili olan bitkiyi öldürmeden sadece yabancı otları öldüren bir herbisit, komşu araziye ekilen başka çeşit bir bitkiyi yabancı

ot gibi öldürebilmektedir. Örneğin, ayçiçeği bitkisinde yabancı otları öldürmek için atılan bir herbisit, komşu arazide ekili olan buğday üzerinde sürüklenme yolu ile taşındığı zaman, buğdayda yapraklarda sararmalar, ve verim kaybı yaratabilmektedir. Eğer yüksek dozda da etkilenirse buğday bitkisini bir yabancı ot gibi öldürebilmektedir. Benzer olarak, buğday tarlasına geniş yapraklı yabancı ot türlerini öldürmek amacıyla atılan bir herbisit, komşu arazide bulunan kanola tarlasındaki bitkileri öldürebilir. Şekil 1.14.'te, meyve bahçelerindeki bir pestisit uygulamasında, hedeflenen alan ilaçlama makinesinin sağındaki ve solundaki birer ağaç sırası olmasına rağmen, pestisitlerin rüzgar yardımıyla 12. ağaç sırasına kadar sürüklenbildiği görülmektedir.

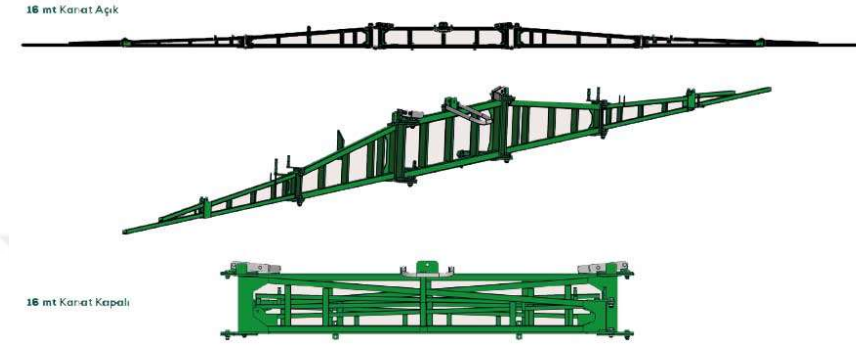


Şekil 1.14. Meyve Bahçeleri İlaçlamasında İlaç Sürüklenmesi (Anonim, 20211)

#### 1.1.6. Püskürtme Çubukları (Bum, Kanat)

Tarla pülverizatörlerinde püskürtme bitkinin üzerinden aşağı yönde yapılmaktadır. Bu yüzden tarla pülverizatörleri belirli aralıklarla yan yana dizilmiş püskürtme memelerinden oluşur. Bu memeleri ve hortumlarını taşıyan sistem püskürme çubuğu, ilaçlama kanatları veya bum olarak adlandırılmaktadır. Kanatlar taşıma konumunda birbirinin üzerine katlanabilmesi amacıyla parçalar halinde üretilir. Orta ve dış kısımlar taşıma konumunda hidrolik pistonlarla veya el ile merkezdeki kanadın üzerine katlanır. Kanatlar genellikle ince kare profilli çelik malzemeden imal edilmektedir. Profiller uygun uzunluklarda kesilip birbirine kaynatılarak kanat oluşturulur. Kanat yapıları merkezden uca doğru hafiflemekte, bu da moment dengesi açısından merkezdeki kanada gelen yükü azaltmaktadır. Genişlik arttıkça kanatların mukavemetini arttırmak amacıyla, orta kanatlar kafes sistemi olarak tasarlanmaktadır. Ayrıca

herhangi bir engele çarpma durumunda esneklik avantajı ile kırılmayı önlemek ve ağırlığı azaltmak amacıyla en dıştaki kanatlar alüminyum profillerden imal edilebilmektedir. Şekil 1.15.'te yatay ekseninde katlanabilir bir kanadın tarla ve yol konumlarındaki görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 1.15. İlaçlama makinesi kanadının tarla ve yol konumlarındaki görüntüsü (Anonim,2021)

Bazı kanat üreticileri de hafif bir kanat yapısı için özel şekillendirilmiş bükme sac ile kanatları imal etmektedir. Şekil 1.16'de bükme saclar kullanılarak oluşturulan kafes sistemi konstrüksiyonu ve dış kanat malzemesi olarak alüminyum kullanılarak imal edilmiş bir ilaçlama makinesi görülmektedir.



Şekil 1.16. Tarla pülverizatörü kanat yapısı (Amazon Co,2020)

Püskürtme çubukları yüksekliği ayarlanabilir ve yol konumu için katlanabilir yapıya sahiptir. Memeler belirli aralıklarla püskürtme çubukları gövdesine monte edilmektedir. İş genişlikleri kapasiteye göre 8-60 m arasında değişmektedir. Memeler arasındaki mesafe genellikle 50 cm'dir. Ayrıca engebeli arazilerde bum yüksekliğinin ve dengesinin sabit kalması

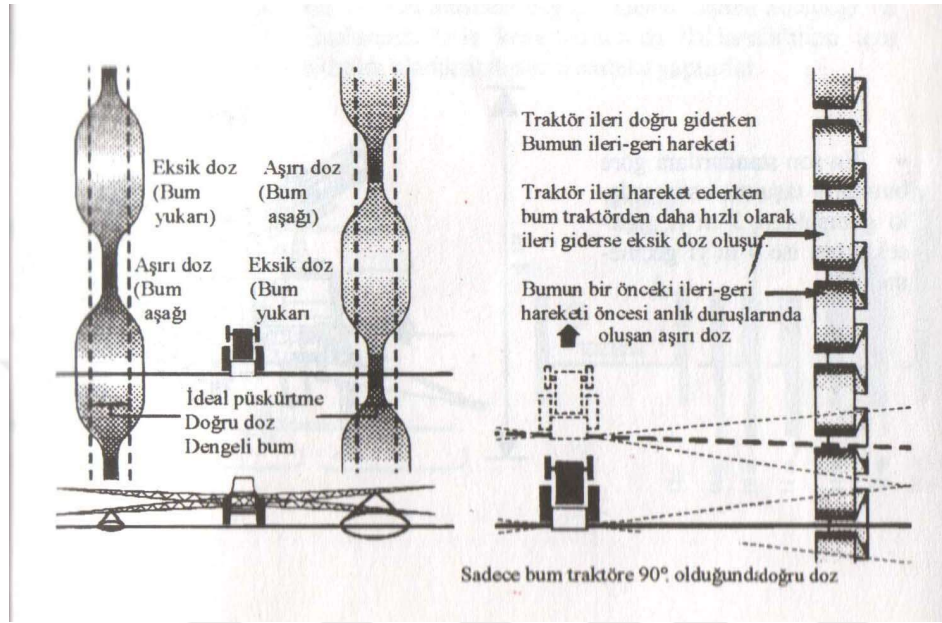
amacıyla ana şasi ile arasında süspansiyon sistemi bulunmaktadır. Bu süspansiyonlar pasif ve aktif süspansiyon olarak değişmektedir. Pasif süspansiyonlarda daha sınırlı bir sönümlenme olmakla birlikte genellikle çekme yayı kullanılmaktadır. Aktif süspansiyonlarda ise sönümlenme arazinin engebe durumuna göre değişmekte, hidrolik veya elektronik süspansiyon sistemleri kullanılmaktadır. Şekil 1.17.'de dünyada tarla tipi ilaçlama makinelerinde kullanılan farklı tipteki kanatlar gösterilmiştir.



Şekil 1.17. Farklı tipte ve genişlikteki ilaçlama kanatları (Anonim, 2021j)

İlaç dağılımına etki eden etmenleri dört kategoriye ayırabiliriz. Bunlar çevresel-meteorolojik etmenler, ilaçlama parametreleri, pompa ve meme gibi hidrolik ekipmanların özellikleri ve makinenin ilaçlama sırasındaki dinamik hareketleri (bom hareketleri)'dir. Buradaki son iki etmen ilaçlama makinesinin kendisine bağlı olmakla birlikte dağılım düzgünlüğünü en çok etkileyen etmenlerdir. (Clijmans et al, 2000). İlaçlama memelerinin konumlandırıldığı ve taşındığı kanatların tasarımı ve dinamik koşullardaki davranışı da, ilaçlama düzgünlüğü ve sürüklenmenin önlenmesi açısından önemlidir. İlaçlama sırasında kanatların yatay ve dikey konumları, traktörün veya ilaçlama makinesinin kendisinin yerle teması sonucu düzgün olmayan tarla zeminlerinde sarsıntıya bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu da ilaçlama düzgünlüğünü etkilemektedir. Yatay eksendeki moment etkisiyle ilaçlama makinesinin kanatlarının yere göre bağlı hızı anlık olarak sıfır olabilmekte,

bu da o anda ilacın düştüğü bitkiler üzerinde ilaç dozunu yükseltmektedir (Matthews,2000). Kanat hareketlerinin ilaç dağılımına etkisi Şekil 1.18.'deki şemada görülmektedir.



Şekil 1.18. Kanat hareketlerinin ilaç dağılımına etkisi (Anonim,2020k)

Homojen bir ilaçlama için yatay ve dikey kanat hareketlerini sönmlemek amacıyla süspansiyonlar kullanılmaktadır. Pasif süspansiyon olarak genellikle çekme yayları kullanılmaktadır. Kanat ile asansör şasisi arasına konulan bu yaylar, kanatın dikey hareketlerini sönmlemektedir. Aktif süspansiyon ise, iş genişliği daha yüksek ilaçlama makinelerinde ve kendi yürür ilaçlama makinelerinde kullanılmaktadır. Bu tip süspansiyonlarda, elektronik, hidrolik ve pnömatik sistemler aynı anda çalışmaktadır. Elektronik sistemdeki hız ve ivme ölçüm sistemleri, yere ve bitkiye olan mesafeyi tayin eden ultrasonik ve lazer sensörler süspansiyon bilgisayarına anlık bilgi göndererek, hidrolik ve pnömatik süspansiyonların istenilen kuvvette veya yönde sönmleme yapmasını sağlar. Bu şekilde devamlı olarak birbiriyle haberleşme halinde olan sensör ve mekanizmalarla sürekli bir sönmleme yapılarak kanatların bozuk tarla yüzeyine rağmen üç ekseninde de minimum seviyede salınım yapması sağlanmış olur.

Ülkemizdeki ilaçlama makinelerinde de, genellikle pasif süspansiyon tercih edilmektedir. Ana şasiye çapraz veya dikey bağlanan çekme-basma yayları sayesinde kanatların dikey ekseninde hareketi sönmmlenmiş olur. Zeminden gelen darbe şiddetine süspansiyonun verdiği tepki her seferinde aynı olduğu için sönmleme miktarı sınırlı kalmakta ve kanatlar

dikey ekseninde yukarı ve aşağı yönde salınım yapmaktadır. Bu da, püskürtme memelerinin ilaçlanan bitkiden yüksekliğini değiştirmekte, ilaçlama düzgünlüğünü bozmaktadır.

Türkiye’de ilaçlama makinelerinin kanatları ile ilgili diğer bir problem de, arazilerin küçük ve şekilsiz olmasıdır. Operatör, ilaçlama makinesinin kanatlarını tarlaya her girdiğinde tarla konumuna getirmekte, tarlada işi her bittiğinde kanatları yol konumuna getirmektedir. Yatay ekseninde katlanabilen 12 metrelik bir tarla pülverizatöründe sağda ve solda ikişer ve merkezde bir adet olmak üzere 5 parça kanat vardır. Bunlar birbiri üzerine katlanarak ortada toplanıp, yol konumuna getirilmektedir. Operatör her seferinde 4 parça kanadı tarla ve yol konumuna getirmek için traktörden inmekte, bu da zaman kaybına yol açmaktadır. Günümüzde bu problem, hidrolik olarak katlanabilir kanatların geliştirilmesiyle azaltılsa da, hidrolik piston ve hortumların pahalı olması ve ilaçlama makinesine ekstra ağırlık olarak eklenmesi sebebiyle çiftçiler arasında tercih edilmesini sınırlandırmaktadır (Özyurt vd, 2020). Trakya Bölgesi’nde çiftçiler üzerinde yapılan ilaçlama makinesi anketinde, çiftçilerin %10.6’sı kanatların katlama sisteminin düzgün çalışmadığını, %15.2’si de kanatların çok ağır olduğunu söylemektedir. Aynı çalışmada, makinelerin kanatlarında engellere ve yere çarpmaya bağlı kırılmalar gözlemlendiği, bazılarında sarsıntı, titreşim kaynaklı çatlama, yamulma ve burkulmalar olduğu belirtilmiştir. (Özyurt vd. 2020). Bunun yanında, ilaçlama yapılırken genellikle ekim yönünde, izli ekim yapılan arazilerde izler takip edilerek ilerlenmektedir. Geometrik olarak şekilsiz, yamuk arazilerde, düz kenardan başlanarak ilaçlamaya başlandığında en son traktör izinde iz tarlanın yarısında bitmekte veya ilaçlama makinesinin iş genişliğinden daha dar bir ilaçlanmayan alan kalmaktadır. Bu da tüm memeler açık olduğunda, ilacın üst üste binmesine yol açabilmektedir. İlaç dozunun çok hassas ayarlandığı uygulamalarda aşırı doz, herbisit uygulanıyorsa tarlada ekilmiş olan bitkiyi veya insektisit uygulanıyorsa faydalı canlıları da öldürebilmektedir. Çiftçiler üst üste binme sorunlarına çözüm olarak, üst üste binecek bölümdeki meme grubunu regülatörden kapatmayı tercih etmektedirler. Önemli bir kısmı ise üst üste binmeyi engelleme konusunda her hangi bir önlem almamışlardır (Özyurt vd, 2020).

Bu sorunlara ek olarak bazı arazi içlerinde, elektrik direkleri, telefon ve doğalgaz boru hatlarının işaret direkleri, eski kuyular, sulama pompalarının yerleri, ağaç ve çalılar bulunabilmektedir. İlaçlama sırasında traktörün ilerleme izi bu engellere denk geldiği durumlarda, kanatların genişliği anlık olarak değiştirilemediği için traktör bu engellerin etrafından dolaşmakta ve iz dışında kalan bitkilerin üzerinden geçerek zarar vermektedir (Şekil 1.19.).





Şekil 1.19. İlaçlama izlerinin ağacın etrafından dolanması (Anonim, 2021m)

Ülkemizde ve dünyada ilaçlama makineleri alanında yaşanan bu gelişmeler ve problemler ışığında, bu çalışmada, üreticilerin ilaçlama uygulamalarındaki gereksinimlerine cevap verecek teleskopik bir ilaçlama makinesi kanadı tasarlanması amaçlanmıştır. Bu amaçla, arazideki engellerin ortaya çıkardığı problemleri minimize eden bir süspansiyon sistemi, elektrik motoru tahrikiyle teleskopik olarak katlanabilen kanatlar ve yol konumunda iken ilaçlama memelerinin darbelere maruz kalıp zarar görmesini önlemek amacıyla bir korunak tasarımı yapılacaktır.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Tarla tipi ilaçlama makinelerinin kanatları konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, kanatların dinamik koşullardaki analizi, dinamik ve statik koşullarda kanatların zorlanma analizleri, kanat tasarımının ve davranışının ilaç dağılımına etkisi, kanatların katlanma mekanizmalarının incelenmesi konularında yoğunlaşmaktadır.

Speelman ve Jansen (1974), ilaçlama makinesi kanat hareketlerinin ilaç dağılımına etkisini incelemişlerdir. 4 farklı tipte asılır tip ilaçlama makinesini tarla koşullarında denemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, kanatlardaki titreşimin kanat tasarımından, topraktaki engebeden ve ilerleme hızından kaynaklandığını, bu titreşimin frekansının da dağılım düzgünlüğünü dikey ekseninde %100, yatay ekseninde %200 oranında etkilediğini belirtmişlerdir. Tüm meme tiplerinde titreşim genliğinin artmasının damla dağılımını olumsuz yönde etkilediğini ve özellikle yatay eksenindeki hareketlerde dağılım varyasyon katsayısının yükseldiğini belirtmişlerdir.

Cannon (1979), Amerika Birleşik Devletleri'nde havadan ilaçlamanın yasaklanmaya başladığı yıllarda, ilaçlama uçağı kadar kapasiteye sahip bir tarla pülverizatörü geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla, 24 metrelik, teleskopik olarak katlanabilen, karayollarında da taşınabilmesi için bir pikap kamyonet tarafından çekilebilen bir ilaçlama makinesi geliştirmiştir. Dönemin ilaçlama uçakları ile karşılaştırıldığında tasarlanan makine ile, günde 379 hektar alan ilaçlanabilirken, ilaçlama uçağı ile günde 363 hektar alanı ilaçlanması mümkün olmaktadır. Bunlara ek olarak yazar, geliştirilen makinenin ilaçlama uçaklarına göre operasyon ve ilk yatırım maliyeti açısından daha ekonomik olduğunu, özel pilotluk eğitimi gerektirmediğini, gece çalışmaya elverişli olduğunu, ilaç sürüklenmesinin daha az olduğunu, hacimsel damla çaplarının hedeflenen etki için daha uygun olduğunu ve uçağı göre daha güvenli olduğunu belirtmiştir.

Nation (1982), tarla pülverizatörlerinin kanatlarının dinamik davranışları hakkında inceleme yaptığında, tarladaki ilaç dağılımının düzgün olmamasının sebebi olarak kanatların yatay ve dikey yönlü hareketlerini sebep göstermiştir. 6 farklı ilaçlama makinesi ile 6 farklı tarla koşulunda ilaçlama denemesi yapmış, denemelerde ilaçlama makinesinin kanatlarına kanat hareketinin açılarını ve kanatların dikey ivmesini ölçen ivme ölçer yerleştirmiştir. Yapılan deneylerde ideal ilaçlama kanatlarının tek ve rijit bir şasiye sahip olması gerektiği, bağlantı yerlerinin sıkı ve kanatların makineye bağlandığı yerin pozitif yönünde olması

gerektiğini belirtmiştir. Buna ek olarak kanatları destekleyecek herhangi bir tel veya zincirden kaçınılması gerektiği, ilaçlama makinesinin şasisi ile kanatları arasındaki ani moment değişimlerini sönmüleyecek bir esneklik mekanizması yaratılması gerektiğini ifade etmiştir. Bunun da süspansiyon mekanizmaları ile kurulduğunu belirtmiştir.

Ramon ve Baerdemaeker (1997), ilaçlama makinelerinin hareketleri ve ilaç dağılımı arasında matematiksel model geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, ilaç dağılımındaki düzensizlikle kanatlara etkiyen momentler arasında bir ilişki oluşturmuşlardır. Bu matematiksel ilişki, üç belirli integrale oluşturulmuş, traktör titreşiminin etkisi bu üç integralin adapte edilmesi ile ihmal edilebilmiştir. Yazarlar, damla dağılımının bu kadar basit olarak çözümlenmesinin simülasyonlarda zaman kazandırıcı bir faktör olduğunu belirtmişlerdir.

Ramon, Missotten ve Baredemeaker (1997), birinci kısımdaki çalışmalarında üç belirli integrale matematiksel olarak ifade ettikleri kanat hareketleri ve damla dağılımı arasındaki matematiksel ilişkiyi, deneysel ortamda da doğrulamayı amaçlamışlardır. Bu amaçla bir paternatör üzerinde 4 farklı meme ucu kullanarak belirli ilerleme hızlarında ilaç püskürtmüşlerdir. Matematiksel ifadelerle oluşturulan simülasyonlar ile paternatörün kanallarında biriken sıvı miktarları karşılaştırıldığında, aradaki farkın her seferinde %7'den az olduğu sonucuna varılmıştır. Yazarlar, bu simülasyon ve deneysel çalışmalar sonucunda, kanatlardaki dönme momentleri ve yatay titreşimlerin damla dağılımını önemli ölçüde etkilediğini ifade etmişlerdir. Bu etki sonucunda oluşan dönme momentiyle hedeflenen dozun bazı alanlarda 10 katına kadar ulaşabildiği, yatay hareketlerde ise 4 katına kadar ulaşabildiği sonucuna varmışlardır.

Kennes, Anthonis ve Ramon (1998), ilaçlama makinelerinin kanatlarının dinamik olarak simule edilmesi ve iyileştirilmesi alanında çalışmışlardır. Kanatların yatay hareketlerini sönmüleyebilmek amacıyla lineer çok gövdeli kanat ve süspansiyon modellemişler ve bunları deneysel olarak doğrulamışlardır. Öncelikle 24 metrelik bir ilaçlama makinesi kanadının titreşimini modellemişlerdir. Daha sonra bu titreşimi sönmüleyebilmek adına analize yatay ekseninde süspansiyonlar ekleyerek sönmülemeyi optimize etmişlerdir. Daha sonra sisteme pnömatik süspansiyon ekleyerek deneysel olarak çalıştırmışlardır. Yazarlar çalışma sonucunda, kanatların yatay eksenindeki hareketlerini sönmüleyebilmek için sarkaçlı veya trapezoidal (yamuk) süspansiyonun etkili çözümler olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, hidrolik, mekanik veya pnömatik süspansiyonlarda  $F=k.x$  eşitliğini bozacak derecede sürtünme kuvvetleri de olduğunu, sistem tasarımında bu sürtünmelerin ihmal edilmemesi gerektiğini bildirmişlerdir.

Herbst ve Wolf (2001), tarla pülverizatörlerinin dinamik koşullardaki ilaçlamalarda damla dağılım düzgünlüğünü incelemişlerdir. Genel kabul görmüş paternatör düzeneği yerine, servo-hidrolik motorlar ile titreşimi sağlanan bir platform üzerinde test edilecek pülverizatörler yerleştirilmiş, kanatların hizasına da, hareketli bant sistemi yerleştirilmiştir. Titreşim sonucunda kanatlarda oluşan hareketlerle bant üzerine düşen damlalar analiz edilmiştir. Bu test düzeneği ile tarla koşullarının bir simülasyonu amaçlanmıştır. Test sonuçlarına göre, asılır tip pülverizatörlerin damla dağılımlarındaki varyasyon katsayısı %10-22 arası değişkenlik göstermiştir. Çekilir tiplerde ise varyasyon katsayısı asılır tiplere göre daha düşük bulunmuştur. Bunun sebebi olarak yazarlar, genişliği daha fazla olan kanatların daha düşük doğal frekans değerlerine sahip olmasını göstermişlerdir. Aynı zamanda geniş kanatların salınma daha az yatkın olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca yazarlar, ilerleme hızının artışının kanatların hareketini daha az etkilediğini, bu sebeple damla dağılımının daha düzgün olduğunu belirtmişlerdir.

Ooms ve ark. (2003), ilaçlama makinesi kanatlarının yatay ekseninde yaptığı hareketlerinin ilaçlama dağılımı üzerine etkisi hakkında çalışma yapmışlardır. Deneyler hem arazi hem de laboratuvar koşullarında gerçekleşmiştir. Arazi testlerinde dağılımı ölçmek için Nigrosine boyar maddesi kullanılmış, üzerlerine boyar madde püskürtülen kağıtlar, görüntü işleme yazılımı ile kaplama miktarları ölçülmüştür. Aynı testler laboratuvar koşullarında da gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarında üçer tekerrür sonucunda arazi ve laboratuvar koşullarında varyasyon katsayıları birbirine yakın bulunmuştur (%7-11). Yazarlar, çalışma sonucunda bulunan varyasyon katsayılarına göre, ilaçlama dağılımını etkileyen en büyük etmen olarak kanatların yapay hareketi olduğunu bildirmişlerdir.

Deprez, Anthonis ve Ramon (2002), ilaçlama makinelerinin eğimli arazilerde çalışması esnasında kanatların eğimin olduğu tarafa doğru eğilip ilaçlama yüksekliğini etkilememesi amacıyla bir aktif süspansiyon sistemi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bunu başarmak için aynı prensiple çalışan 4 farklı süspansiyon tipini incelemişlerdir. Bu 4 süspansiyon sisteminde de amacın eğimli arazilerde eğime göre kanatların yere göre açısını değiştirmek olduğunu belirtmişlerdir. Modellemeler ve deneyler sonucunda yazarlar, 4 süspansiyon sisteminin de matematiksel olarak aynı yapıda olduğunu, güçsüz bir aktivatörle bile eğimli arazilerde başarılı sonuçlar elde edildiğini, daha hızlı cevap verebilen ve güçlü bir aktivatörle daha iyi sonuçlar alınabileceğini belirtmişlerdir.

Jeon, Womac ve Gunn (2004), ilaçlama makinesi kanatlarının ilaç dağılım düzgünlüğü üzerindeki dinamik etkilerini araştırmışlardır. Deneyde 27 metre kanat açıklığına sahip bir

ilaçlama makinesi kullanılmış, farklı arazi koşullarında kanatların yükseklikleri ve hareketlerindeki ivme değişimleri incelenmiştir. Test koşullarında kanatların yükseklik değişimleri, ilaç kaplama miktarını ve ortalama damla çaplı damlacıkların dağılımını etkilemiştir. 1.5 metreden düşük kanat yüksekliklerinde kaplama miktarının arttığı ve damlacık büyüklüklerinin tekdüzeleştiği bildirilmiştir. Yazarlar araştırma sonucunda, ivme ve yükseklik değişim ölçümlerinin gelecekteki test cihazları için yol gösterici olabileceğini belirtmişlerdir.

Jeon, Womac, Wilkerson ve Hart (2004), ilaçlama makinelerinin çalışma koşullarındaki titreşimini, kanatların üç eksendeki momentlerini, kanat ucundaki yükseklik değerlerini ve ilaçlama makinesinin tarladaki konumunu ölçüp damla dağılımına etkilerini araştırmayı amaçlamışlardır. Üç eksendeki ivmeleri ölçmek için makine üzerine 12 adet ivmeölçer yerleştirmişlerdir. Kanatların yerden yüksekliğini ölçmek için ultrasonik mesafe sensörü kullanmışlardır. İlaçlama makinesinin arazideki konumunu ölçmek için fotoelektrik temelli bir pozisyon sensörü kullanmışlardır. Yazarlar, ilaçlama makineleri üzerine kurulan bu sistemlerin gelecekte ilaçlama makinelerinin tasarımı konusunda süspansiyon sistemleri, kanat uzunlukları, ilerleme hızı, aktif süspansiyonun kullanımı gibi konularda yön verici olabileceğini belirtmişlerdir.

Demir ve Çelen (2006), Tekirdağ ili genelinde 718 tarım işletmesi ile bir anket çalışması düzenlemişlerdir. 20 soruluk bir ankette, arazi büyüklükleri, makine parkları, ilaçlama makineleri sorunları hakkında sorular sorulmuştur. Anket sonuçlarına göre, ilaçlama makinelerinin %79'unun iyi durumda olduğu, %64'ünün 10 yaşının altında olduğu, %28'inde meme tıkanıklıkları olduğu bildirilmiştir.

Sun ve Miao (2011), ilaçlama makinesinin kanatlarını sürekli olarak 50-70 cm aralığında ve yere paralel olarak kullanabilmeyi sağlamak amacıyla bir kontrolcü tasarımı yapmayı amaçlamışlardır. Bu sistemde elektro-hidrolik süspansiyonlar ve kızılötesi mesafe sensörleri kullanmışlardır. Tasarlanan sistemin matematiksel modelini oluşturup sönümleme kuvvetlerini optimize etmişlerdir. Araştırmacılar çalışma sonucunda, sistemin basit olmasına rağmen, kanatlara etkiyen en büyük kuvvetlerin bu sistem sayesinde sönümlendiğini belirtmişlerdir.

Fujita ve Sugiyama (2012), teleskopik vinçlerde mutlak düğüm koordinat formülasyonu kullanarak kayar mesnetlerin dinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, teleskopik

vinçlerde uzunluğun zamana bağlı olarak değiştiği için, zorlanma noktalarının ve eksenlerin de yer değiştirdiğini ifade etmişlerdir.

Raftoyiannis ve Michaltsos (2013), teleskopik vinçlerin kollarının dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada, teleskopik vinçlerin dinamik analizine uygun bir model geliştirilmiştir. Bu model üzerinde vincin katlanma sırasındaki zorlanmaları ve doğal frekansları incelenmiş ve analitik olarak ifade edilmiştir. Araştırma sonucuna göre, katlanma sırasında hareket eden kısımda küçük dinamik deformasyonlar olduğu, katlanma sırasındaki dinamik deformasyonların durgun hale göre oldukça fazla olduğu, yüksek katlanma hızlarında dinamik deformasyonların daha az olduğu belirtilmiştir.

He, Qiu ve Yang (2014), ilaçlama makinelerinin kanatları için bir süspansiyon sisteminin simülasyon ortamında analizini yapmışlardır. Bu amaçla öncelikle, ilaçlama makinesinin tehlikeli kesitlerini belirlemek amacıyla, kanatların ANSYS programında sonlu elemanlar analizi ile statik analizi yapılmıştır. Daha sonra model üzerinde kanat ve ana şasi arasına süspansiyon sistemi eklenmiş ve şasi-süspansiyon-kanat modeli oluşturulmuştur. Analiz sonucunda yazarlar, süspansiyon sisteminin kanatların yapısal deformasyonunu azalttığını, süspansiyon yaylarının setliğinin kanat deformasyonunda az etkisi olmasında rağmen, sönümleme miktarının deformasyon üzerinde önemli etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Lupea, Tudose ve Lupea (2009), tarla pülverizatörlerinin kanat yapısının dinamik koşullarda deneysel olarak ve simülasyonda incelemişlerdir. İlk olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi bazlı yazılımlar kullanarak kanat yapısını optimize etmişlerdir. Bu yapıyı dinamik yüklemeye zaman değişkenine bağlı olarak, kanat ucundaki titreşimleri incelemişlerdir. Simülasyon sonucunda en önemli titreşimlerin küçük dalga boylu olduğunu belirtmişlerdir, bunun sebebi ise küçük dalga boylarının kanadın en ucunda yüksek yer değiştirmeye sebep olmasıdır. Araştırmacılar yazılım üzerindeki analizlerden sonra gerçek koşulları da incelemek amacıyla, kanadın 1/10 ölçekli modelini imal edip, dinamik yükler altındaki davranışlarını test etmişlerdir. Kanadın harmonik titreşimlerde frekans-cevap fonksiyonu incelendiğinde, en küçük titreşimin bile kanat ucunda yer değiştirmeye sebep olduğunu belirtmişlerdir. Araştırma sonucunda yazarlar, sonlu elemanlar analizi ile deneysel sonuçların birbirine yakın sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Zhao, Liu, Yuan ve Chen (2016), tütün tarlalarında ilaçlama uygulamaları için, bitkinin ilk evrelerinde üstten ilaçlama yapabilen, gelişme evresinde ise artan bitki boyu ile beraber alt

yapraklara da ilaç ulaştırabilmek için tünel tipi ilaçlama yapabilen, çok fonksiyonlu bir ilaçlama kanadı geliştirmeyi amaçlamışlardır. Kanat tasarımı yapıldıktan sonra Ansys yazılımı ile statik analizler yapılmış, tehlikeli kesitler ve yapısal sorunlar incelenmiş, oluşturulan yapı Adams yazılımı ile dinamik olarak da test edilip tasarımın güvenilirliği incelenmiştir. Testler sonucunda oluşturulan en uygun tasarım, imal edilip arazi testlerinde denenmiştir. Yapılan denemelerde yazılım ve gerçek testler arasındaki fark %10'dan düşük olarak bulunmuştur. Statik ve dinamik simülasyonlarla yapılan iyileştirmelerle maksimum ana ve orta profil kesiti 25x35x2 mm, yan profil kesitleri 20x20x1 mm olarak hesaplanmıştır. Ayrıca tünel tipi ilaçlama testlerinde tütün yaprakları arasındaki kaplama oranı %92.8 olarak bulunmuştur ve yapraklarda neredeyse hiçbir zarar gözlenmemiştir.

Malekabadi, Sadeghi ve Dizaji (2016), küçük meyve bahçelerindeki ilaçlama uygulamaları için teleskopik ilaçlama makinesi tasarımı yapmış ve bu tasarımı genel olarak kullanılan bahçe tipi ilaçlama makineleri ile karşılaştırmışlardır. Tasarlanan mekanizma, teleskopik olarak uzayabilen bir çubuğun ucuna ilaçlama memesi takmak suretiyle, farklı yükseklikler ve mesafeler için çubuk uzunluğunu değiştirme imkanı sunmaktadır. Yapılan çalışmalarda teleskopik ilaçlama makinesinin diğer ilaçlama makinelerine göre daha düzgün ilaç dağılımına sahip olduğu belirtilmiştir.

Manea, Gidea, Marin ve Mateescu (2018), çekilir tip bir tarla pülverizatörünün 24 metrelik kanat yapısının statik ve dinamik koşullardaki davranışlarını incelemişlerdir. Bu amaçla öncelikle kanatların 3 boyutlu çizimi yapılmış ve standart bir sonlu elemanlar analizine sokulmuştur. Ana kabuklar, azaltılmış katı elemanlar ve rijid bağlantı noktaları kabul edilerek analiz yapılmıştır. Kanadın statik analizini yaparak, kanatların tehlikeli kesitlerini ve deformasyonun olabileceği muhtemel bölgeleri tespit etmişlerdir. Dinamik analizde ise, kanatlarının titreşim genliğini bulmayı amaçlamışlardır. Yapılan analizler sonucunda, incelenen kanatlarda Von-Mises maksimum eşdeğer gerilmesi akma dayanımından düşük olduğu için malzeme kırılması veya deformasyonu için bir risk görülmemiştir. Dinamik koşullarda ise doğal frekans değerleri bulunmuş ve bu değerlerin gelecekteki kanat tasarımlarında kaçınılması gereken tasarım parametreleri olduğu yazarlar tarafından bildirilmiştir.

Zhang, Wang ve Li (2019), ilaçlama makinelerinin kanatlarını sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edip edip sistem kontrolü sağlamayı amaçlamışlardır. Bu amaçla en yaygın profil tasarımına sahip 24 metrelik bir ilaçlama makinesi kanadını sonlu elemanlar yöntemiyle

modelleyip, ana şasideki titreşim deformasyonunun kontrolü üzerinde çalışmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile dinamik hareketleri modelleyip, elde edilen modeli şekilsel uzaya dönüştürmüşlerdir. İlk 4 şekli, kanatların yatay eksenindeki titreşimi sonucu oluşan deformasyonları engellemek için kullanmışlardır. Doğrusal matris eşitsizliğine göre ve Lypaunov stabilite prensibine göre, sistem stabilitesinin izafi kriterlerini simule etmişler ve kontrol metodunun verimliliğini deneysel olarak göstermişlerdir.

Özyurt, Önler ve Çelen (2020), Trakya bölgesindeki ilaçlama makineleri ve kullanımlarında yaşanan problemler hakkında bir anket çalışması yapmışlardır. Bölge genelinde rastgele seçilmiş köylerdeki toplam 132 çiftçi ile görüşülmüş, çiftçilere arazi ve traktör varlıkları, ilaçlama makinelerinin özellikleri ve kullanımda yaşadıkları problemlerle alakalı 22 soruluk bir anket yöneltilmiştir. Anket sonuçlarına göre bölgede en çok tercih edilen ilaçlama makinesi markası Parlayan Tarım Makinaları A.Ş., en yaygın depo hacmi 800-1000 litre olarak belirlenmiştir. İlaçlama makinelerinin genellikle 12 metre genişliğe sahip, yatay ekseninde manuel olarak katlanır oldukları görülmüştür. Ankete katılan çiftçilerin %57.6'sı ilaçlama makinelerinin kanatlarının bir engele, yere çarparak veya sarsıntı yüzünden kırıldığını ya da üzerinde çatlaklar oluştuğunu bildirmiştir.



### **3. MATERYAL - YÖNTEM**

#### **3.1. Materyal**

Bu çalışmada klasik bir tarla pülverizatöründe kanat kısmında karşılaşılan problemler dikkate alınarak, çözüm odaklı bir kanat tasarımı yoluna gidilmiştir. Doğru tasarıma ulaşıldıktan sonra yeni kanat tasarımı prototip olarak üretilip, halihazırda kullanılan bir tarla pülverizatörünün kanatları ile değiştirilerek kullanıma sunulmuştur.

##### **3.1.1. Pülverizatör**

Tasarlanan kanat, orijinal kanatları sökülmüş olan Trakya bölgesinde yoğun olarak kullanılan tipte bir pülverizatöre monte edilmiştir. İlaçlama makinesi, 60x60 mm kare profillerle imal edilen bir şasiye sahiptir. Şasi üzerine, 1000 lt polietilen malzemeden üretilmiş depo bulunmaktadır. Orijinal kanatlar, 40x40 ve 80x40 çelik profillerden üretilmiş olup, yatay ekseninde birbiri üzerine manuel olarak katlanan 5 parçadan oluşmuştur. Kanat üzerinde, 50 cm aralıklarla 24 adet ilaçlama memesi bulunmaktadır. Pülverizatörün bu memeler ile beraber toplam iş genişliği 12 metre olmaktadır. Makine üzerinde ilaç deposundaki ilaç-su karışımını memelere sabit basınçla göndermek ve su kaynağından su çekmek amacıyla kullanılan, Annovi Reverberi marka, max 50 bar, 200 L/dk debili diyafram pompa bulunmaktadır. İlaç hattı üzerinde, 3 adet filtreden çözültideki yabancı maddeler süzülerek, memelere zarar veren etmenler ortadan kaldırılmaktadır. Aynı hat üzerinde, basıncı düzenleyen bir vana, bir adet manometre ve her kanat parçasına giden boru hatlarını açıp kapamak için kullanılan 5 adet valften oluşan bir regülatör bulunmaktadır. İlaçlama makinesi traktöre üç nokta askı sistemi ile bağlanmakta, şoför, traktörün arka camından regülatöre ulaşip basınç ve diğer ayarları yapabilmektedir. Bunun yanında, kanatların yüksekliği, bir adet hidrolik pistonu sahip asansör yapısı ile ayarlanabilmektedir. Montaj kolaylığı açısından, kanatların pülverizatör asansörüne bağlantı noktaları, pülverizatörün yapısına göre tasarlanmıştır. Kullanılacak pülverizatörün orijinal kanatları ile katı model gösterimi Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kullanılacak Pülverizatörün Katı Model Gösterimi

### 3.1.2. Püskürtme Sistemi

Tasarlanan pülverizatör kanatları üzerine, çalışma konumunda aralarındaki mesafe 50şer cm olacak şekilde ilaçlama memeleri yerleştirilmiştir. Bu ilaçlama memeleri hava emişli yelpaze hüzmeli damla dağılıma sahip, 3 mm ağız açıklığına sahip hava emişli özelliğe sahiptir. Trakya Bölgesi'nde en çok kullanılan meme tipine göre bu seçim yapılmıştır (Özyurt vd. 2020). Memeler, tekli meme başlıkları kullanılarak 20 mm çaplı plastik borulara oturtulmuş, plastik borular da metal kelepçelerle kanat profiline monte edilmiştir. Tekli meme başlığının kullanılma sebebi, memelerin kanatların içinde kalması sebebiyle yaşanacak olası bir yer azlığının önüne geçmektir. Kullanılan tekli meme başlığı Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Tekli meme başlığı (Anomim,2021n)

Yol ve çalışma konumlarındaki geçişlerde dış kanatlardaki borulara yetişebilmesi için hat filtrelerinden kanatlardaki borulara kadar olan kısımda esnek hortumlar kullanılmıştır. Hortum ve boru arasındaki bağlantılar sızdırmazlık contaları ve kelepçelerle sağlanmıştır. Kullanılacak ilaçlama makinesinin regülatörü ile her kanat parçasındaki meme grupları ayrılmıştır. Merkezle beraber 5 adet kanat parçası olacağı için 5 gruplu regülatör ve toplamda 5 farklı hortum ve boru hattı kullanılmıştır.

### 3.1.3. Yapı Elemanları

Günümüzde ilaçlama makinesi üreticileri genellikle kolay bulunabilir olması, ucuz olması ve işleme kolay olması sebebiyle çelik malzemelerle üretim yapmaktadır. (Khalifeh vd. 2018). İlaçlama makinesi kanatları gibi uç noktası mesnetten uzak olan sistemlerde etkiyen momentin yüksek olması sebebiyle bu profillerin mukavemetli olması için ekstra malzeme ve kafes sistemi tasarıma sahip olması gerekmektedir. Tarım makinelerinde en çok bulunan yapı çeliği olan St37 (S235) tercih edilse de son yıllarda ise çekme mukavemetinin fazla olması, talaşlı imalata uygun olması, ve maliyeti karşılanabilir düzeylere inmesi sebebiyle St52(S355) sınıfı çelik profiller de tercih edilmektedir. Bu iki malzeme, birbirinden içerdikleri elementlerin oranları bakımından ayrılık göstermektedir. İki yapı çeliğinin kimyasal birleşim oranları Çizelge 3.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. St 37 ve St 52 Çeliklerinin Kimyasal İçerik Karşılaştırması (Khalifeh vd, 2018)

Malzeme	Fe	C	Mn	Ni	Cr	Mo	Si	P
St37	küresel	0,131	0,321	<0,005	0,044	0,005	0,155	0,015
St52	küresel	0,206	1,36	<0,005	0,003	0,005	0,485	0,014

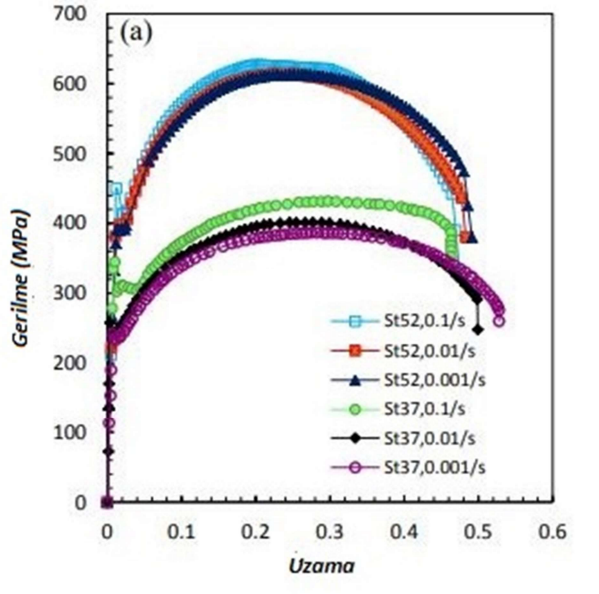
Kimyasal özellikleri belirtilen iki çeliğin Çizelge 3.2.'de mekanik özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. St37 ve St52 Çeliklerinin Mekanik Özellikleri (Seitl vd. 2020)

Özellik	St37 (S235)	St52 (S355)
Young Modülü (GPa)	208.2±4.1	205.4 ±7.4

Akma Mukavemeti (MPa)	276.87±0.31	381.94±6.22
Kopma Mukavemeti (MPa)	423.86±1.49	554.41±1.62
Kopma Uzaması (%)	21.99±0.22	34.22 ±1.54
Poisson Oranı (-)	0.3	0.3

İki çelik malzemesi karşılaştırıldığında, St37'nin akma mukavemeti  $276 \frac{N}{mm^2}$  iken, St52'nin akma mukavemeti  $382 \frac{N}{mm^2}$ 'dir. İki malzemenin gerilme-şekil değiştirme grafiği karşılaştırması Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. St 37 ve St 52 Malzemelerin Gerilme-Şekil Değişirme Grafikleri Karşılaştırması (Khalifeh vd, 2018)

Çizelgelerden ve grafikten anlaşılacağı üzere, hem akma mukavemeti, hem de kopma mukavemeti St 52 malzemedede daha yüksektir. Malzeme dayanımının yüksek olması sebebiyle daha ince profillerle aynı kanat dayanımı elde edilebilmekte, bu da ağırlığın azalmasına yol açmaktadır. Tasarlanan kanatta da bu sebeplerle yükün fazla olduğu yerlerde St37 profiller, yükün fazla ve malzeme ağırlığının düşük istendiği yerlerde St52 çelik saclar tercih edilmiştir.

### **3.1.4. Kanat Tasarımında Kullanılan Elemanlar**

Tasarlanan ilaçlama makinesi kanadında, ana yapı olarak St 37 profiller ve St52 çelik sac malzeme kullanılmıştır. Kanatlar iki adet sağda, iki adet solda olmak üzere 4 dış kanattan, bir adet de bu kanatları taşıyan merkez şasiden oluşmaktadır. Yol konumunda iken dış kanatlar merkez şasi üzerinde toplanırken, tarla konumunda dış kanatlar sağa ve sola teleskopik bir şekilde açılmaktadır. Teleskopik hareketi sağlamak için, konum kontrollü bir servo elektrik motoru ile tahrik edilen bir dişli, kremayer dişlisini hareket ettirmekte, kremayer dişlisinin bağlı olduğu kanat da doğrusal yönde hareket edebilmektedir.

Kanadın doğrusal hareketini kolaylaştırmak ve diğer kanat parçalarına sabitlemek amacıyla lineer ray sistemi bulunmaktadır. Lineer ray sistemi, özel şekillendirilmiş doğrusal bir profil üzerinde bilyalı rulmanla yataklanmış bir tekerleğin hareket etmesiyle oluşmaktadır. Hareket edecek kanat parçası da bu tekerlek üzerine monte edilmiştir. Böylece iki kanat arasında elektrik motoru tahrikli doğrusal izafi bir hareket mümkün olmaktadır.

Kanatlar üzerinde 50 cm aralıklarla yerleştirilmiş 24 adet ilaçlama memesi bulunmaktadır. Sağ ve sol kanatlarda beşer adet, merkez şaside ise 6 adet hava emişli yelpaze hüzmeli ilaçlama memesi bulunmaktadır. Memelerin bağlı olduğu su boruları, katlanma sırasında merkez şasisi ile teması önlemek amacıyla kanat profilinin içerisinde olacak şekilde montajlanmıştır. Teleskopik açılıp kapanma sırasında memelere su ileten boruların esnek kısımları, bu harekete göre tasarlanmalıdır. Tarla konumunda iken iki kanat arasındaki esnek boruların uçları birbirine çok yakın iken, yol konumunda kanatlar merkez şaside toplanınca esnek boruların uzunluğunun aradaki mesafeye uygun olması gerekmektedir. Bu amaçla her kanat parçasında bulunan meme gruplarına giden boruların ayrı olması gerekmektedir. Bu yüzden kanadın monte edileceği ilaçlama makinesinin regülatöründe 5 adet dağıtıcı valf bulunması gerekmektedir.

### **3.1.5. Teleskopik Hareket Mekanizması**

Kanatların katlanma mekanizması doğrusal teleskopik yapı olarak tercih edildiğinden, doğrusal hareketi mümkün kılan makine elemanları tercih edilmiştir. Elektrik motorlarının çıkışına takılan düz dişli, kremayer dişlisini doğrusal yönde hareket ettirecektir. Kremayer dişlinin bağlı olduğu kanat da doğrusal hareket yapacaktır. Bu da iki kanat arasında izafi bir harekete sebep olacaktır. Elektrik motorları orta kanatların merkez şasiye yakın olan ucunda,

dış kanatların ise orta kanada yakın ucunda bulunacaktır. Orta kanatta bulunan motorlar, merkez şaside bulunan kremayer dişlileri üzerinde hareket ederek orta kanatları sağ ve sol yönde hareket ettirmektedir. Dış kanatlardaki elektrik motorları ise orta kanatlardaki kremayer dişlileri üzerinde hareket ederek dış kanatları sağ ve sol yönde hareket ettirecektir. Kremayerlerin hareket edecek kanatlarda olmamasının sebebi, özellikle dış kanata konulacak bir kremayerin ağırlığı sebebiyle ekstra bir moment yaratmasının oluşturduğu tehlikedir. Kanatların birbirine göre bu izafi hareketleri ilaçlama makinesinin yol ve tarla konumuna gelmesini sağlayacaktır. Elektrik motorlarının konum kontrollü olması sayesinde ise, tarla konumuna alınması sırasında kremayer dişlileri en son dişe gelmeden motorlar duracak ve hedeflenen iş genişliği sağlanmış olacaktır.

Kremayer dişlileri, n=3 modüle sahip, 20 mm genişliğinde ve kanat boyunca uzunluğa sahiptir. Bu uzunluklar ana kanatta 2800 mm, orta kanatlarda 2400 mm'dir.

Kremayer dişli mekanizmasını tahrik etmek amacıyla, her kanat için birer adet olmak üzere toplamda 4 adet konum kontrollü servo elektrik motor ve bunları kontrol etmek için motor sürücüler kullanılmıştır. Bu motorlar sürücü kabininden otomatik veya manuel şekilde kontrol edilebilmektedir. Bu özelliklere uygun motor olarak, arabalarda kullanılan silecek motorları tercih edilmiştir. Bunun sebebi olarak, 12 V akü voltajı ile çalışmaya uygun olması, 60 d/d dönme hızına sahip olması sebebiyle kanatları istenen hızla açıp kapayabilmesi ve diğer step motorlara göre düşük maliyetli olmasıdır. Kullanılan elektrik motorunun özellikleri Çizelge 3.3.'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Elektrik Motorunun Özellikleri

Özellik	
Redüktör Tipi	L
Devir	60 d/d
Çalışma Voltajı	12V
Zorlanma Akımı	5.2 A
Mil Kalınlığı	10 mm

Kanatların doğrusal hareketini sağlayacak olan elektrik motoru Şekil 3.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Elektrik Motoru

Kanatların doğrusal hareketini kolaylaştırmak ve elektrik motorlarının ömrünü uzatmak amacıyla doğrusal bir yataklama gerekmektedir. Bu amaçla, merkez şasi ve orta kanat tasarımında sacların bükülmesi ile doğrusal bir ray şekli oluşturulacak, bu ray üzerine de üst ve altta ikişer adet olmak üzere 4 adet tekerlek oturtulacaktır. Bu tekerlekler hareket edecek kanat profiline bağlandığında, bağlı olduğu kanat parçası, doğrusal hareket edebilecektir. Bu şekilde kanatlar birbiri üzerinde çekmeceye benzer şekilde hareket edebilecektir.

### 3.1.6. Sönümleyici Yaylar

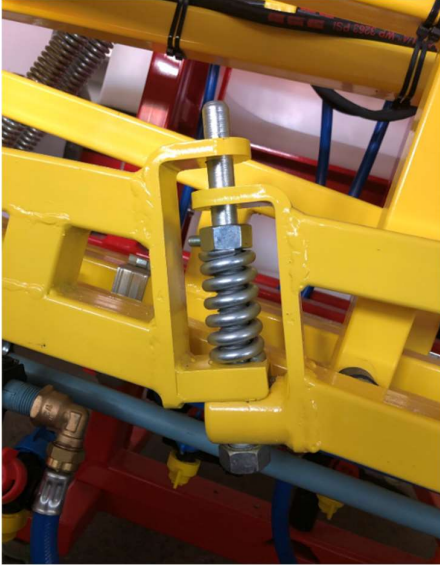
İlaçlama makinelerinin kanatlarında, çalışma koşullarında iki eksende momentler oluşmaktadır. Bu momentler literatürde yuvarlanma (roll) ve savrulma (yaw) momenti olarak geçmektedir. (Şekil 3.5.)



Şekil 3.5. İki eksendeki bum hareketleri. (a) Yuvarlanma (Roll) momenti (b) Savrulma (Yaw) momenti (Bjornsonn vd. 2013).

Bu momentlerin çeşitli mekanizmalarla sönümlenmesi gerekmektedir. Aksi halde ilaç dağılım düzgünlüğü bu momentlerin yarattığı yükseklik, hız, debi farklılığı sebebiyle bozulmaktadır. Günümüzde bu momentleri sönümlmek için aktif ve pasif süspansiyon sistemleri kullanılmaktadır. Yapılacak tasarım 12 metre iş genişliğine sahip olacağı için, pasif süspansiyon momentleri sönümlmek için yeterli olacaktır. Bu amaçla, merkez kanat şasisi üzerine bum sisteminin yuvarlanma momentini sönümlmek için çekme yayları konulacaktır. Bu yaylar ile hem sağ-sol, hem de ileri geri yöndeki hareketler azaltılacaktır (Bjornsonn vd, 2013).

Buna ek olarak, iş genişliğinin fazla olması nedeniyle, kanat uçlarının bir engele veya yere temas etmesiyle oluşacak gerilmelerin, tamamen doğrusal hareketle açılıp kapanacak olan kanat mekanizmasını deforme edebilme tehlikesi bulunmaktadır. Bu etkiyi yok edebilmek için, sağ ve sol dış kanatlar, iki parça halinde imal edilip, bunların arasına dıştaki parçanın bir dış etkene temas etmesi durumunda esneyebilmesi amacıyla burulma yayı mekanizması eklenecektir. Böylece, kanadın diğer elemanları bu dış kuvvetten etkilenmeyecektir. Halihazırda kullanılan örnek bir burulma yay mekanizmasının kanatlar üzerindeki görünüşü Şekil 3.6'daki gibidir.



Şekil 3.6. Burulma Yayı Mekanizması



### 3.1.7. Solidworks Programı

SolidWorks yazılımı, dünyada üretim ve Ar-Ge sektörlerinde basit ara yüzü, kullanım kolaylığı, erişilebilirliği ve yaygın kullanımı sebebiyle sıkça tercih edilmektedir. Aynı zamanda içerisinde bulunan tasarım kütüphanesi sayesinde, başta ISO olmak üzere birçok dünya standardına göre ölçülendirilmiş cıvata, somun, dişli, kama gibi yapı elemanları hazır olarak tasarıma eklenebilmektedir. Bu çalışmada da tasarım yapmak, yapılan tasarımın üzerinde değişiklik yapmak, çizimleri teknik resme aktarıp tezgah operatörünün anlayacağı dile çevirmek amacıyla Solidworks yazılımı kullanılmıştır (Dassault Systems, Tennessee, 2018) İlk tasarım ve montajdan sonra, malzemelerin statik ve dinamik koşullarda dayanımlarını belirlemek, kritik kesitleri belirlemek, minimum malzeme ile maksimum mukavemet elde etmek amacıyla, yapısal analizler yapılmıştır. Bu analizler hem kanadın her bir elemanına ayrı ayrı, hem de montajlanmış ve parçalar arasındaki montaj ilişkileri tanımlanmış şekilde yapılmıştır. Analiz yazılımı olarak yine Solidworks yazılımının Simulasyon modülü kullanılmıştır. (Dassault Systems, Tennessee,2018). Bu yazılımın tercih edilme nedeni, Solidworks yazılımında çizilen parçaların kendi içinde montaj ilişkileri ile beraber okunabilmesi, hem Von-Mises gerilmeleri hem de yer değiştirme grafiklerini görebilme imkanına sahip olunmasıdır.

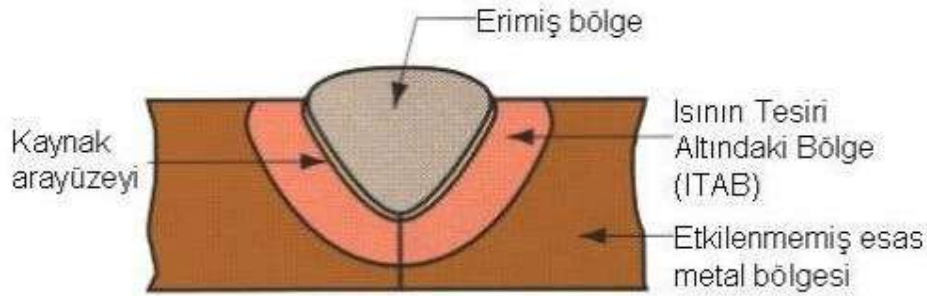
### 3.2. Yöntem

Tarla tipi ilaçlama makineleri için teleskopik katlama mekanizmasına sahip kanat tasarımı yapılırken, öncelikle, piyasada halihazırda kullanılan yerli üretim ve ithal ilaçlama makinelerinin kanat mekanizmaları incelenmiştir. Bu amaçla, Tekirdağ ve Trakya bölgesindeki çeşitli tarım işletmeleri ve aile çiftlikleri ziyaret edilip çiftçilerin kanatlarla ilgili yaşadıkları sorunları incelenmiş ve tasarım kriterleri oluşturulurken bu problemler göz önüne alınmıştır.

Tasarlanacak ilaçlama kanadı için birinci tasarım kriteri, Trakya Bölgesi'nde en çok tercih edilen ilaçlama makinesi iş genişliği olan 12 metre iş genişliğine sahip bir tasarım olmasıdır. Çiftçiler, hububat ekimlerini izli şekilde yaptıklarında, iki iz arası genişliği ilaçlama ve gübreleme makinelerine göre ayarladıkları için, mevcut genişliklerin dışında bir tasarım yapmak kullanışsız olacaktır. Yelpeze hüzmeli memelerde, iki meme arası önerilen mesafe 50 cm olduğundan, 12 metre iş genişliği için 24 adet yelpeze hüzmeli memeyi, hortumları ve bağlantı rekorları ile birlikte taşıyacak bir kanat tasarımına ihtiyaç vardır.

Tasarım için diğerk bir kriter ise, ilaçlama kanatlarının traktörün engebeli arazide ilerlemesi sonucu oluşan dikey ve yatay eksenindeki hareketleri sönümleyecek kadar rijit bir yapıda olması gerektiğidir. Bu yüzden tasarımda hem hafif, hem de eğilme ve çekme zorlanmalarına dayanıklı bir yapı amaçlanmıştır. Mevcut ilaçlama makineleri kanatları, hem maliyeti düşürmek hem de hammaddeye kolay ulaşmak amacıyla çelik profillerden üretilmektedir. Çelik profillerde ilaçlama makinesi kanadı gibi mesnet noktası ile en uç nokta arası mesafesi yüksek olan tasarımların mukavemet açısından güvenli olması için kafes sistem kullanılmakta, bu da kanat yapısını hantallaştırmaktadır. Konulan her profil ekstra ağırlığa sebep olmakta, bu da tekrar yapısal dayanımın sınırlarını zorlamaktadır. Bu da bir kısır döngüye benzer şekilde tasarım problemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Buna ek olarak, profiller birbirine kaynak yöntemleri ile bağlanmaktadır. Kaynakla bağlantıların en büyük problemi, literatürde heat affected zone (HAZ) olarak geçen, kaynağın yarattığı yüksek ısı sebebiyle genişleyen ve yapısı bozulan bölge oluşmasıdır (Şekil 3.7.).

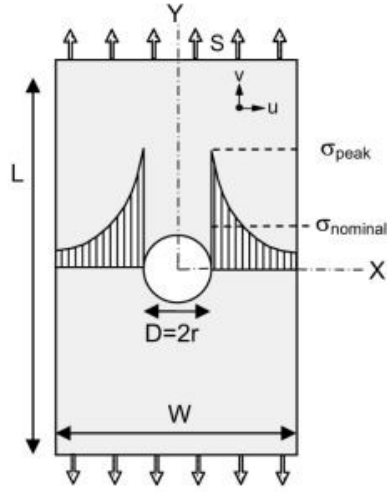


Şekil 3.7. Isı Tesiri Altındaki Bölge Oluşumu (Anonim,2021o)

Kaynak yapılırken bu genişleyen ve yapısı bozulan bölge sebebiyle, hem malzemenin dayanımı düşmekte, hem de genişleme sonucu bozulan ölçü ile kanadın doğrusallığı bozulabilmektedir. Ayrıca, kaynak malzemesinin dayanımı her zaman profil malzemesinin dayanımından düşük olduğu için, yapısal olarak tehlikeli bölgeler de oluşmaktadır. (Lee vd, 2014).

Son yıllarda hafif ve dayanıklı ilaçlama makinelerinde sac levha kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Sac levha bükme makinelerinde istenilen açılarda bükülüp, zorlanmaya maruz kalmayan kesitler çıkarılarak, hem yekpare, hem hafif, hem de dayanıklı tasarımlar elde edilebilmektedir. Tabii ki iki sac levhanın birbirine montajında cıvata veya vida

gibi elemanlar çentik etkisine sebep olabildiği için (Şekil 3.8.), kaynaklı bağlantı daha sağlıklı olmaktadır.



Şekil 3.8. Bir cıvata deliği etrafında oluşan gerilmeler (Savruk ve Kazberuk,2009)

Ama sac levhalarda çevresel kaynak yerine nokta kaynağı yapıldığı için ısı tesiri altındaki bölge dar olmakta ve tehlikeli kesitlerde kaynak olmadığı sürece, bükme sac ile tasarım oldukça mukavemetli ve görece hafif bir yapıya sebep olmaktadır. Sac levhaların ilaçlama makinelerinin kanatlarında kullanılmasının diğer bir avantajı ise, ilaçlama memelerinin ve bunların bağlandığı boruların, bükme sac tasarımı içine yerleştirilmesi sayesinde, bu memelerin yere veya bitki üzerine çarpma sonucu kırılma, tıkanma vb, olumsuzlukların önüne geçilebilmektedir. Şekil 3.9.'da, ilaçlama memeleri kanat profili içerisine yerleştirilmiş tasarımlar görülmektedir.

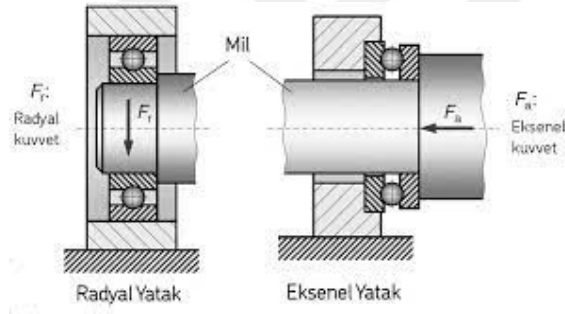


Şekil 3.9. İlaçlama Memelerinin Kanat Profili İçerisine Yerleştirildiği Tasarımlar (Anonim, 2021p)

Yapılan tasarımda da bükme sac levha tercih edilmiştir. Malzeme olarak da sünekliği sayesinde kolay bükülebilmesi ve akma mukavemetinin fazla olması sebebiyle St-52 (S355) malzeme tercih edilmiştir.

Tüm kanat parçaları, bağlantı elemanları ile beraber Solidworks programında çizilip, montajlanmıştır.

Teleskopik tasarımda, kanatların birbiri üzerindeki hareketindeki sürtünmeyi azaltmak amacıyla, lineer ray ve tekerlek tasarımı yapılmıştır. Her kanat parçası diğer kanat parçasının üzerinde doğrusal hareketi tekerlekler yardımıyla yapmaktadır. Bu tekerlekler ve göbeklerinde kullanılan rulmanlar, yatağın gövdesine etkileyen radyal yüke (Şekil 3.10.), kanatların açılma kapanma sıklığına bağlı olarak yorulma dayanımına ve malzemeye göre seçilmiştir.



Şekil 3.10. Bir Rulmana Etkiyen Kuvvetler (Temiz, 2021)

Ön tasarım tamamlandıktan sonra dayanımı ölçmek için, Solidworks programının Simülasyon modülü sayesinde kanat parçaları ayrı ayrı statik analizde incelenmiştir. Bu incelemelerde, tehlikeli kesitler ve zorlanmaya en çok maruz kalan yerler belirlenmiş, bu bölgelere uygun güçlendirmeler ve tasarım değişikliği yapılmıştır. Zorlanmaya maruz kalmayan bölgelerde ise, malzeme çıkarımına gidilmiş, sac levhaların zorlanmaya maruz kalmayan kesitlerinden malzeme çıkarılarak tasarım hafifletilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, bu yapısal analizler sonucunda en hafif malzeme ile en yüksek mukavemetli tasarım elde edilmiştir.

Tasarımlar ve analizler bittikten sonra, üretim aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada, Tekirdağ Yeni Sanayii Sitesi içerisinde tarım alet ve makineleri üretimi ve tamiri yapan Nedimler Ziraat Aletleri A.Ş. firmasının desteğiyle, üretim yapılmıştır. Sac levhaların çizimleri sac levha bükümü yapan firmaya gönderilip ürettirilmiş, geri kalan montaj, yataklama ve ilaçlama makinesi üzerinde çalıştırma aşamaları Nedimler firmasında yapılmıştır.

### 3.2.1. Tasarım

Teleskopik mekanizmaya sahip 5 parçalı ilaçlama makinesi tasarımında öncelikle şematik bir tasarımla, olası mesnetlerin, destek elemanlarının ve tekerleklerin yerleri belirlenmiştir. Şekil 3.11.'de tasarımın önden görünüşü şematik olarak gösterilmiştir.

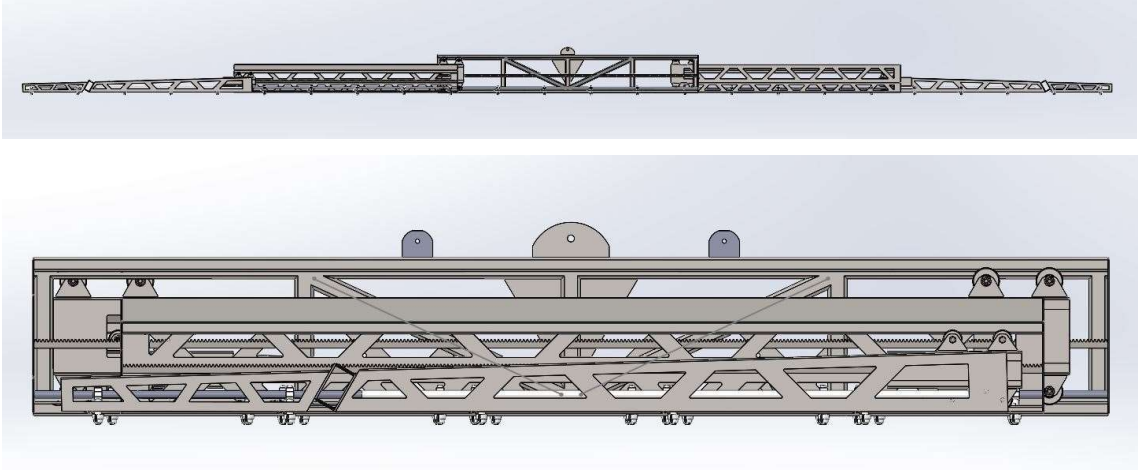


Şekil 3.11. Tasarımın şematik olarak önden görünümü

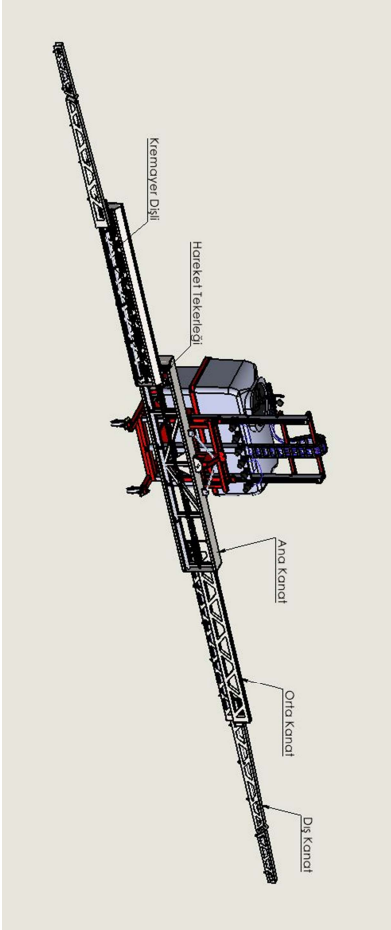
Şekilde, mavi çerçeveli kısım ana kanat, kahverengi çerçeveler orta kanatlar, yeşil çerçeveli kısımlar ise dış kanatlar olarak belirlenmiştir. Teleskopik harekette, orta kanat ana kanat üzerinde, dış kanatlar ise orta kanatlar üzerinde doğrusal hareket yapacaktır. Böylece çalışma ve yol konumları arası geçişler doğrusal şekilde olacaktır.

Doğrusal hareketi sağlamak amacıyla, kanatlar arasına üstten ve alttan ikişer adet tekerlek olmak üzere toplam dört adet tekerlek monte edilmiştir. Bu sayede hem tekerleklere gelen yükler paylaşılacak hem de daha stabil bir doğrusal hareket elde edilmiştir. Tekerleklerin hareket edeceği kısımlar da kanatlar üzerindeki özel bükülmüş saclardan oluşmuştur. Kanatlar üzerinde tekerleğin hareket edeceği kısımlar ray şeklinde bükülerek, bu kısımlara tekerlekler yerleştirilmiştir.

Oluşturulan tasarımın Solidworks programındaki modellenmesi Şekil 3.12. ve 3.13.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Teleskopik Kanat Sistemi Yol ve Çalışma Konumu



Şekil 3.13. Teleskopik Kanat Sistemi Çalışma Konumu

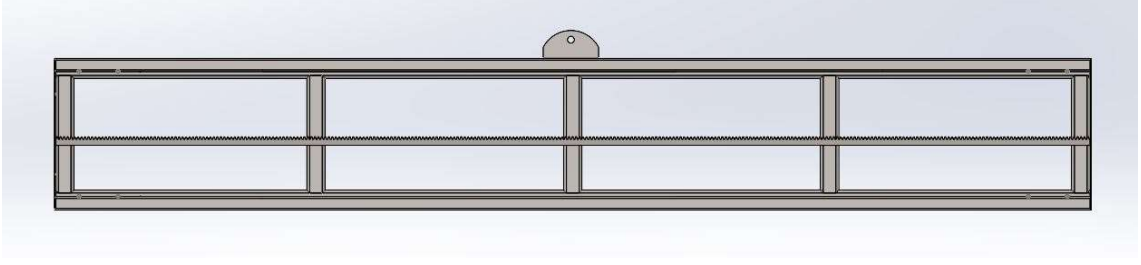
### 3.2.1.1. Ana Kanat Tasarımı

Ana kanat, kanat mekanizmasının tam ortasında bulunan, yol konumu ve çalışma konumlarında sabit duran kanat parçasıdır. Ana kanat tasarımında hem kare profiller hem de bükme sac levhalar tercih edilmiştir. Kare profiller ile, hem orta ve dış kanat parçalarını taşıyacak olan sac levhalara destek sağlanmış, hem de tüm kanadın ilaçlama makinesi asansörüne bağlantısı için bir iskelet görevi görmesi amaçlanmıştır. Üst ve altta yatay şekildeki 50x50x4 mm ölçülü kare profiller arasına dikey yönde ve belirli aralıklarla aynı ölçülere sahip kare profiller kaynaklanmıştır. Bu profillere üst ve alt taraftan, orta kanatları taşıyacak olan 4 mm kalınlıkta bükme saclar kaynaklanmıştır. Sacların çalışma ve yol konumunda gelen yüklemelere karşı eğilmemesi için profiller ve saclar, sağ ve sol yanlardan sac levhalarla birbirine bağlanmıştır.

Toplamda 24 adet yelpaze hüzmeli ilaçlama memesinden 4 adedi ana kanat üzerine konmuştur. Bu memeler ve memelere ilaç ileten borular, alt sacın hemen üstünde profillere sabitlenmiştir. Alt saca, 50 cm aralıklarla meme uçlarına denk gelecek şekilde 4 adet 12 mm çaplı delik açılmıştır.

Ana kanat üzerine, orta kanatlarda bulunan elektrik motorları ile tahrik edilen dişlilerin üzerinde hareket ederek kanatları açıp kapatacağı kremayer dişliler monte edilmiştir. Bu kremayer dişlileri çok fazla moment iletmeyeceği için hafif malzeme olan sert plastikten imal edilmiştir.

Kanat sisteminin ilaçlama makinesi asansör şasisine bağlantısı için, ana kanadın üst sacına, bağlantı lamaları kaynaklanmıştır. Kanatlar, asansör şasisine bu lamalarla bir pim bağlantısı yardımıyla bağlanacaktır. Buna ek olarak, yuvarlanma momentlerini karşılamak amacıyla sönümlenme yaylarının bağlanacağı lamalar da üst saca kaynaklanmıştır. Ana kanadın Solidworks programındaki modellemesi Şekil 3.14., 3.15. ve 3.16.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Ana Kanat Ön Görünümü



Şekil 3.15. Ana Kanat Yan Görünümü (Sacların Bükümünü Göstermek amacıyla yan destek levhaları şeffaflaştırılmıştır.)



Şekil 3.16. Ana Kanat İzometrik Görünümü

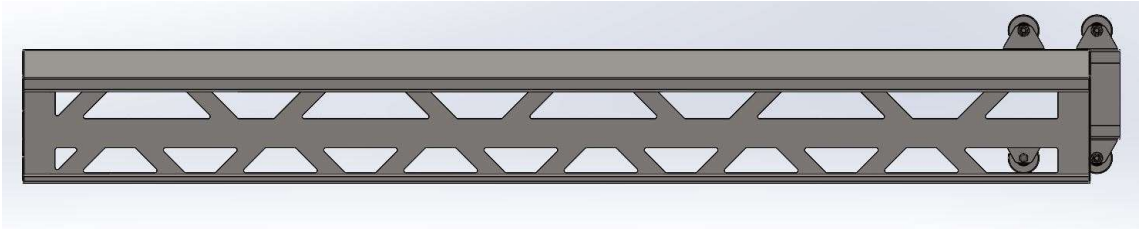


### 3.2.1.2. Orta Kanat Tasarımı

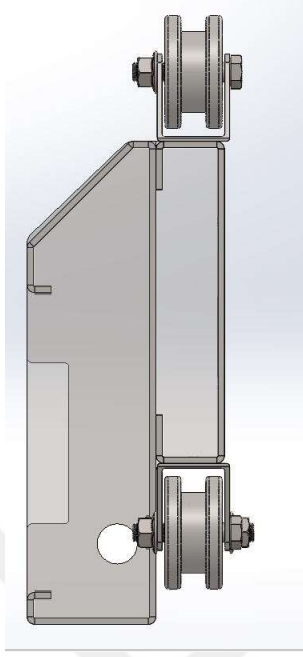
Teleskopik kanat sisteminin ikinci yapı elemanı orta kanatlardır. Orta kanatlar, ana kanat üzerinde doğrusal hareket yaparak tarla konumuna geçmekte, ayrıca üçüncü yapı elemanı oluşan dış kanatları taşımaktadır. Orta kanat iki farklı şekilde bükülmüş 4 mm'lik sac levhaların birbirine nokta kaynağı ile kaynaklanması ile oluşmuştur. Bu sac levhaların iç tarafta kalanı, orta kanadın doğrusal hareketini sağlayan 4 adet tekerleğin bulunduğu sactır. C harfi şeklinde bükülmüştür. Sac levha üzerinde ağırlığı azaltmak amacıyla, kuvvet akışına uygun şekilde parçalar kalmak suretiyle, çekme geriliminin az olduğu veya olmadığı bölgeler lazer kesimle çıkarılmıştır. Sac levhanın üst ve alt yüzeylerine 165 mm aralıklarla ile tekerlekler bağlanmıştır. İki tekerlek arası mesafenin fazla olma sebebi, dış kanadın ağırlığı yüzünden oluşan kuvvetleri dengelemektir. Bağlama elemanı olarak her bir tekerlek için ikişer adet M12 cıvata kullanılmıştır.

İkinci sac levha ise dış kanadın doğrusal hareketine olanak vermek amacıyla ana kanada benzer şekilde bükülmüştür. Dış kanat bu sac boyunca tekerlekler vasıtasıyla doğrusal hareket yapmaktadır. Bu sac levhadan da iç taraftaki levhada olduğu gibi tehlikeli olmayan bölgelerde lazer kesimle parça çıkarılarak hafifletme yapılmıştır. Dış kanadın hareketleri yüzünden ikinci sac levhanın sehim vermesini engellemek için, bu levhanın iki ucu, 3 mmlik sac levhalar ile kapatılmıştır. İlaçlama borularının yerleşimi için üzerlerinde 20 mmlik delikler açılmıştır.

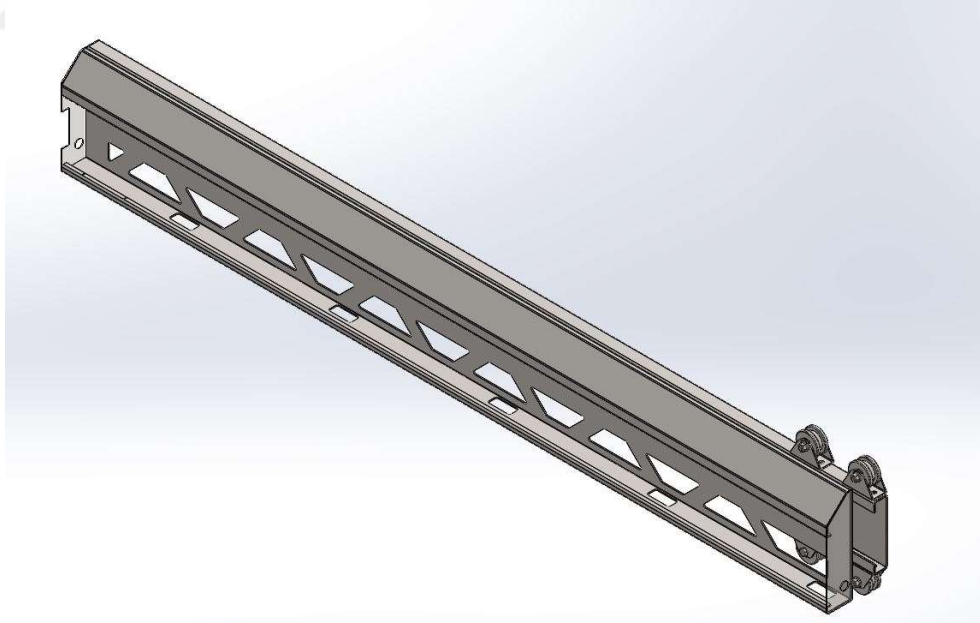
Ana kanada benzer olarak, dış kanatlarda bulunan elektrik motorları ile tahrik edilen dişlilerin üzerinde hareket ederek kanatları açıp kapatacağı kremayer dişliler monte edilmiştir. Bu kremayer dişlileri çok fazla moment iletmeyeceği için hafif malzeme olan sert plastikten imal edilmiştir. Orta kanadın Solidworks modellemesi Şekil 3.17.,3.18. ve 3.19.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Orta Kanadın Ön Görünümü



Şekil 3.18. Orta Kanadın Yan Görünümü (Sacların Bükümünü Göstermek amacıyla yan destek levhaları şeffaflaştırılmıştır.)



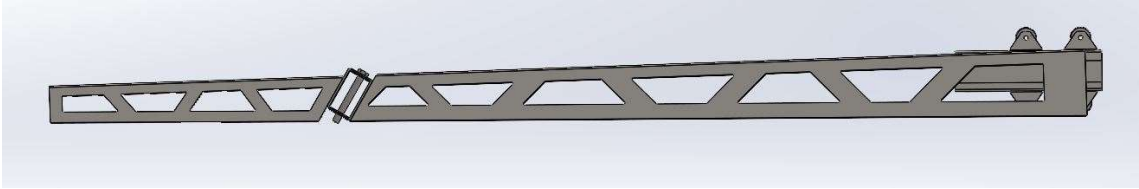
Şekil 3.19. Orta Kanadın İzometrik Görünümü

### 3.2.1.3. Dış Kanat Tasarımı

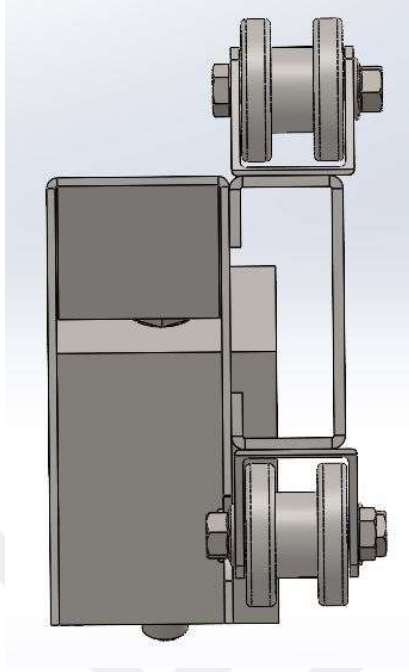
Teleskopik kanat sisteminin üçüncü elemanı dış kanatlardır. Dış kanatlar, kanat sisteminin en dışında bulunmakla birlikte, orta kanat üzerinde doğrusal hareket yaparak tarla konumuna geçmektedir. Dış kanat iki farklı şekilde bükülmüş 3 mm'lik sac levhaların birbirine nokta kaynağı ile kaynaklanması ile oluşmuştur. Bu kanatta hem taşıyacak ekstra bir kanat olmadığı için hem de orta kanada binen yüklerin azaltılması için 3 mm sac kullanılmıştır. Bu sac levhaların iç tarafta kalanı, dış kanadın doğrusal hareketini sağlayan 4 adet tekerleğin monte edildiği. C harfi şeklinde bükülmüştür. Sac levha üzerinde ağırlığı azaltmak amacıyla, kuvvet akışına uygun şekilde parçalar kalmak suretiyle, çekme geriliminin az olduğu veya olmadığı bölgeler lazer kesimle çıkarılmıştır. Sac levhanın üst ve alt yüzeylerine 130 mm aralıklarla tekerlekler bağlanmıştır.

İkinci sac levha da iki parçadan oluşmaktadır. Bu iki parça birbirine bir civata ve civata etrafına sarılmış burulma yayı ile bağlanmıştır. Burulma yayının kullanılma sebebi, dış kanadın herhangi bir engele ve yere çarpma durumunda yay yardımıyla vurma yönünde açılarak, sistemin kırılmasını ya da çatlamasını engellemektir. İki parça da, içlerine püskürtme memeleri ve borularını alacak şekilde U şeklinde bükülmüş sacdan oluşmaktadır. Kuvvet akışının azaldığı yöne doğru kanadın yüksekliği azalmaktadır. Bu iki parçadan da ağırlığı azaltmak amacıyla, kuvvet akışına uygun şekilde parçalar kalmak suretiyle, çekme geriliminin az olduğu veya olmadığı bölgeler lazer kesimle çıkarılmıştır.

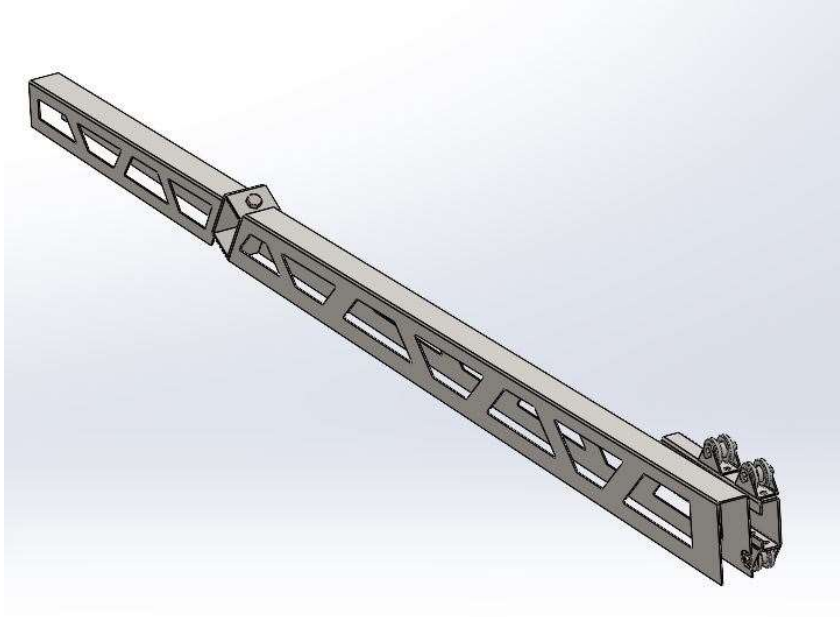
Dış kanadın Solidworks modellemesi Şekil 3.20., 3.21. ve 3.22.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Dış Kanadın Ön Görünümü



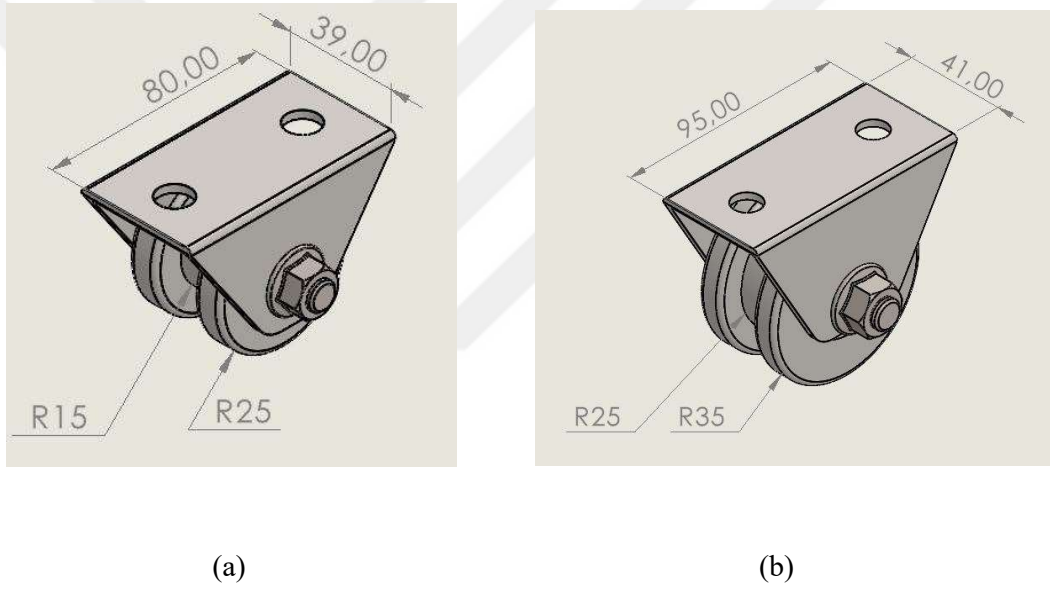
Şekil 3.21. Dış Kanadın Yan Görünümü



Şekil 3.22. Dış Kanadın İzometrik Görünümü

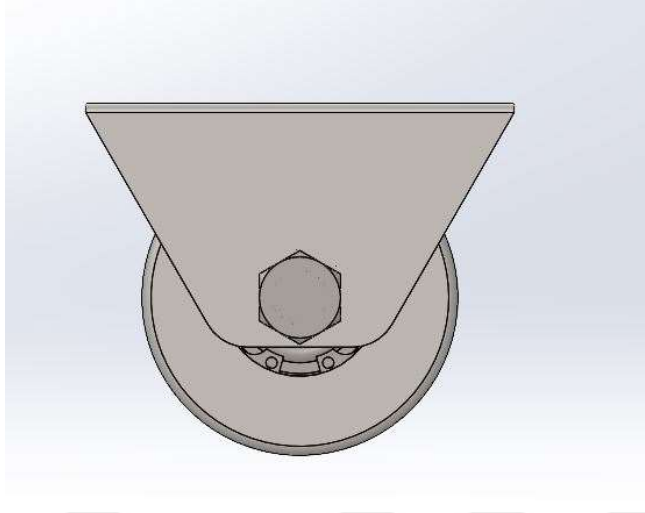
### 3.2.1.4. Tekerlek Tasarımı

Doğrusal hareketi mümkün kılmak için, hareketli olan orta kanat ve dış kanat parçalarının iç taraftaki saclarına, üst ve altta ikişer adet olmak üzere 4 adet tekerlek yerleştirilmiştir. Orta kanatları taşıyan tekerleklere aynı zamanda dış kanatların da yükü bineceği için bu tekerlekler dış kanat tekerleklerinden daha geniş çaplı imal edilmiştir. Tekerlek sistemi, bir adet 4 mm sacın bükülmesiyle elde edilmiş U şeklindeki parçanın içine çelik milden tornada imal edilmiş bir tekerleğin yataklanmasıyla oluşturulmuştur. İki tekerlek birbirine dış görünüş olarak benzese de, dış ölçüleri ve rulman çapları birbirinden farklılık göstermektedir. Şekil 3.23.'te iki tekerleğin izometrik görünüşleri gösterilmiştir.

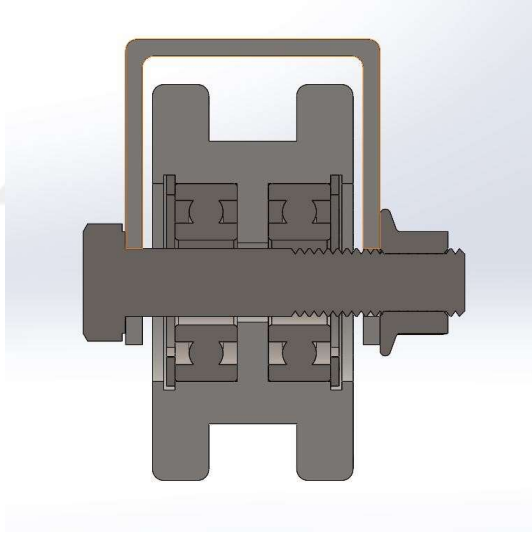


Şekil 3.23. Dış Kanat (a) ve Orta Kanat (b) Hareket Tekerleklerinin Görünümü

Orta kanatları taşıyan tekerlekler 70 mm çapa sahiptir. Sac parçaya M12 civatayla yataklanmış olup, yataklama elemanı olarak iki adet 6202 nolu radyal bilyalı rulman kullanılmıştır. Rulmanlar tekerleğin göbeğine sıkı seçme ile yerleştirilip, birer adet iç segman ile tespitlenmiştir. Sac parçalar ise ikişer adet M12 civata ile orta kanat gövdesine bağlanmıştır. Orta Kanat Taşıyıcı tekerleğin görünümü Şekil 3.24. ve 3.25.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Orta Kanat Taşıyıcı Tekerleği Ön Görünümü



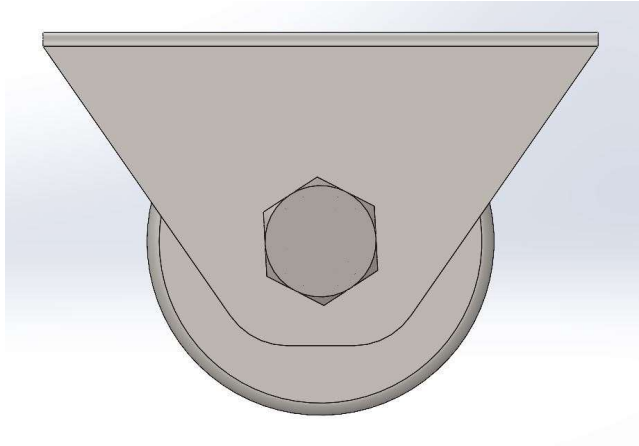
Şekil 3.25. Orta Kanat Taşıyıcı Tekerleği Kesit Görünümü

Orta kanadın hareket tekerleklerinin yataklanmasında SKF marka 6202 numaralı radyal bilyalı rulman kullanılmıştır. Rulmanın teknik özellikleri Çizelge 3.4.'te gösterilmiştir.

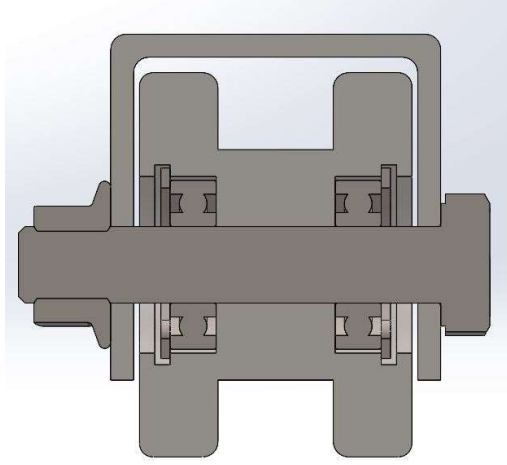
Çizelge 3.4. SKF 6202 Radyal Bilyalı Rulman Teknik Özellikleri

Özellik	Ölçü
İç Çap	15 mm
Dış Çap	35 mm
Genişlik	11 mm
İç Bilezik Dış Çapı	21,7 mm
Dış Bilezik İç Çapı	30,5 mm
Dinamik Yükleme Katsayısı (C)	8,06
Maksimum Dönüş Hızı	22000 d/d

Dış kanatları taşıyan tekerlekler 50 mm çapa sahiptir. Sac parçaya M10 civatayla yataklanmış olup, yataklama elemanı olarak iki adet 61900 nolu radyal bilyalı rulman kullanılmıştır. Rulmanlar tekerleğin göbeğine sıkı seçme ile yerleştirilip, birer adet iç segman ile tespitlenmiştir. Sac parçalar ise ikişer adet M12 civata ile orta kanat gövdesine bağlanmıştır. Dış Kanat Taşıyıcı tekerleğin görünümü Şekil 3.26. ve 3.27.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Dış Kanat Taşıyıcı Tekerleğin Ön Görünümü



Şekil 3.27. Dış Kanat Taşıyıcı Tekerleğin Kesit Görünümü

Dış kanadın hareket tekerleklerinin yataklanmasında SKF marka 61900 numaralı radyal bilyalı rulman kullanılmıştır. Rulmanın teknik özellikleri Çizelge 3.5.'te gösterilmiştir.

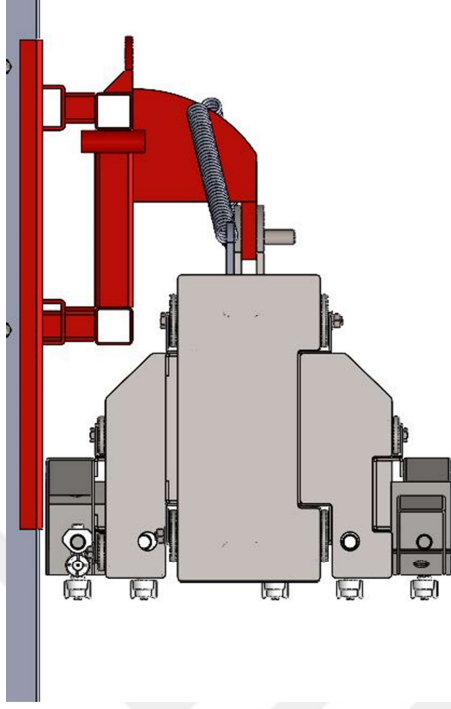
Çizelge 3.5. SKF 61900 Radyal Bilyalı Rulman Teknik Özellikleri

Özellik	Ölçü
İç Çap	10 mm
Dış Çap	22 mm
Genişlik	6 mm
İç Bilezik Dış Çapı	19,4 mm
Dinamik Yükleme Katsayısı (C)	2,7
Maksimum Dönüş Hızı	20000 d/d

### 3.2.1.5. Asansör Şasisi Bağlantısı ve Yaylar

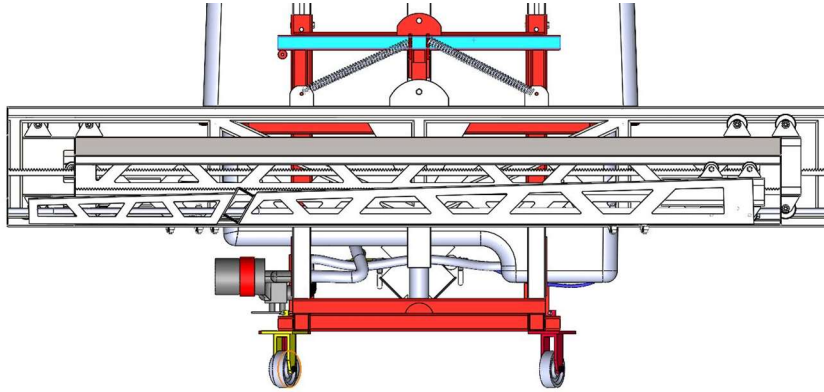
Teleskopik kanat sisteminin ilaçlama makinesinin asansör şasisine bağlantısında, orijinal kanatların bağlandığı tasarım değiştirilerek, yeni kanatlara uygun hale getirilmiştir. Bu durumda, yeni tasarımın bağlantı yeri, eski kanatlara göre daha geride kalacağı için, bağlantı lamaları ileriye doğru uzatılmıştır. Yeni bağlantının yandan görünümü Şekil 3.28'de gösterilmiştir.





Şekil 3.28. Yeni Bağlantı Lamalarının Yandan Görünümü

Burada kanatlar üzerinde oluşacak dönme momentlerini sönmöleyebilmek amacıyla, bağlantı lamalarının iki yanına, çekme yayları yerleştirilmiştir. Bu yayların montajdaki görünümü Şekil 3.29.'da gösterilmiştir.

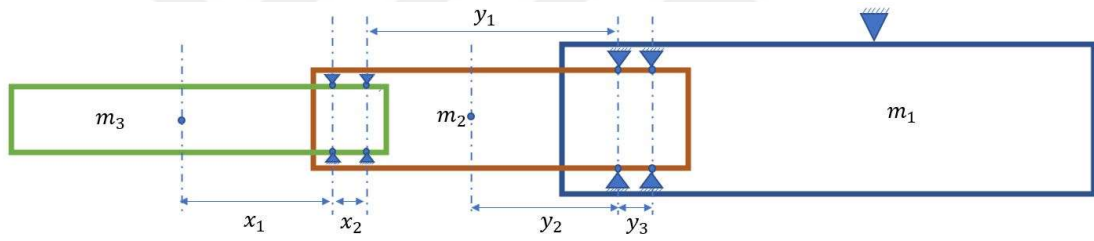


Şekil 3.29. Dengeleme Yaylarının Montaj Üzerinde Görünümü

### 3.2.2. Yükleme Hesaplamaları

İlaçlama makinesi teleskopik kanat sisteminde kanatların ağırlıkları ve tarla koşullarında engebeli arazide ilerleme sonucu ortaya çıkan dikey yöndeki ivmeler iki önemli yükleme olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yüklemeler tasarım itibarıyla hem X-Y düzleminde hem de Y-Z düzleminde etki etmektedir. Kanat parçalarına, tekerleklerle, bağlantı ve yataklama elemanlarına gelen yükleri bulmak için öncelikle bir serbest cisim diyagramı yardımıyla kuvvetlerin yönleri ve büyüklükleri bulunmalıdır.

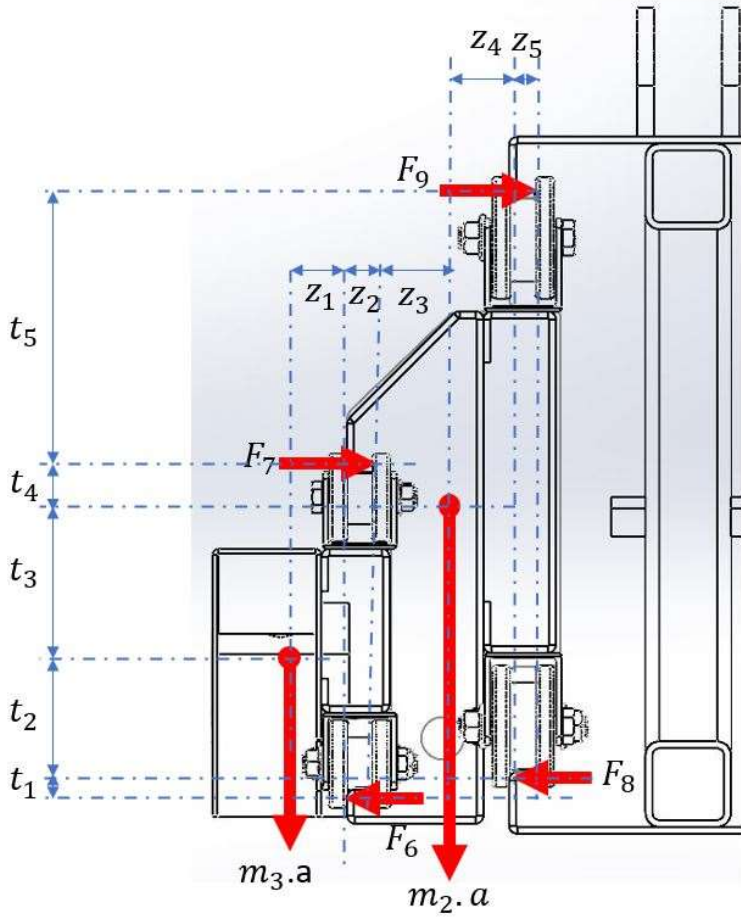
Hesaplamalar yapılırken, kanat sisteminin maksimum zorlanmaya maruz kalacağı durum olan çalışma pozisyonu üzerinde çalışılmıştır. Çalışma konumunda iken kütlelerin X-Y düzleminde mesnet noktalarından, tasarımdaki adıyla tekerleklerden olan mesafeleri Şekil 3.30.'daki şemada gösterilmiştir.



Şekil 3.30. X-Y düzleminde çalışma pozisyonunda kütle merkezlerinin mesnetlere olan mesafeleri

Şekilde mavi çerçeve ana kanadı, kahverengi çerçeve orta kanatları, yeşil çerçeve ise dış kanatları temsil etmektedir. sağ ve sol kanat grupları X-Y düzleminde simetrik olduğu için kuvvet analizlerinde tek yönün hesaplanması diğer taraf için de aynı sonuçları verecektir.

Bunlara ek olarak, dış, orta ve ana kanat parçaları z ekseninde aynı doğru üzerinde olmadıkları için, orta kanatlar ve ana kanat Y-Z düzleminde de zorlanmaya maruz kalmaktadır. Çalışma konumunda iken Y-Z düzleminde mesnet noktalarından, tasarımdaki adıyla tekerleklerden olan mesafeler Şekil 3.31'deki şemada gösterilmiştir.

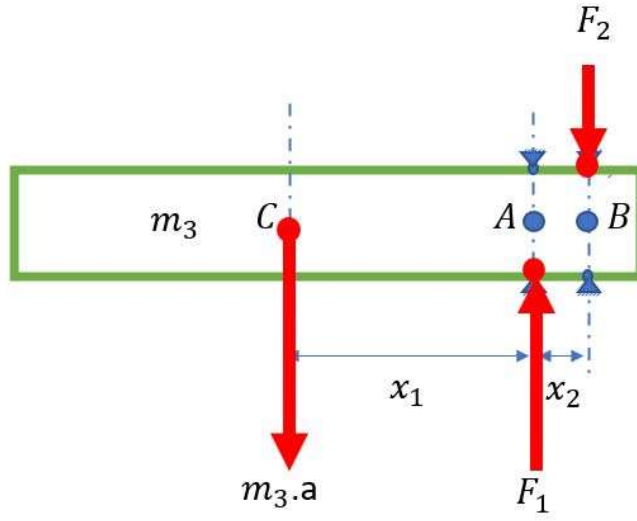


Şekil 3.31. Y-Z düzleminde çalışma pozisyonunda kütle merkezlerinin mesnetler olan mesafeleri ve etkiyen kuvvetler

Şekilde 3.31’de soldan sağa sırasıyla dış kanat, orta kanat ve, ana kanat gösterilmiştir. Sağ ve sol kanat grupları Y-Z düzleminde de simetrik olduğu için kuvvet analizlerinde tek yönün hesaplanması diğer taraf için de aynı sonuçları verecektir.

### 3.2.2.1. Dış Kanat Yükleme Hesaplamaları

Dış kanada ve destek noktalarına X-Y düzleminde etkiyen kuvvetleri bulmak için serbest çizim diyagramı çizilmiştir (Şekil 3.32).



Şekil 3.32. Dış Kanadın X-Y Düzlemindeki Serbest cisim diyagramı

Şekil 3.32’de, C noktası olarak gösterilen nokta, dış kanadın kütle merkezinin x-y düzlemindeki konumunu ifade etmektedir. A ve B noktaları ise, dış kanadın bağlandığı tekerleklerin konumlarını göstermektedir. Burada kanadın ağırlığından kaynaklanan, tekerleklere etki eden kuvvetleri bulmak için, A ve B noktalarına göre moment alınmalıdır.

$F_2$  kuvvetini bulmak için A noktasına göre moment alındığı zaman kurulan denklem şu şekildedir.

$$m_3 \cdot a \cdot x_1 - F_2 \cdot x_2 = 0 \quad (3.1)$$

Burada  $F_2$ ;

$$F_2 = \frac{m_3 \cdot a \cdot x_1}{x_2} \quad (3.2)$$

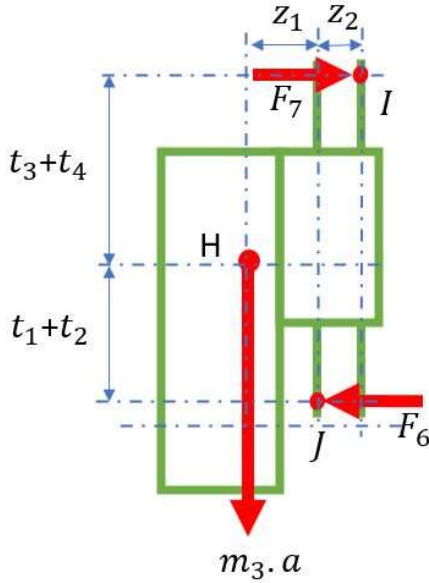
$F_1$  değerini bulmak için de B noktasına göre moment alınmalıdır. B noktasında göre moment alındığı zaman kurulan denklem şu şekildedir.

$$m_3 \cdot a \cdot (x_1 + x_2) - F_1 \cdot x_2 = 0 \quad (3.3)$$

Burada  $F_1$ ;

$$F_1 = \frac{m_3 \cdot a \cdot (x_1 + x_2)}{x_2} \quad (3.4)$$

Dış kanada ve destek noktalarına Y-Z düzleminde etkiyen kuvvetleri bulmak için serbest çizim diyagramı çizilmiştir. (Şekil 3.33.)



Şekil 3.33. Dış Kanadın Y-Z Düzlemindeki Serbest Cisim Diyagramı

Şekil 3.33’de H noktası dış kanadın kütle merkezinin konumunu, J ve I noktaları da tekerleklere gelen tepki kuvvetlerinin konumlarını ifade etmektedir. Bu kuvvetler de, her iki tekerleğin rayla temas eden yan yüzeylerine etki etmektedir. Burada kanadın ağırlığından kaynaklanan, tekerleklere etkiyen tepki kuvvetlerini bulmak için J ve I noktalarına göre moment alınmalıdır.

$F_6$  kuvvetini bulmak için I noktasına göre moment alındığı zaman kurulan denklem şu şekildedir:

$$m_3 \cdot a \cdot (z_1 + z_2) - F_6 \cdot (t_1 + t_2 + t_3 + t_4) = 0 \quad (3.5)$$

Burada  $F_6$ ;

$$F_6 = \frac{m_3 \cdot a \cdot (z_1 + z_2)}{(t_1 + t_2 + t_3 + t_4)} \quad (3.6)$$

Eşitliğinden bulunur.

$F_7$  kuvvetini bulmak için ise J noktasına göre moment alındığı zaman kurulan denklem şu şekildedir:

$$m_3 \cdot a \cdot z_1 - F_7 \cdot (t_1 + t_2 + t_3 + t_4) = 0 \quad (3.7)$$

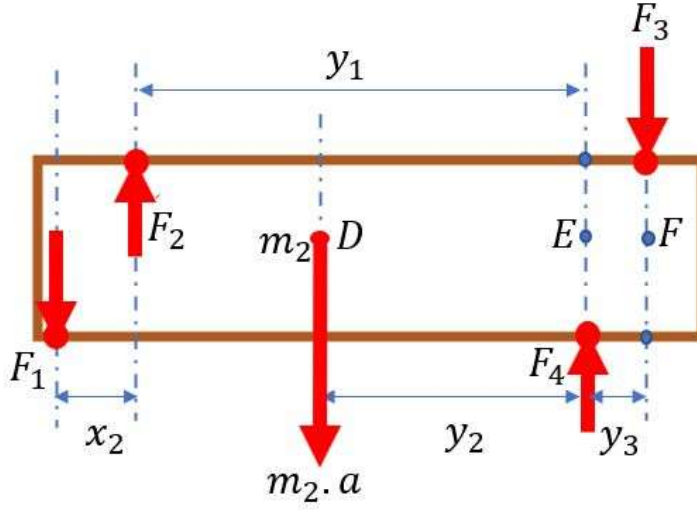
Burada  $F_7$ ;

$$F_7 = \frac{m_3 \cdot a \cdot z_1}{(t_1 + t_2 + t_3 + t_4)} \quad (3.8)$$

eşitliğinden bulunur.

### 3.2.2.2. Orta Kanat Yükleme Hesaplamaları

Orta kanada ve destek noktalarına X-Y düzleminde etkiyen kuvvetleri bulmak için serbest cisim diyagramı çizilmiştir. (Şekil 3.34.)



Şekil 3.34. Orta Kanadın X-Y Düzlemindeki Serbest Cisim Diyagramı

Şekil 3.34.'te D noktası ile gösterilen nokta orta kanadın X-Y düzlemindeki kütle merkezinin konumunu ifade etmektedir. E ve F noktaları ise orta kanadın bağlandığı tekerleklerin konumlarını ifade etmektedir.  $F_1$  ve  $F_2$  kuvvetleri etki-tepki yasaının sonucu olarak orta kanada ters yönlü etki etmektedir. Burada orta kanadın ağırlığının ve  $F_1$  ve  $F_2$  kuvvetlerine indirgenmiş olarak gösterilen dış kanat ağırlığının sebep olduğu, tekerleklere etki eden kuvvetleri bulmak için, E ve F noktalarına göre moment alınmalıdır.

$F_3$  kuvvetini bulmak için E noktasına göre moment dengesi kurulmalıdır. Bu moment denklemi aşağıdaki gibidir;

$$F_2 \cdot y_1 + F_3 \cdot y_3 - m_2 \cdot a \cdot y_2 - F_1 \cdot (x_2 + y_1) = 0 \quad (3.9)$$

Burada  $F_3$ ;

$$F_3 = \frac{F_1 \cdot (x_2 + y_1) + m_2 \cdot a \cdot y_2 - F_2 \cdot y_1}{y_3} \quad (3.10)$$

denklemden bulunur.

$F_4$  kuvvetini bulmak için F noktasına göre moment dengesi kurulmalıdır. Bu moment denklemi aşağıdaki gibidir;

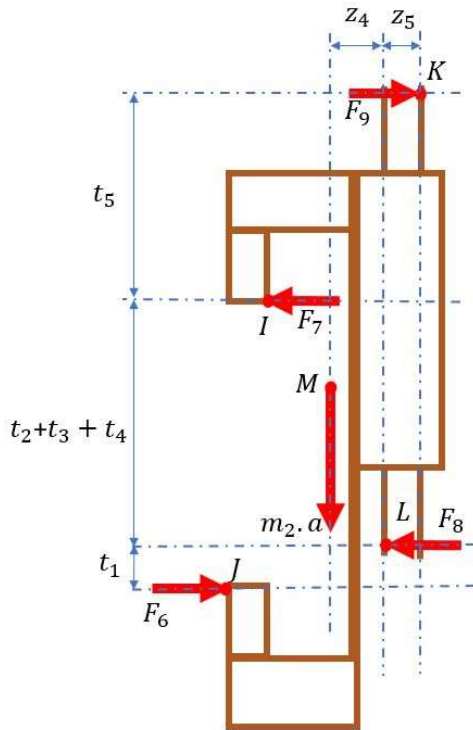
$$F_2 \cdot (y_1 + y_3) + F_4 \cdot y_3 - m_2 \cdot a \cdot (y_2 + y_3) - F_1 \cdot (x_2 + y_1 + y_3) = 0 \quad (3.11)$$

Burada  $F_4$ ;

$$F_4 = \frac{F_1 \cdot (x_2 + y_1 + y_3) + m_2 \cdot a \cdot (y_2 + y_3) - F_2 \cdot (y_1 + y_3)}{y_3} \quad (3.12)$$

denkleminde bulunur.

Orta kanada ve destek noktalarına Y-Z düzleminde etkiyen kuvvetleri bulmak için serbest cisim diyagramı çizilmiştir. (Şekil 3.35.)



Şekil 3.35. Orta Kanadın Y-Z Düzlemindeki Serbest Cisim Diyagramı

Şekil 3.35'te M noktası orta kanadın kütle merkezinin konumunu, K ve L noktaları da tekerleklere gelen tepki kuvvetlerinin konumlarını ifade etmektedir. Bu kuvvetler de, her iki



tekerleğin rayla temas eden yan yüzeylerine etki etmektedir. Burada kanadın ağırlığından ve dış kanat ile temas noktaları olan I ve J noktalarına etkiyen kuvvetlerden kaynaklanan, tekerleklere etkiyen tepki kuvvetlerini bulmak için K ve L noktalarına göre moment alınmalıdır.

$F_8$  kuvvetini bulmak için K noktasına göre moment alındığı zaman kurulan denklem şu şekildedir:

$$F_8 \cdot (t_2 + t_3 + t_4 + t_5) + F_7 \cdot t_5 - m_2 \cdot a \cdot (z_4 + z_5) - F_6 \cdot (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5) = 0 \quad (3.13)$$

Burada  $F_8$ ;

$$F_8 = \frac{m_2 \cdot a \cdot (z_4 + z_5) + F_6 \cdot (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5) - F_7 \cdot t_5}{(t_2 + t_3 + t_4 + t_5)} \quad (3.14)$$

eşitliğinden bulunur.

$F_9$  kuvvetini bulmak için ise L noktasına göre moment alındığı zaman kurulan denklem şu şekildedir:

$$F_9 \cdot (t_2 + t_3 + t_4 + t_5) - F_6 \cdot t_1 - m_2 \cdot a \cdot z_4 - F_7 \cdot (t_2 + t_3 + t_4) = 0 \quad (3.15)$$

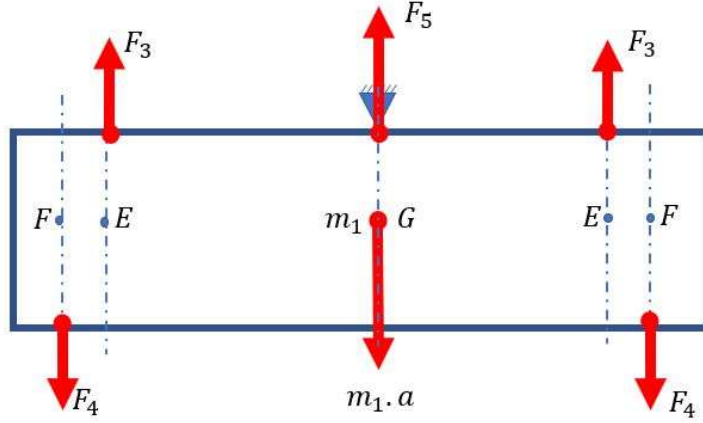
Burada  $F_9$ ;

$$F_9 = \frac{m_2 \cdot a \cdot z_4 + F_7 \cdot (t_2 + t_3 + t_4) + F_6 \cdot t_1}{(t_2 + t_3 + t_4 + t_5)} \quad (3.16)$$

eşitliğinden bulunur.

### 3.2.2.3. Ana Kanat Yükleme Hesaplamaları

Ana kanada ve destek noktalarına etkiyen kuvvetleri bulmak için serbest cisim diyagramı çizilmiştir. (Şekil 3.36.)



Şekil 3.36. Ana Kanadın X-Y Düzlemindeki Serbest Cisim Diyagramı

Şekil 3.36’da G noktası ile gösterilen nokta orta kanadın X-Y düzlemindeki kütle merkezinin konumunu ifade etmektedir. E ve F noktaları ise orta kanadın bağlandığı tekerleklerin konumlarını ifade etmektedir.  $F_3$  ve  $F_4$  kuvvetleri etki-tepki yasasının sonucu olarak ana kanada ters yönlü etki etmektedir. Ana kanat, hem sağ hem sol taraftaki dış-orta kanat gruplarını taşıdığı için, çalışma pozisyonunda tam simetri olacaktır. İki taraftan gelen momentler birbirini dengeleyeceği için bu diyagramda kurulacak moment denklemlerinin sonuçları sıfır olacaktır. O yüzden, ana kanadın ilaçlama makinesinin asansör şasisine bağlantı yeri olan G noktasına etkiyen  $F_5$  kuvvetini bulmak için kuvvet denge denklemi yeterli olacaktır. Ana kanada etkiyen kuvvetlerin denge denklemi aşağıdaki gibidir.

$$F_3 + F_3 + F_5 - F_4 - F_4 - m_1 \cdot a = 0 \quad (3.17)$$

Burada  $F_5$ ;

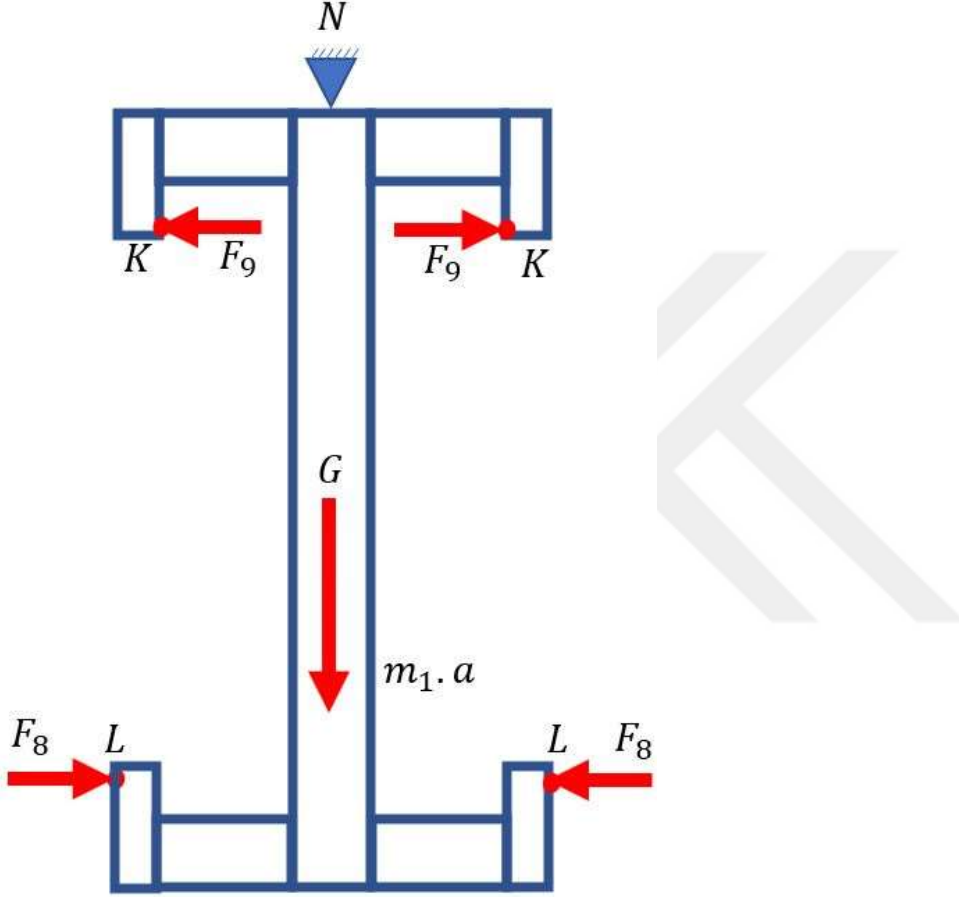
$$F_5 = F_4 + F_4 + m_1 \cdot a - F_3 - F_3 \quad (3.18)$$

$F_5$  kuvveti tüm kanat sistemini taşıyan bağlantı parçasına gelen kuvvet olduğu için bu denklem yerine tüm kanatların ağırlıklarını toplayarak da bulunabilir. Yani;

$$F_5 = m_1 \cdot a + 2 \cdot m_2 \cdot a + 2 \cdot m_3 \cdot a \quad (3.19)$$

olarak da ifade edilebilir.

Ana kanada ve destek noktalarına Y-Z düzleminde etkiyen kuvvetleri bulmak için serbest cisim diyagramı çizilmiştir. (Şekil 3.37)



Şekil 3.37. Ana Kanadın Y-Z Düzlemindeki Serbest Cisim Diyagramı

Şekil 3.37’de G noktası ile gösterilen nokta orta kanadın Y-Z düzlemindeki kütle merkezinin konumunu ifade etmektedir. K ve L noktaları ise orta kanadın bağlandığı tekerleklerin konumlarını ifade etmektedir.  $F_8$  ve  $F_9$  kuvvetleri etki-tepki yasasının sonucu olarak ana kanada ters yönlü etki etmektedir. Ana kanat, hem sağ hem sol taraftaki dış-orta kanat gruplarını taşıdığı için, çalışma pozisyonunda tam simetri olacaktır. İki taraftan gelen momentler birbirini dengeleyeceği için bu diyagramda kurulacak moment denklemlerinin sonuçları sıfır olacaktır. O yüzden N noktasında, yani kanat gruplarının bağlandığı mesnette, statik koşullarda Y-Z düzleminde bir kuvvet etki etmeyecektir. Ancak analizlerde  $F_8$  ve  $F_9$  kuvvetleri dikkate alınacaktır.

### 3.2.3. Cıvata Hesaplamaları

Cıvata ile birbirine bağlanan parçalarda kuvvet akışı cıvata ve somunların dişleri üzerinden geçmektedir (Akkurt,1990). Teleskopik bum tasarımında, bağlama elemanı olarak cıvata kullanılan yerlerde, civatalar kesme zorlanmasına maruz kalmaktadır. Bu kesme zorlanmaları [20] numaralı formül ile hesaplanmaktadır.

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot d^2} \quad (3.20)$$

Bu denklemde

$\tau$ : Kesme Gerilmesi ( $N/mm^2$ )

F: Cıvataya etkiyen radyal kuvvet (N)

d: Cıvatanın anma yarıçapı (mm)

olarak ifade edilmektedir (Akyurt,1990).

### 3.2.4. Rulman Ömür Hesaplamaları

Yataklama elemanı olarak kullanılan rulmanların dinamik yüklemeler altında belirli bir ömrü mevcuttur. Bu ömür, dönme sayısına, gelen yüklemelere ve rulmanın dinamik yük sayısına bağlıdır (Akkurt,1990). Rulmanların ömrü [21] numaralı formül ile hesaplanmaktadır.

$$L = \left(\frac{C}{F}\right)^p \quad (3.21)$$

Bu denklemde

L: Rulman Ömrü ( $10^6$  devir)

C: Dinamik Yük Sayısı (N)

F: Rulmana Etkiyen Yük (N)

p: üs sabiti

olarak ifade edilmektedir.

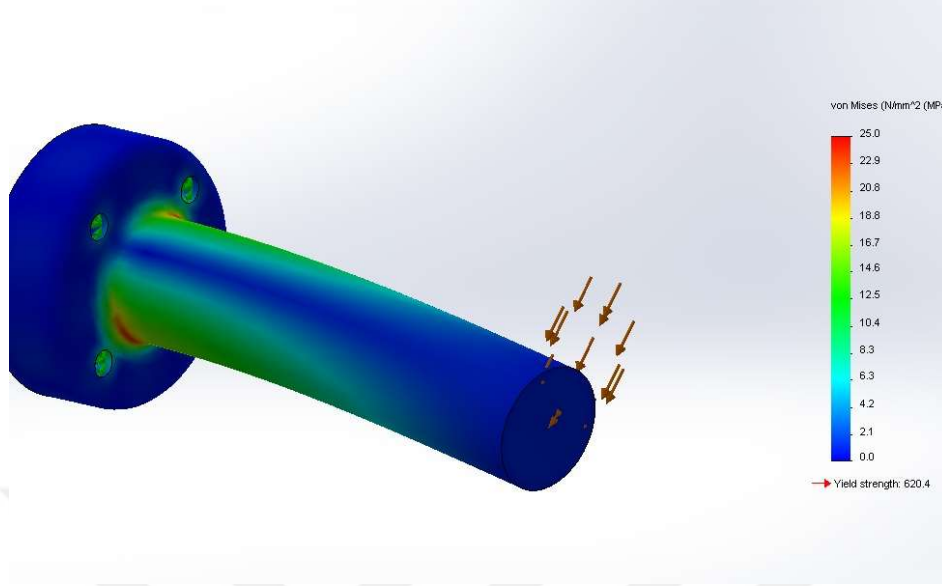
Burada C değeri, bir rulmanlı yatağın bir milyon devirde ömrünü tamamladığı yük olarak ifade edilebilir (Akkurt,1990). Rulman üreticisi tarafından ürün kataloglarında ilgili rulman için bulunabilir. F kuvveti ise, rulmana etkiyen radyal ve yatay kuvvetlerin bileşkesini ifade etmektedir. Bu kuvvet, serbest cisim diyagramlarına elde edilen kuvvetlerden hesaplanmıştır. p sabiti ise, bilyalı rulmanlarda 3, makaralı rulmanlarda 10/3 olarak alınmaktadır.

Teleskopik bum tasarımında kullanılacak rulmanların ömürleri devir sayısı olarak bulunmuştur. Bir rulmanın, bumun tek sefer açılıp kapanması sırasında döndüğü devir hesaplanmış, teleskopik bum mekanizması kaç sefer açılıp kapandığında nominal ömrüne ulaşacağı bulunmuştur.

### **3.2.5. Sonlu Elemanlar Analizi**

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık tasarımlarda statik gerilmeler, ısı transferi, akışkan problemleri, elektrik akımı vb. hesaplarında kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu yöntemde, normalde bilinmeyen sayısı çok olan birden fazla boyutlu kısmi diferansiyel denklemler ve benzeri hesaplamalarda, tasarımı oluşturan elemanları belirli bir sayıda elemana bölerek, problemleri o elemanlara bölerek çözümü kolaylaştırır. Bu bölünen elemanların her birine de sonlu eleman (finite element) adı verilmektedir. Problem bu sonlu elemanlara bölünerek çözümlendiğinde, çok kompleks problemlerin yaklaşık sonuçları bulunabilmektedir.

Son yıllarda, sonlu elemanlar analizi oldukça fazla kullanılmaya başlanmıştır (Roylance,2001). Otomotiv, havacılık, savunma sanayii gibi sektörlerde, yapılan tasarımlar sonlu elemanlar analizi yazılımlarında modellenerek, tasarımların gerilme, yer değiştirme, ısı yükler, akışkan analizleri bu yazılımlarla yapılarak modeller iyileştirilir. Şekil 3.38'de bir sonlu elemanlar yazılımında gerilme analizinin sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 3.38. Bir parçanın Solidworks Simulasyon Modülünde Gerilme Analizi (Anonim,2021r)

Sonlu elemanlar yazılımlarında, zorlanmalar genellikle renklerle ifade edilmektedir. Zorlanma değeri akma mukavemetine yaklaştıkça renk değişmektedir. Bu şekilde en büyük gerilmelerin parçanın hangi kısmında olduğu görülebilmektedir.

İlaçlama makinesinin kanat tasarımında, sonlu elemanlar analizleri yardımıyla, tasarımın statik ve dinamik koşullar altında maruz kaldığı kuvvetler karşısında oluşan gerilmeler ve yer değiştirmeler hesaplanıp, tehlikeli kesitler tespit edilip, tasarımda iyileştirme yapılmıştır. Analizler, Solidworks yazılımının Simulasyon modülünde Statik Yapısal Analizi ile yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi için Solidworks programının tercih edilme sebebi, halihazırda tasarımın aynı programla yapılmış olması ve bu sebeple, parçalar üzerinde harici bir değişiklik yapmadan Bu analizlerde, Von-Misses birleşik gerilmeleri ve gerilme yer değiştirmeleri hesaplanmıştır.

Analizlerde, her bir kanat, ayrı olarak ele alınmıştır. Öncelikle her kanat için, üretileceği malzemelerin akma mukavemetleri, özkütleleri, Young ve Bulk modülleri, poisson oranları programa girilmiştir. Solidworks programının malzeme kütüphanesinde S235 ve S355 malzemeleri halihazırda bulunduğu için, ilgili kanat parçalarında bu malzemeler seçilip, fiziksel özellikler otomatik olarak yüklenmiştir. Daha sonra kanatların hareket tekerleklerinin bağlandığı kısımlar sabit mesnet olarak kabul edilmiş, serbest cisim diyagramları ile hesaplanan kuvvetler, temas noktalarına uygulanmıştır. Bu veriler girildikten sonra analizi yapılan kanat

parçaları “mesh” komutuyla, sonlu elemanlara ayrılmıştır. Son olarak da analiz yürütüldüğünde, Von-Misses birleşik zorlanma değerleri ile gerilme tesiri altındaki yer değiştirme değerleri hesaplanarak, bu değerlerin değişimleri grafiklerle ve renk skalalarıyla ifade edilmiştir.



## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Kuvvet Hesaplamaları

#### 4.1.1. Ölçüler

Kuvvetleri hesaplayabilmek için öncelikle tasarımda kanat parçalarının ağırlık merkezlerinin konumları, kuvvet etki noktaları, kanat kütleleri ve kanat sistemine etkileyen maksimum ivme değeri bulunmalıdır.

Ağırlık merkezlerinin konumları Solidworks programında “Kütle Özellikleri” komutundan bulunmuştur. Bulunan bu konumlara göre, Şekil 3.30’da harfle gösterilen X-Y düzlemindeki ölçüler aşağıdaki gibidir.

- $x_1 = 895,46 \text{ mm}$
- $x_2 = 130 \text{ mm}$
- $y_1 = 2072,5 \text{ mm}$
- $y_2 = 973,5 \text{ mm}$
- $y_3 = 165 \text{ mm}$

Benzer şekilde, Şekil 3.31’de harfle gösterilen Y-Z düzlemindeki ölçüler aşağıdaki gibidir.

- $z_1 = 27,62 \text{ mm}$
- $z_2 = 15 \text{ mm}$
- $z_3 = 57,76 \text{ mm}$
- $z_4 = 22,74 \text{ mm}$
- $z_5 = 15 \text{ mm}$
- $t_1 = 12 \text{ mm}$
- $t_2 = 56,89 \text{ mm}$
- $t_3 = 81,55 \text{ mm}$
- $t_4 = 36,06 \text{ mm}$
- $t_5 = 162 \text{ mm}$

$m_3$  olarak ifade edilen dış kanat kütlelerinin hesaplanmasında yine Solidworks programında “kütle özellikleri” komutundan faydalanılmıştır. Dış kanat kütlesi, dış kanadı



oluşturan sac levhalar, 4 adet hareket tekerleği, dış kanadı hareket ettiren elektrik motoru, plastik ilaç hortumu, 5 adet tekli püskürtme memesi, burulma yayı ve civatası ve bağlama elemanlarının toplamı olarak alınmıştır. Bu ağırlıkların toplamı yaklaşık 20 kg olarak hesaplanmıştır.

$m_2$  olarak ifade edilen orta kanat kütesinin hesaplanmasında yine Solidworks programında “kütle özellikleri” komutundan faydalanılmıştır. Orta kanat kütesi, orta kanadı oluşturan sac levhalar, 4 adet hareket tekerleği, orta kanadı hareket ettiren elektrik motoru, dış kanadın üzerinde hareket ettiği kremayer dişli, plastik ilaç hortumu, 5 adet tekli püskürtme memesi ve bağlama elemanlarının toplamı olarak alınmıştır. Bu ağırlıkların toplamı yaklaşık 58 kg olarak hesaplanmıştır.

$m_1$  olarak ifade edilen ana kanat kütesinin hesaplanmasında yine Solidworks programında “kütle özellikleri” komutundan faydalanılmıştır. Ana kanat kütesi, ana kanadı oluşturan sac levhalar ve profiller, plastik ilaç hortumu, orta kanatların üzerinde hareket ettiği 2 adet kremayer dişli, 4 adet tekli püskürtme memesi ve ilaçlama makinesi şasisine bağlantı parçalarının toplamı olarak alınmıştır. Bu ağırlıkların toplamı yaklaşık 95 kg olarak hesaplanmıştır.

Bu kuvvetlerin ağırlık kuvveti olarak hesaplanması için 22 numaralı eşitlik kullanılmaktadır.

$$F=m.a \quad (3.22)$$

Burada;

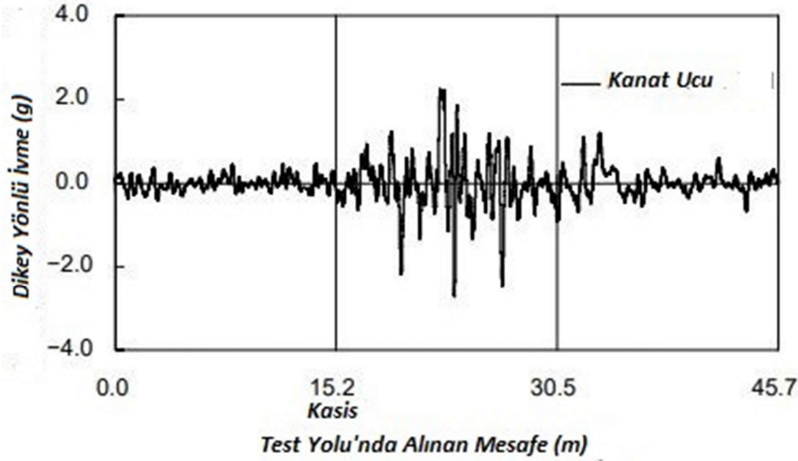
F: yerçekimi kuvveti (N),

m: kanat kütesi (kg)

a:ivme ( $m/s^2$ ) olarak ifade edilmektedir.

Statik koşullarda kanat ağırlıklarını hesaplamak için ivme olarak yerçekimi ivmesini kullanmak yeterli olmaktadır. Ancak, engebeli arazilerde, traktörün ilerlemesi sonucu, ilaçlama makinesinin kanatları düşey yönde hareket etmektedir (Kennes vd.) Bu anlık hareketlerin sonucu olarak yerçekimi ivmesine ek olarak düşey yönlü ivmelenmeler oluşmaktadır. Gerilme

analizlerinde olabilecek maksimum gerilmelere göre analiz yapılması amaçlandığı için, bu ivmeler de hesaba katılmıştır. Jeon, Womac ve Gunn (2004), 24 metre bum genişliğine sahip ilaçlama makinesi ile yaptıkları çalışmada, kanat uçlarına ivme ölçer monte edip, engebeli bir arazide traktör ilerlemesi sonucu oluşan ivmelenmeleri incelemişlerdir. Araştırma sonucunda, kanadın ucunda maksimum 2g değerine sahip (yerçekimi ivmesinin iki katı) değer bulmuşlardır. Şekil 4.1’de ivme ölçerin grafik sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.1. 24 m bum genişliğine sahip ilaçlama makinesinin tümsekten geçmesi sonrası bumun en uç noktasındaki ivme grafiği (Jeon vd.2004).

24 metrelik bir bumun ucunda okunan ivme değeri, aynı bumun merkezinde en fazla 0.5 g olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar gösteriyor ki, traktörün ilerlemesi sırasında bir tümsekten geçmesi sonucu oluşacak ivmelenme kanat ucundan merkezine doğru azalacaktır. Gerçekçi bir gerilme hesabı için, 12 metre bum genişliğine sahip olacak tasarımda, dış kanatlara etkiyen ivme değeri 1g, orta kanatlara etkiyen ivme değeri 0.75 g, ana kanada etkiyen ivme değeri ise 0.5 g olarak alınabilir. Sonuç olarak, dış kanat için kuvvet hesaplamalarında kullanılacak ivme değeri  $19.62 \text{ m/s}^2$ , orta kanada etkiyen ivme değeri 17.17, ana kanada etkiyen ivme değeri 14.72 olarak hesaplanmaktadır. Burada, düşey hareketler sonucu oluşacak ivmeler ile beraber yerçekimi ivmesi de etki etmektedir.

Kanatlara etkiyen kuvvet hesaplarında ivme değerleri, maksimum zorlanma koşullarına göre analiz yapılacağı için yukarıda hesaplanan değerler olarak alınmıştır.

#### 4.1.2. Dış Kanada Etkiyen Kuvvetler

Dış kanada X-Y düzleminde etkiyen  $F_1$  ve  $F_2$  değerlerini bulmak için 3.2. ve 3.4. numaralı eşitliklerden yararlanılmıştır. 3.4. numaralı denklem için değerleri yerine koyduğumuzda eşitlik aşağıdaki gibi olmaktadır;

$$F_1 = \frac{20.9,81. (895,46 + 130)}{130}$$

Bu denklemde;

$$F_1 = 1547,66 \text{ N olarak bulunur.}$$

3.2. numaralı denklem için değerleri yerine koyduğumuzda eşitlik aşağıdaki gibi olmaktadır;

$$F_2 = \frac{20.9,81.895,46}{130}$$

Bu denklemde;

$$F_2 = 1351,46 \text{ N olarak bulunur.}$$

Bu bulgulara göre, tekerleklere etkiyen  $F_2$  kuvveti yukarı yönlü,  $F_1$  kuvveti ise aşağı yönlüdür. İstisnai durumlar haricinde yüklemeler sadece üst sağ ( $F_1$ ) ve alt sol ( $F_2$ ) tekerleklere gelmektedir. İstisnai durum olarak kanadın traktörün ilerlemesi sırasında engebeli arazinin sebep olduğu +y eksenini yönünde ivme olarak düşünebilir. Ancak burada maksimum zorlanmalar incelendiği için diğer tekerleklere etkiyen dikey yönlü dinamik kuvvetler hesaplanmamıştır.

Dış kanada Y-Z düzleminde etkiyen  $F_6$  ve  $F_7$  değerlerini bulmak için 3.6. ve 3.8. numaralı formüllerden yararlanılmıştır. 3.6. numaralı denklem için değerleri yerine koyduğumuzda eşitlik aşağıdaki gibi olmaktadır;

$$F_6 = \frac{20.9,81. (27,62 + 15)}{(12 + 56,89 + 81,55 + 36,06)}$$

Bu denklemde;

$$F_6 = 44,83 \text{ N olarak bulunur.}$$

8 numaralı denklem için değerleri yerine koyduğumuzda eşitlik aşığıdaki gibi olmaktadır;

$$F_7 = \frac{20.9,81.27,62}{(12 + 56,89 + 81,55 + 36,06)}$$

Bu denklemde;

$$F_7 = 29,05 \text{ N olarak bulunur.}$$

Bu bulgulara göre, dış kanatta üst tekerleklere etkiyen  $F_6$  kuvveti sağ yönlü, alt tekerleklere etkiyen  $F_7$  kuvveti sol yönlüdür. Üst ve alt tekerlek çiftleri bu kuvvetleri eşit oranda paylaşacaktır. Yani üst tekerleklerin her birine 22,415 N, alt tekerleklerin her birinde 14,525 N etki edecektir.

#### 4.1.3. Orta Kanada Etkiyen Kuvvetler

Orta kanada X-Y düzleminde etkiyen  $F_3$  ve  $F_4$  değerlerini bulmak için 3.10. ve 3.12. numaralı eşitliklerden yararlanılmıştır. 3.10. numaralı denklem için değerleri yerine koyduğumuzda eşitlik aşığıdaki gibi olmaktadır;

$$F_3 = \frac{1547,66. (130 + 2072,5) + 58.9,81.973,5 - 1351,46.2072,5}{165}$$

Bu denklemde;

$$F_3 = 7040,74 \text{ N olarak bulunur.}$$

3.12. numaralı denklem için değerleri yerine koyduğumuzda eşitlik aşığıdaki gibi olmaktadır.

$$F_4 = \frac{1547,66. (130 + 2072,5 + 165) + 58.9,81. (973,5 + 165) - 1351,46. (2072,5 + 165)}{165}$$

Bu denklemde;

$$F_4 = 7805,92 \text{ N olarak bulunur.}$$

Bu bulgulara göre, tekerleklere etkiyen  $F_4$  kuvveti yukarı yönlü,  $F_3$  kuvveti ise aşağı yönlüdür. İstisnai durumlar haricinde yüklemeler sadece üst sağ ( $F_3$ ) ve alt sol ( $F_4$ ) tekerleklere gelmektedir. İstisnai durum olarak kanadın traktörün ilerlemesi sırasında engebeli arazinin sebep olduğu +y eksenini yönünde ivme olarak düşünebilir. Ancak burada maksimum zorlanmalar incelendiği için diğer tekerleklere etkiyen dinamik kuvvetler hesaplanmamıştır.

Orta kanada Y-Z düzleminde etkiyen  $F_8$  ve  $F_9$  değerlerini bulmak için 3.14. ve 3.16. numaralı eşitliklerden yararlanılmıştır. 3.14. numaralı denklem için değerleri yerine koyduğumuzda eşitlik aşağıdaki gibi olmaktadır;

$$F_8 = \frac{58.9,81. (22,74 + 15) + 44,83. (12 + 56,89 + 81,55 + 36,06 + 162) - 29,05.162}{(56,89 + 81,55 + 36,06 + 162)}$$

Bu denklemde;

$$F_8 = 96,25 \text{ N olarak bulunur.}$$

3.16. numaralı denklem için değerleri yerine koyduğumuzda eşitlik aşağıdaki gibi olmaktadır;

$$F_9 = \frac{58.9,81.22,74 + 29,05. (56,89 + 81,55 + 36,06) + 44,83.12}{(56,89 + 81,55 + 36,06 + 162)}$$

Bu denklemde;

$$F_9 = 55,11 \text{ N olarak bulunur.}$$

Bu bulgulara göre, orta kanatta üst tekerleklere etkiyen  $F_9$  kuvveti sağ yönlü, alt tekerleklere etkiyen  $F_8$  kuvveti sol yönlüdür. Üst ve alt tekerlek çiftleri bu kuvvetleri eşit oranda paylaşacaktır. Yani üst tekerleklerin her birine 27,55 N, alt tekerleklerin her birinde 48,125 N etki edecektir.

#### 4.1.4. Ana Kanada Etkiyen Kuvvetler

Ana kanada X-Y düzleminde etkiyen  $F_5$  kuvvetini bulmak için 3.18. numaralı eşitlikten faydalanılmıştır. 3.18. numaralı denklem için değerleri yerine koyduğumuzda eşitlik aşağıdaki gibi olmaktadır;

$$F_5 = 7805,92 + 7805,92 + 95.9,81 - 7040,74 - 7040,74$$

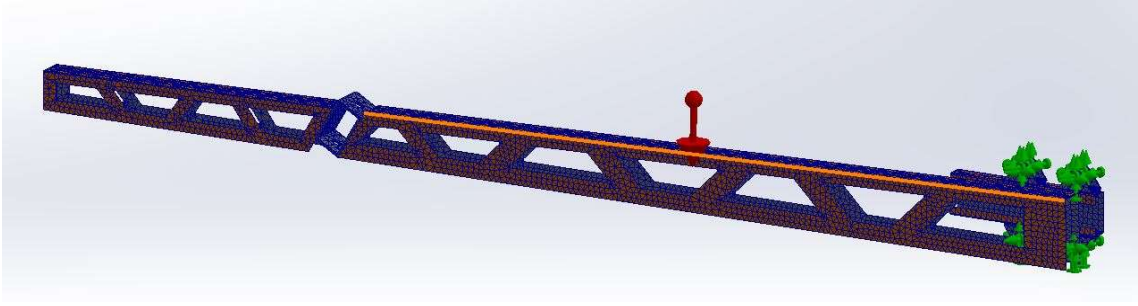
Bu denklemde ;

$F_5 = 2462,31$  N olarak bulunur.

## 4.2. Sonlu Elemanlar Analizleri Sonuçları

### 4.2.1. Dış Kanat Analiz Sonuçları

Dış kanat analizinde, kanat, tekerleklerin göbek kısımlarından sabitlenmiş, dış yük olarak kanat ağırlığı etki ettirilmiştir. Mesh oluşturma işlemi yapılmıştır. Mesh oluşturma sonucunda dış kanatta 12912 adet sonlu eleman, 28404 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Mesh'lerin görünümü Şekil 4.2..'de gösterilmiştir.

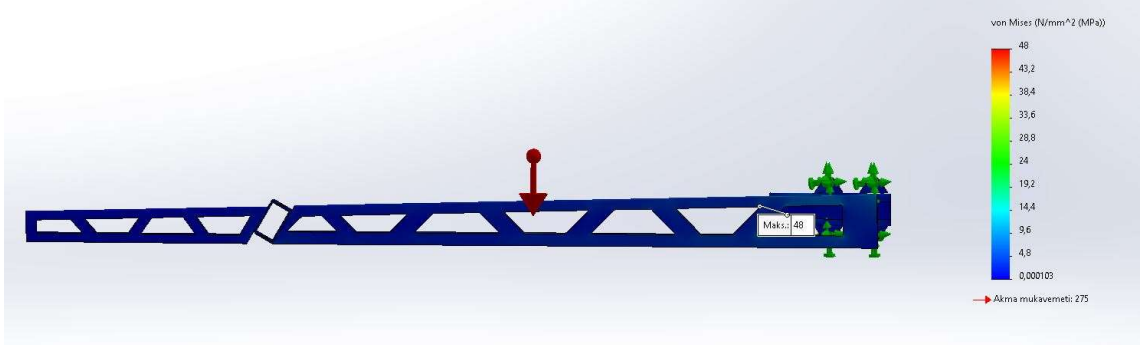


Şekil 4.2. Dış Kanatta Oluşturulan Meshler

Şekilde, yeşil oklarla gösterilen yerler, analizde sabit mesnet olarak belirtilen yerlerdir. Kırmızı ok ise, kanadın ağırlık merkezinin dış kuvvet olarak etkideği yerdir. Bu kuvvet 196,2 N olarak alınmıştır.

#### 4.2.1.1. Dış Kanat Von-Mises Gerilme Analizi

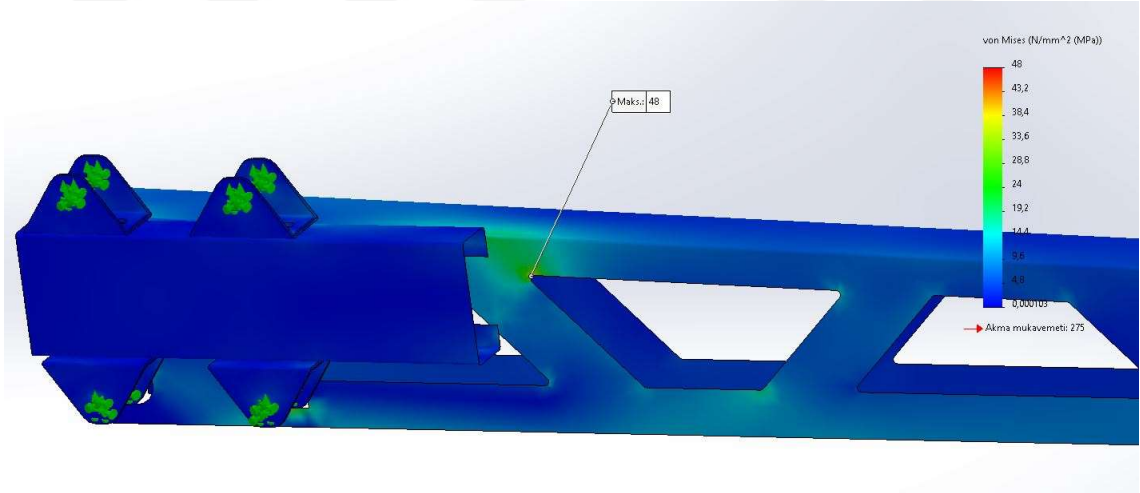
Mesnet noktaları, kuvvetler ve Mesh oluşturulduktan sonra Simülasyon yürütüldüğünde, Von-Mises gerilmeleri Şekil 4.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Dış Kanat Von-Mises Gerilmeleri

Renk diyagramında, renk kodlarının denk geldiği yaklaşık gerilmeler gösterilmiştir. Kanatın genelinde oldukça düşük gerilmeler görülürken, maksimum gerilmenin olduğu yerde 48 MPa gerilme ölçülmüştür. Bu değer St-52 Çelik malzemelerin akma mukavemeti olan 381 MPa (Seitl vd.)’dan 7,9 kat daha düşük gerilme elde edilmiştir. Diğer bir deyişle, dış kanadın güvenlik katsayısı değeri 7,9 olarak hesaplanmıştır.

Dış kanat tasarımında maksimum gerilmenin olduğu bölge Şekil 4.4.’te gösterilmiştir.

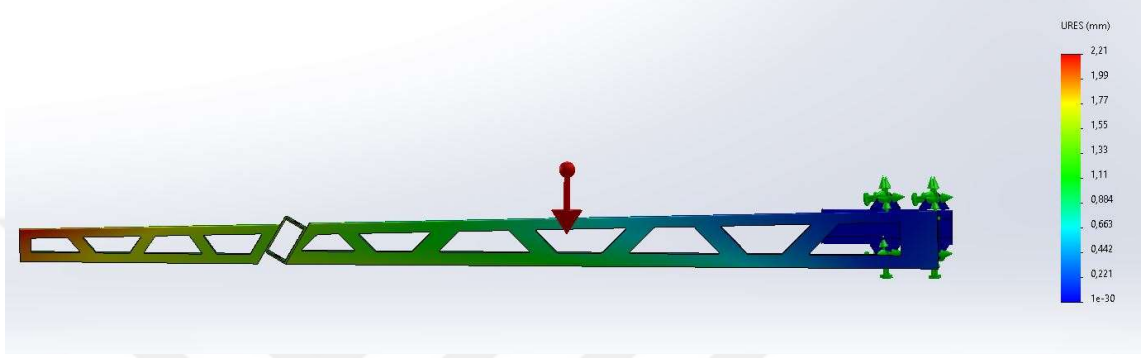


Şekil 4.4. Dış Kanadın Maksimum Gerilmeye Maruz Kalan Bölgesi

Bu bölgedeki gerilme yığılmasının sebebi olarak, sac parçadan çıkarılan kesitin köşe noktasına denk gelmesi olarak düşünülebilir. Bu gerilmeyi azaltabilmek için, diğer bir deyişle emniyet katsayısını arttırmak için kesme yarıçapı büyütülebilir veya farklı bir açıyla kesilebilir.

#### 4.2.1.2. Dış Kanat Yer Değiştirme Analizi

Dış kanada etkiyen eğilme zorlanmasının sonucu olarak, sac levhalarda eğilmeler meydana gelmiştir. Bu eğilmeler analizlerde yer değiştirme grafikleri ile gösterilmiştir. (Şekil 4.5.)



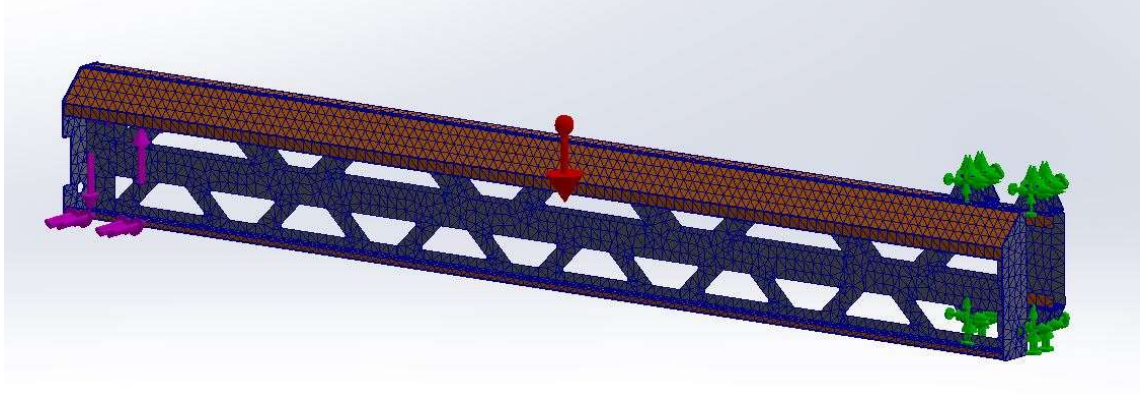
Şekil 4.5. Dış Kanat Yer Değiştirme Grafiği

Dikey yönde gerçekleşen bu yer değiştirmeler, mesnet noktalarından kanat ucuna doğru gidildikçe artmaktadır. Maksimum yer değiştirme değeri, 2.21 mm olarak görülmektedir. Bu değer, ilaçlama uygulamasında ilaçlama memesinin ucu ile bitkinin tepe yaprakları arası mesafenin 500 mm olduğu düşünüldüğünde, ilaçlama homojenliği açısından bir tehlike oluşturmayacak kadar küçük bir değerdir.

#### 4.2.2. Orta Kanat Analiz Sonuçları

Orta kanat analizinde, kanat, tekerleklerin göbek kısımlarından sabitlenmiş, dış yük olarak kanat ağırlığı ve dış kanadın hareket tekerleklerinden etkiyen kuvvetler orta kanattaki temas noktalarına etki ettirilmiştir. Mesh oluşturma işlemi yapılmıştır. Mesh oluşturma sonucunda dış kanatta 13119 adet sonlu eleman, 29028 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Mesh'lerin, mesnet noktalarının ve harici yüklerin görünümü Şekil 4.6.'da gösterilmiştir.



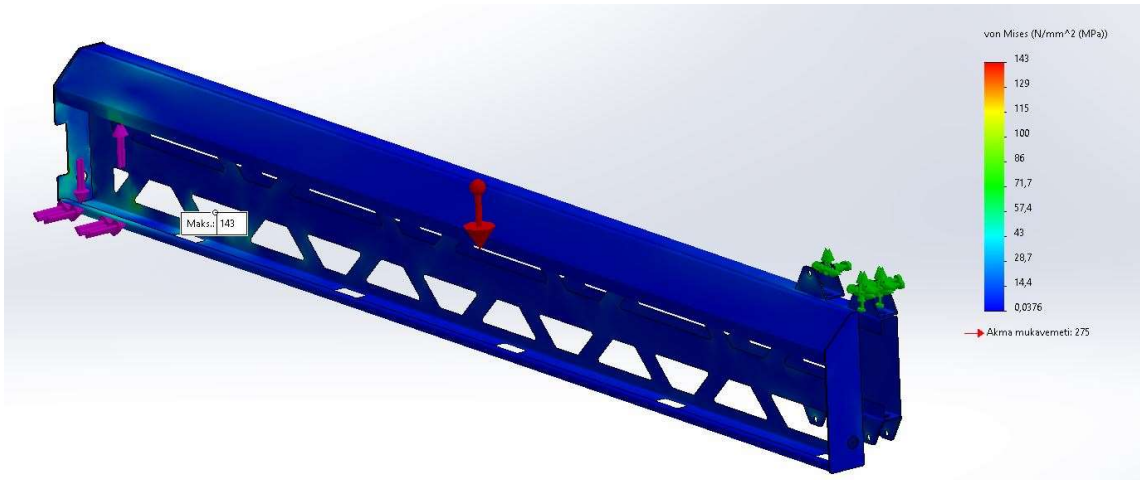


Şekil 4.6. Orta Kanatta Oluşturulan Meshler, Mesnet Noktaları ve Harici Yükler

Şekil 4.6.'da, yeşil renkli oklarla gösterilen kısımlar, simülasyona sabit mesnet olarak tanımlanmıştır. Kırmızı ok, 568,98 N olan kanat ağırlığını, pembe oklar ise, yükleme hesaplarındaki denklemlerle elde edilen dış kanattan gelen  $F_1, F_2, F_6, F_7$  kuvvetlerini göstermektedir.

#### 4.2.2.1. Orta Kanat Von-Mises Gerilme Analizi

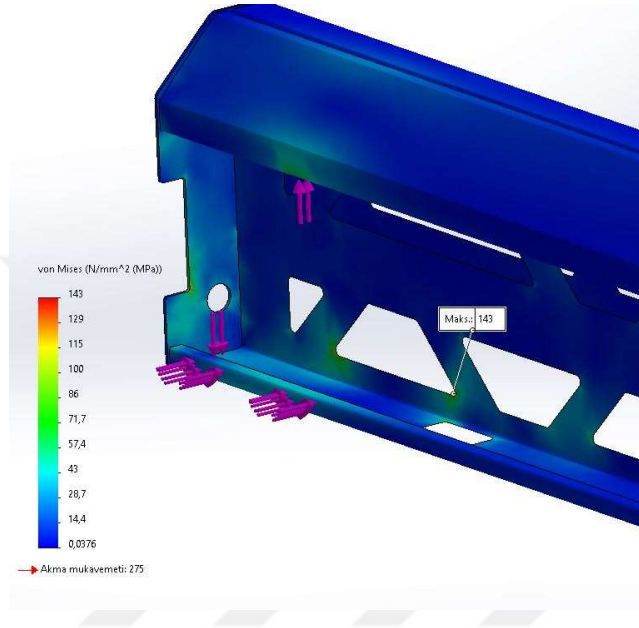
Mesnet noktaları, kuvvetler ve mesh oluşturulduktan sonra simülasyon yürütüldüğünde Von-Mises gerilmeleri Şekil 4.7.'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Orta Kanadın Von-Mises Gerilme Grafiği

Renk diyagramında, renk kodlarının denk geldiği yaklaşık gerilmeler gösterilmiştir. Kanatın genelinde oldukça düşük gerilmeler görülürken, maksimum gerilmenin olduğu yerde

148 MPa gerilme ölçülmüştür. Bu değer St-52 Çelik malzemelerin akma mukavemeti olan 381 MPa (Seitl vd. 2020)'dan 2,57 kat daha düşük gerilme elde edilmiştir. Diğer bir deyişle, dış kanadın güvenlik katsayısı değeri 2,57 olarak hesaplanmıştır. Orta kanat tasarımında maksimum gerilmenin olduğu bölgeler Şekil 4.8.'de gösterilmiştir.

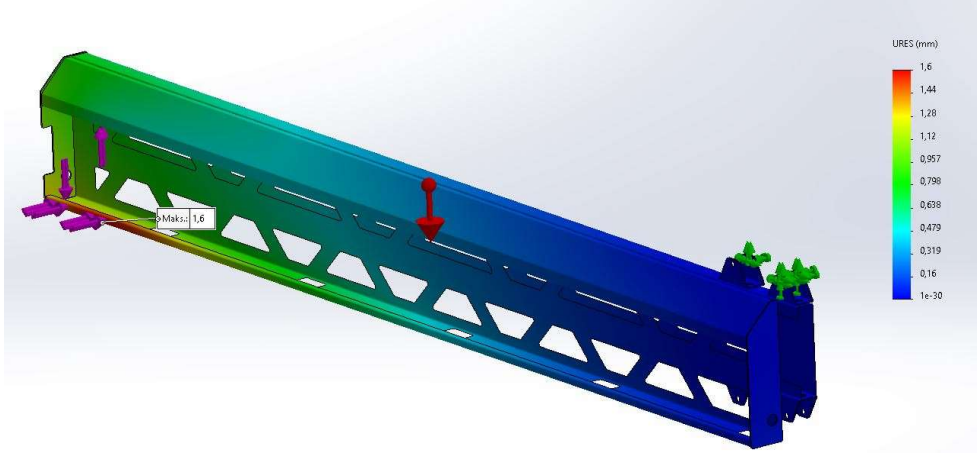


Şekil 4.8. Orta Kanat Üzerinde Maksimum Gerilmeye Maruz Kalan Bölgeler

Bu bölgedeki gerilme yığılmasının sebebi olarak, sac parçadan kesilen parçaların yarattığı çentik etkisi olarak düşünülebilir. Bunun önüne geçmek ve güvenlik katsayısını arttırmak için, kesme yarıçapı büyütülebilir veya kesme açıları değiştirilebilir.

#### 4.2.2.2. Orta Kanat Yer Değiştirme Analizi

Dış kanada etkiyen eğilme zorlanmasının sonucu olarak, sac levhalarda eğilmeler meydana gelmiştir. Bu eğilmeler analizlerde yer değiştirme grafikleri ile gösterilmiştir. (Şekil 4.9.)

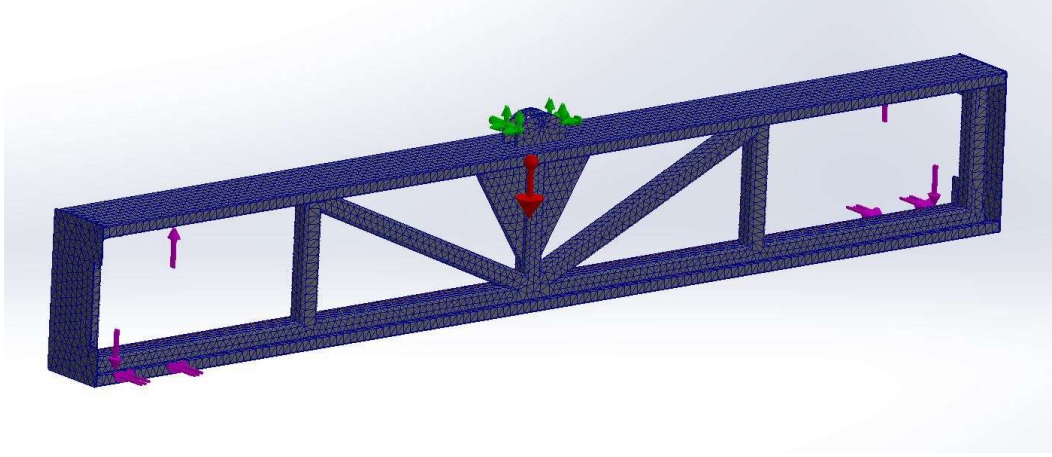


Şekil 4.9.Orta Kanat Yer Değişirme Grafiği

Dikey yönde gerçekleşen bu yer değiştirmeler, mesnet noktalarından kanat ucuna doğru gidildikçe artmaktadır. Maksimum yer değiştirme değeri, dış kanadın tekerleklerinin oturduğu saclar üzerinde 1.6 mm olarak görülmektedir. Bu değer, dış kanadın doğrusallığını fazla etkilemeyeceği için ve ilaçlama uygulamasında meme ucu ile bitki tepe noktası yüksekliğin 500 mm olduğu düşünüldüğünde ilaçlama homojenliği açısından bir tehlike oluşturmayacak kadar küçük bir değerdir.

#### 4.2.3. Ana Kanat Analiz Sonuçları

Ana kanat analizinde, kanat, ilaçlama makinesi şasisine bağlantı noktalarından sabitlenmiş, dış yük olarak kanat ağırlığı ve orta kanatlardan etkileyen, serbest cisim diyagramları ile hesaplanan kuvvetler etki ettirilmiştir. Ardından mesh oluşturma işlemi yapılmıştır. Mesh oluşturma sonucunda orta kanatta 43371 adet sonlu eleman, 87375 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Mesh'lerin, mesnet noktalarının ve harici yüklerin görünümü Şekil 4.10.'da gösterilmiştir.

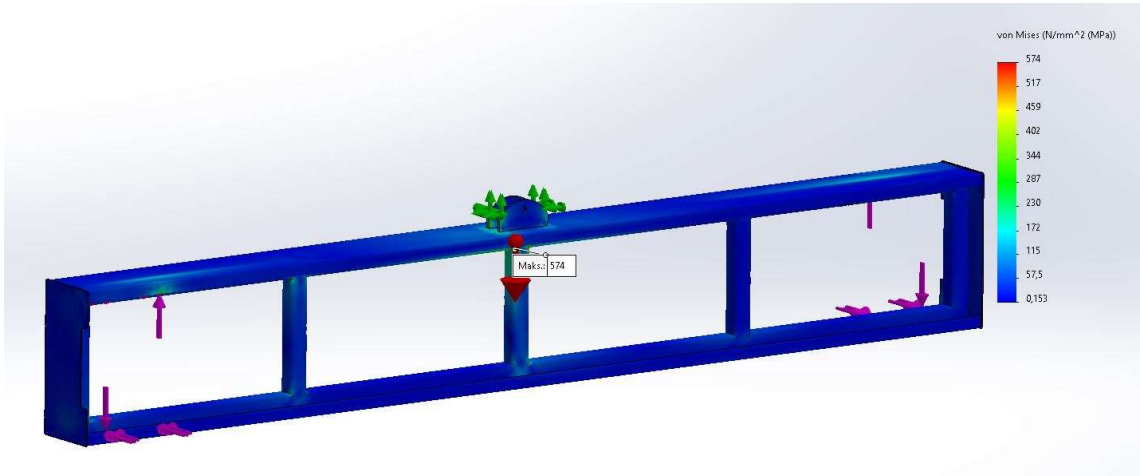


Şekil 4.10. Ana Kanatta Oluşturulan Meshler, Mesnet Noktaları ve Harici Yükler

Şekil 4.10.'da yeşil renkli oklarla gösterilen kısımlar, simülasyona sabit mesnet olarak tanıtılmıştır. Kırmızı ok, 931,95 N'luk kanat ağırlığını, pembe oklar ise, yükleme hesaplarındaki denklemlerle elde edilen  $F_3, F_4, F_8, F_9$  orta kanattan gelen kuvvetleri göstermektedir.

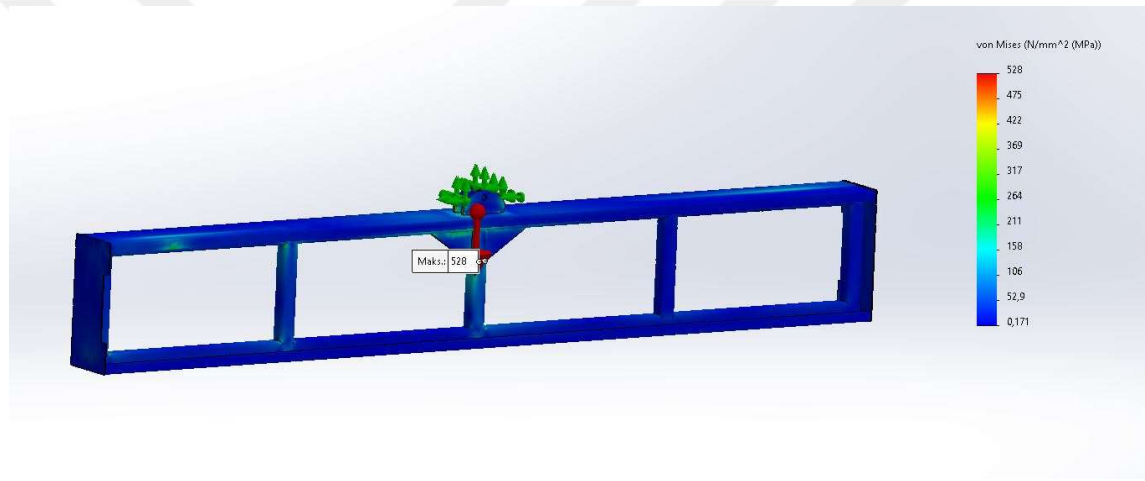
#### 4.2.3.1. Ana Kanat Von-Mises Gerilme Analizi

Mesnet noktaları, kuvvetler ve mesh oluşturulduktan sonra simülasyon yürütüldüğünde Von-Mises gerilmeleri Şekil 4.11.'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Ana Kanadın Von-Mises Gerilme Grafiği

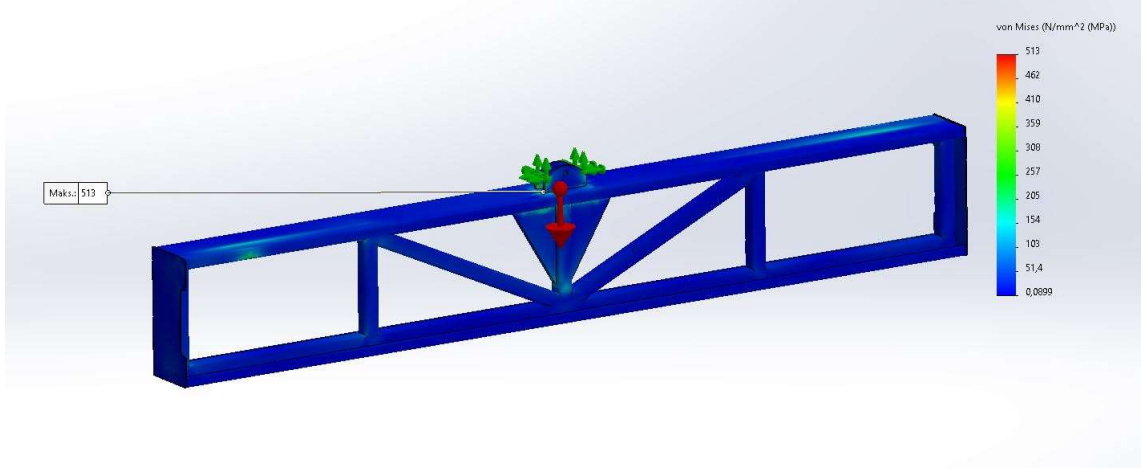
Şekil 4.11.'de, orta kanatlardan gelen kuvvetlerin yarattığı yüksek gerilmeler sonucunda, maksimum gerilme 574 MPa olarak hesaplanmıştır. St-37 profilden imal edilen bu kısımda oluşan gerilme 276 MPa olan akma mukavemetinin iki katından fazla bir gerilmedir. Bu durumda ana kanattaki mevcut tasarımın mukavim olmadığı belirlenmiştir. Bu şekilde üretildiğinde ana kanat kırılacaktır. Bu sebeple, ana kanat tasarımı üzerindeki tehlikeli kesitlerde tasarım iyileştirilmesi yapılması gerekmektedir. İlk fikir olarak, ana kanatta orta profildeki gerilmeleri dağıtmak için, üst yatay profil ile orta dikey profil birleşim noktasının sağ ve soluna 15 mm kalınlığında lama kaynaklanmıştır. Sonrasında analiz tekrar yürütüldüğünde, Şekil 4.12.'deki grafikte görülen gerilmeler ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.12. Üçgen Lama Desteği Eklenmesi Sonucu Oluşan Von-Mises Gerilme Grafiği

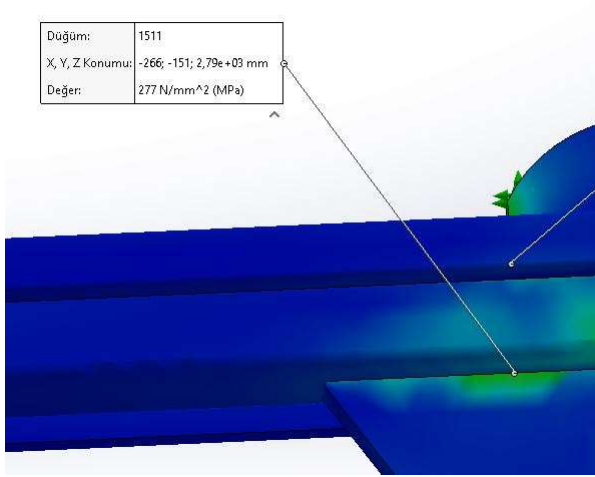
Bu grafikten görüleceği gibi, maksimum zorlanma değeri azalsa da (529 MPa), hem maksimum gerilmenin olduğu bölge üçgen lamanın üzerinde oluşmuş, hem de yine akma mukavemetini üstünde bir sonuç elde edilmiştir.

İkinci tasarım değişikliği olarak, profiller arasındaki desteği arttırmak amacıyla, üst yatay profilden alt yatay profile doğru çapraz şekilde uzanan iki adet destek profili eklenmiştir. Ayrıca, üçgen destek lamasının boyutları düşey yönde artırılarak gerilme yığılmasının yayılması amaçlanmıştır. Yapılan bu iyileştirme sonrasında analiz tekrar yürütüldüğünde Şekil 4.13.'teki grafik elde edilmiştir.



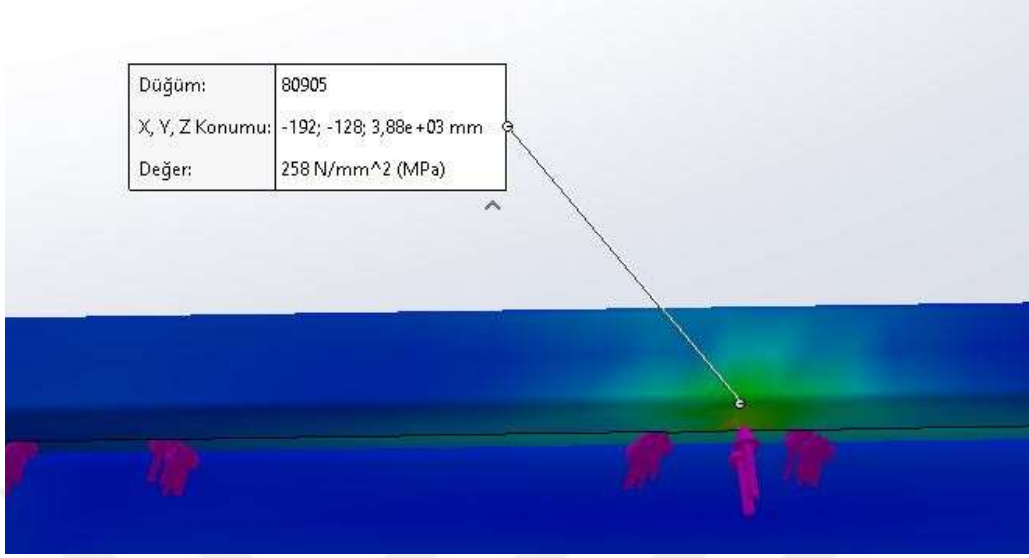
Şekil 4.13. Üçgen Lama Desteği ve Çapraz Destek Profilleri Eklenmesi Sonucu Oluşan Von-Mises Gerilme Grafiği

Bu grafikte görüleceği gibi, yapılan iyileştirmeler ile beraber, 513 MPa değerindeki maksimum gerilme noktası kanat profilinin dışında, mesnet noktasında oluşmuştur. Kanat profili üzerindeki maksimum gerilme Şekil 4.14.'te görülmektedir.



Şekil 4.14. Ana Kanat Üzerindeki İyileştirmeler Sonucu Oluşan Maksimum Gerilme Bölgesi

Grafikten görüleceği üzere, yapılan son iyileştirme ile birlikte 277 MPa'lık maksimum gerilme, destek lamalarında oluşmuş, akma mukavemeti değeri 381 MPa olan St-52 malzemeden üretilen bu lamalarda gerilme değeri akma mukavemeti değerinin altına inmiştir. Orta kanatlarının üzerinde hareket ettiği bölgedeki maksimum gerilmeye baktığımızda ise Şekil 4.15.'teki sonuç görülmektedir.

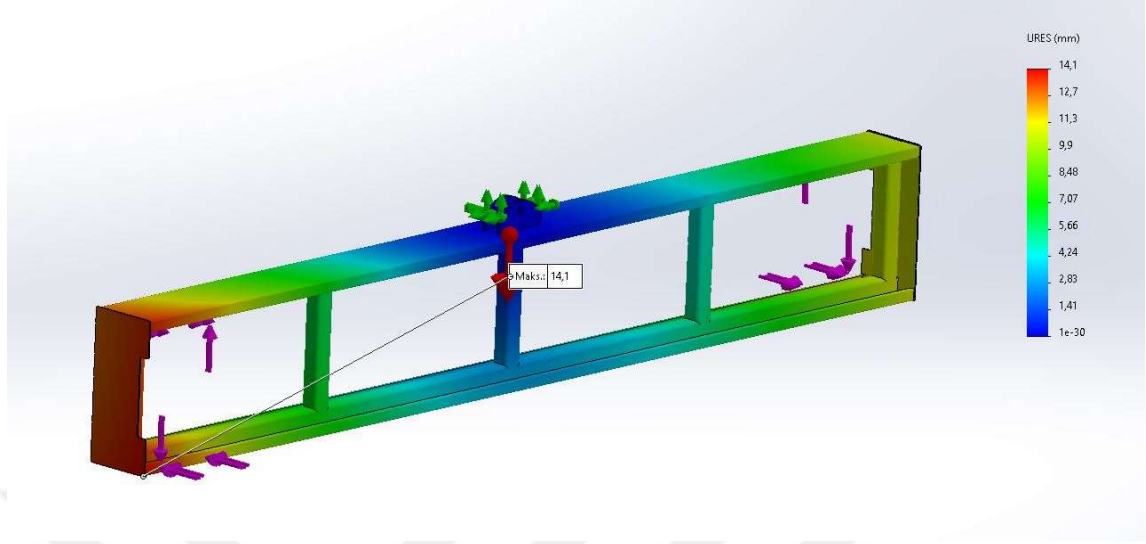


Şekil 4.15. Orta Kanadın Ray Sacında Oluşan Maksimum Gerilmeler

Burada maksimum gerilmenin olduğu yer, orta kanat hareket tekerleklerinden etkileyen  $F_4$  kuvvetinin temas noktasıdır. Bu bölgede de yapılan iyileştirmeler ile 258 MPa olan gerilme değeri akma mukavemetinden (381 MPa) düşük bulunmuştur. Ancak burada, sac bükülmesi sonucu oluşacak, büyüklüğü belirlenemeyen ekstra kuvvetlerin yaratabileceği zorlanmalara karşı yapılabilecek iyileştirmeler, üretim aşamasında belirlenebilir.

#### 4.2.3.2. Ana Kanat Yer Değiştirme Analizi

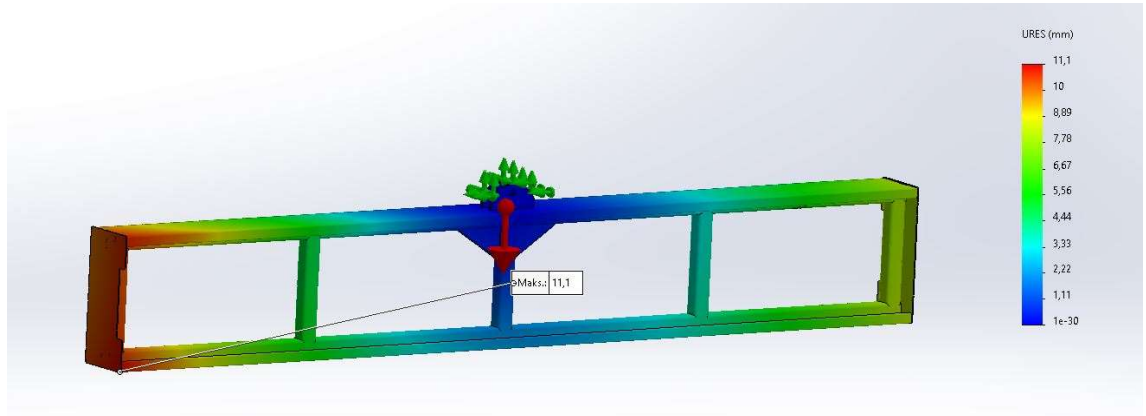
Ana kanat üzerinde yapılan ilk analizde, akma mukavemetinden fazla oluşan gerilmeler sonucunda yer değiştirme miktarları da yüksek çıkmıştır. İlk tasarımın analizi sonucu oluşan yer değiştirme grafiği Şekil 4.16.'da görülmektedir.



Şekil 4.16. Ana Kanat İlk Tasarımının Yer Değişirme Grafiği

Burada görüleceği üzere, 16,1 mm'lik bir yer değişirme söz konusudur, bu değer sırasıyla orta ve dış kanatta daha büyük yer değişirmelere yol açabileceği için ilaçlama uygulamasının homojenliğini bozacak kadar tehlikelidir.

İlk iyileştirme ile üçgen lamanın eklenmesi sonucu yürütülen analizde yer değişirme grafiği biraz daha iyileşse de, istenen sonuç elde edilememiştir. (Şekil 4.17.)

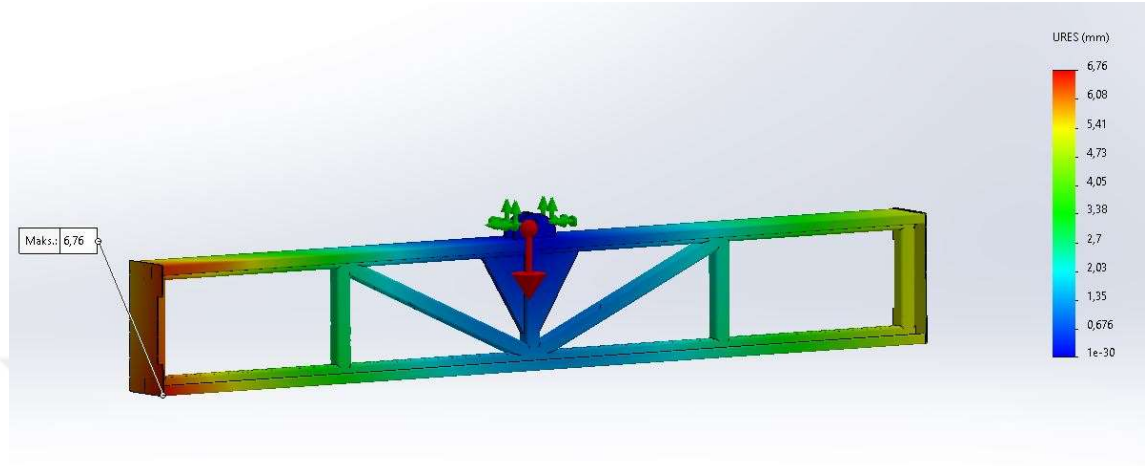


Şekil 4.17. Ana Kanat İlk İyileştirme Sonrası Yer Değişirme Grafiği

11 mm yer değişirme orta ve dış kanatta daha büyük yer değişirmelere yol açabileceği için ilaçlama uygulamasının homojenliğini bozacak kadar tehlikelidir.



Son iyileştirme ile çapraz destek profillerinin eklenmesi ile beraber yürütülen analizde yer değiştirme grafiği beklenen sonuçları göstermiştir. (Şekil 4.18.)

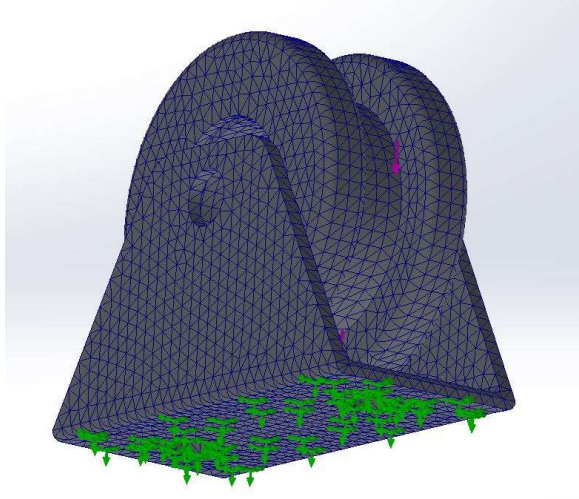


Şekil 4.18. Ana Kanat İkinci İyileştirme Sonrası Yer Değiştirme Grafiği

6.7 mm'lik yer değiştirme, bu tasarım için kabul edilebilir bir değer olmakla birlikte, üretim aşamasında tüm kanatlar birbirine montajlandıktan sonra oluşacak sonuçlarla beraber, kanat üzerinde tekrar iyileştirme yapılabilir.

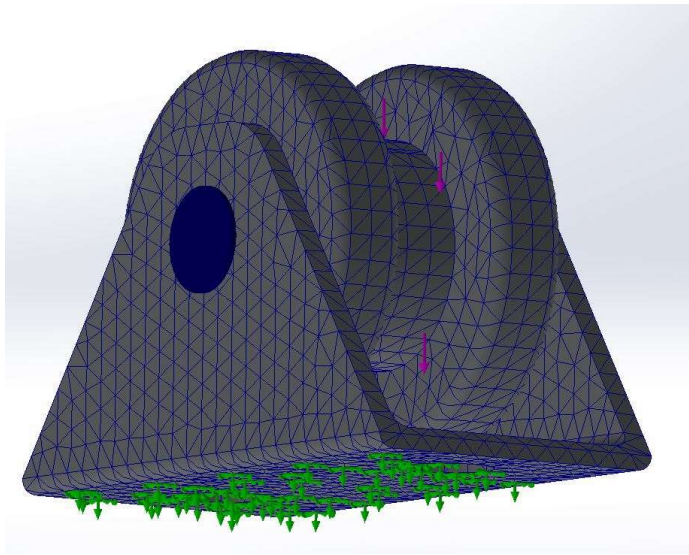
#### 4.2.4. Hareket Tekerlekleri Analiz Sonuçları

Kanat profillerinden sonra zorlanmanın kritik noktalarından biri, çalışma konumunda etkiyen kuvvetlerin zorlanmaya maruz bıraktığı hareket tekerlekleridir. Orta ve dış kanatların hareket tekerlekleri olarak iki farklı analiz yapılmıştır ve analizde, en çok kuvvetin geldiği tekerlekler incelenmiştir. Hareket tekerleklerinin analizi yapılırken, mesnet noktası olarak tekerlekleri tutan u şekilli sacın, kanatlara cıvata ile bağlandığı yüzeyi alınmıştır. Dış kuvvet olarak da, orta kanatta etkiyen maksimum kuvvet olan ve 12 numaralı denklemden hesaplanan 7905,92 N'luk kuvvet tekerlek göbeğinin ray sacıyla temas ettiği noktadan etki ettirildikten sonra mesh oluşturma işlemi yapılmıştır. Mesh oluşturma işlemi sonucunda orta kanatların hareket tekerleklerinde 28768 sonlu eleman, 48235 adet bağlantı noktası oluşturulmuştur. Orta kanat hareket tekerleğinde oluşan mesh'lerin, mesnet noktalarının ve dış kuvvetlerin görünüşü Şekil 4.19.'da verilmiştir.



Şekil 4.19. Orta Kanat Hareket Tekerleklerinde Oluşturulan Meshler, Mesnet Noktaları ve Harici Yükler

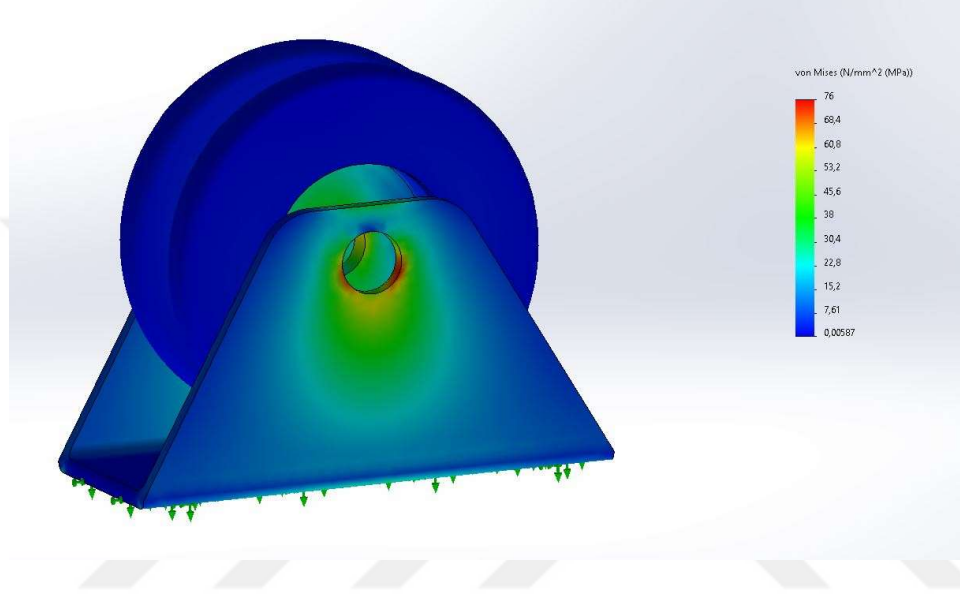
Dış kanadın hareket tekerleğinin analizinde de, benzer adımlar takip edilmiştir. Mesh oluşturma işlemi sonunda 27159 sonlu eleman, 44821 düğüm noktası oluşturulmuştur. Dış kanat hareket tekerleğinde oluşan mesh'lerin, mesnet noktalarının ve dış kuvvetlerin görünüşü Şekil 4.20.'de verilmiştir.



Şekil 4.20. Dış Kanat Hareket Tekerleklerinde Oluşturulan Meshler, Mesnet Noktaları ve Harici Yükler

#### 4.2.4.1. Hareket Tekerlekleri Von-Mises Gerilme Analizi

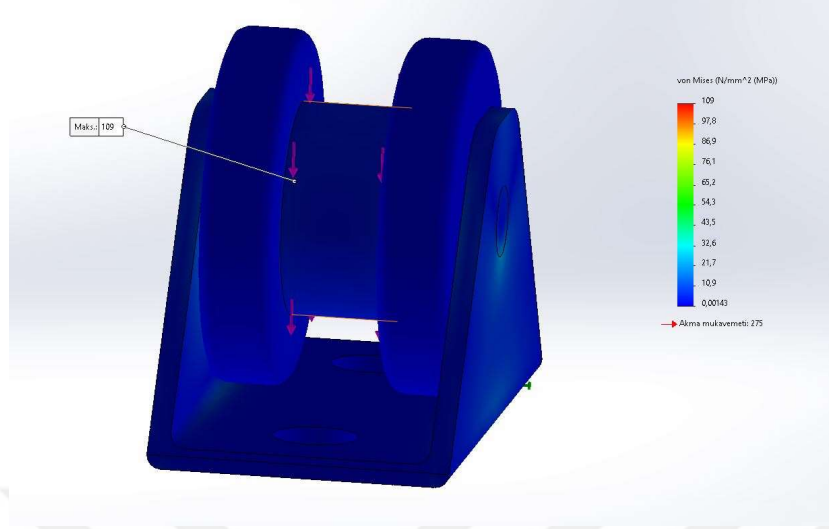
Mesnet noktaları, kuvvetler ve mesh oluşturulduktan sonra simülasyon yürütüldüğünde orta kanat hareket tekerleklerinde oluşan Von-Mises gerilmeleri Şekil 4.21'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Orta Kanat Hareket Tekerleğinin Von-Mises Gerilme Grafiği

Grafikten anlaşılacağı üzere, maksimum gerilmenin olduğu yerde gerilme 76 MPa olarak hesaplanmıştır. Akma dayanımı 275 MPa olan ST-52 malzeme için 3,6 kat daha düşük bir gerilme elde edilmiştir. Diğer bir deyişle, orta kanat hareket tekerleğinin güvenlik katsayısı değeri 3,6 olarak hesaplanmıştır.

Aynı işlemler dış kanat hareket tekerleği için yapıldığında, Von-Mises gerilmeleri Şekil 4.22.'deki gibi oluşmuştur.

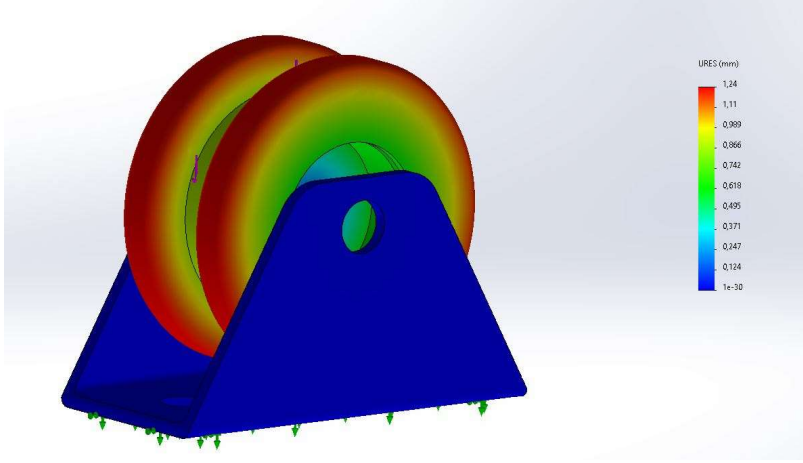


Şekil 4.22. Dış Kanat Hareket Tekerleğini Von-Mises Gerilme Grafiği

Grafikte görüleceği üzere, maksimum gerilme, tekerlek göbeğine takılan cıvata üzerinde gerçekleşmiştir. Kullanılan cıvatanın kalitesine göre akma mukavemeti değişse de, uygun cıvata seçimi yapıldığında en az 600 MPa değerinde akma mukavemeti değerine sahip olacağı için, grafikte hesaplanan 109 MPa'lık gerilme karşısında herhangi tehlikeli bir durum oluşmayacaktır.

#### 4.2.4.2. Hareket Tekerlekleri Yer Değiştirme Analizi

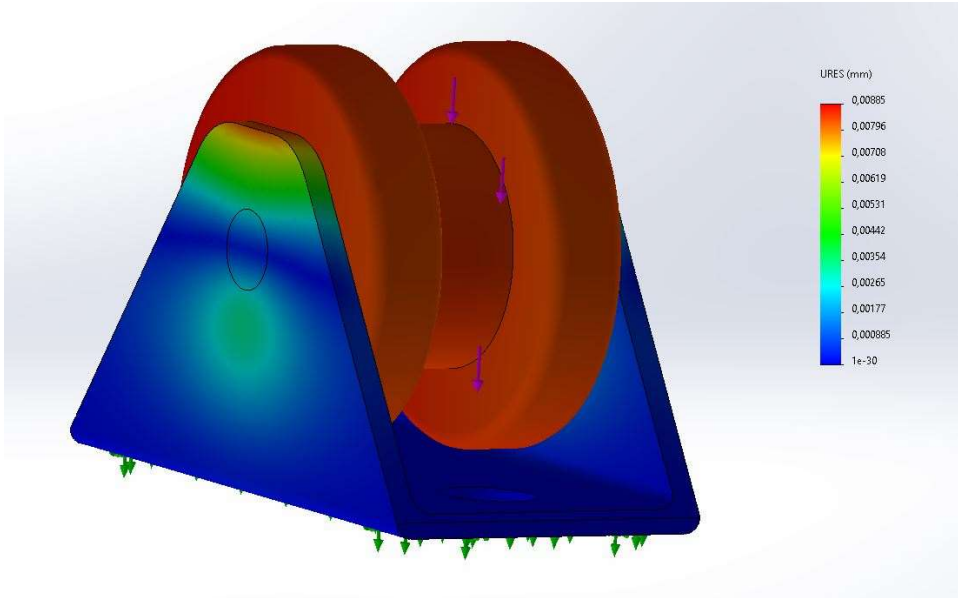
Orta kanat hareket tekerleklerine etkiyen basma zorlanmasının sonucu olarak, tekerlek göbeğinde eğilmeler meydana gelmiştir. Bu eğilmeler analizlerde yer değiştirme grafikleri ile gösterilmiştir. (Şekil 4.23.)



Şekil 4.23. Orta Kanat Hareket Tekerleği Yer Değiştirme Grafiği

Grafikten anlaşılacağı üzere, tekerlek dış yüzeyinde oluşan yer değiştirmeler, tekerleğin ray üzerinde doğrusallığını bozmayacağı için tehlike oluşturmamaktadır.

Benzer şekilde dış kanat hareket tekerleklerine etkiyen basma zorlanmasının sonucu olarak, tekerlek göbeğinde eğilmeler meydana gelmiştir. Bu eğilmeler analizlerde yer değiştirme grafikleri ile gösterilmiştir. (Şekil 4.24.)

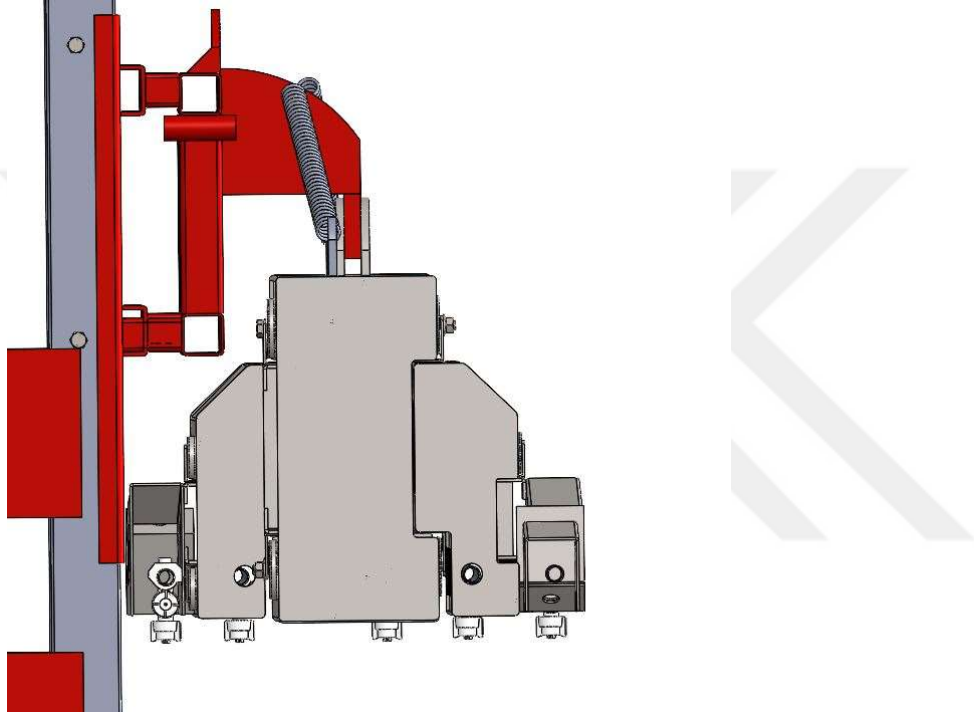


Şekil 4.24. Dış Kanat Hareket Tekerleği Yer Değiştirme Grafiği

Grafikten anlaşılacağı üzere, tekerlek dış yüzeyinde oluşan yer değiştirmeler, tekerleğin ray üzerinde doğrusallığını bozmayacağı için tehlike oluşturmamaktadır.

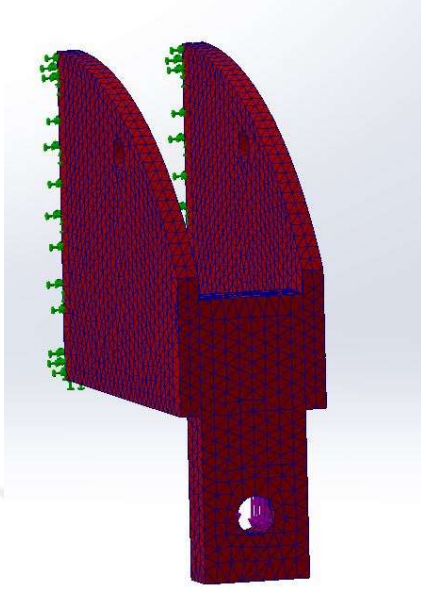
#### 4.2.5. Kanat Taşıyıcı Profil Analizi Sonuçları

Teleskopik kanat sistemi ile ilaçlama makinesi asansör şasisi arasındaki bağlantıyı sağlayan lamalar da, gerilmenin tehlikeli durumlar oluşturabileceği bölgelerdir. Bu parçaların da gerilme ve yer değiştirme analizleri yapılmıştır. Kanat taşıyıcı profilin yandan görünümü Şekil 4.25.'teki gibidir.



Şekil 4.25. Kanat Sistemi ve Asansör Şasisi Bağlantısı

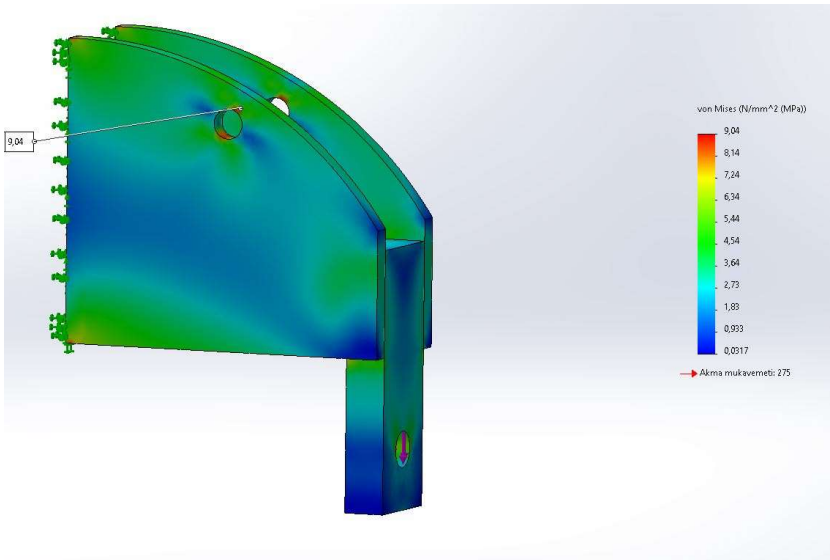
Burada bağlantı lamalarının analizi yapılırken, mesnet noktası olarak, lamaların asansör profiline kaynaklandığı yüzeyler alınmıştır. Dış kuvvet olarak, kanat ağırlığı olan 2750 N'luk kuvvet, bağlantı civatasının oturduğu 20 mm çaplı deliğe uygulanmıştır. Daha sonra mesh işlemi yapılmıştır. (Şekil 4.26.)



Şekil 4.26. Kanat Sistemi ve Asansör Şasisi Bağlantı Lamalarında Oluşturulan Meshler, Mesnet Noktaları ve Harici Yükler

#### 4.2.5.1. Kanat Taşıyıcı Profil Gerilme (Von-Mises) Analizi

Mesnet noktaları, kuvvetler ve mesh oluşturulduktan sonra simülasyon yürütüldüğünde bağlantı lamalarında oluşan Von-Mises gerilmeleri Şekil 4.27.'deki grafikte gösterilmiştir.

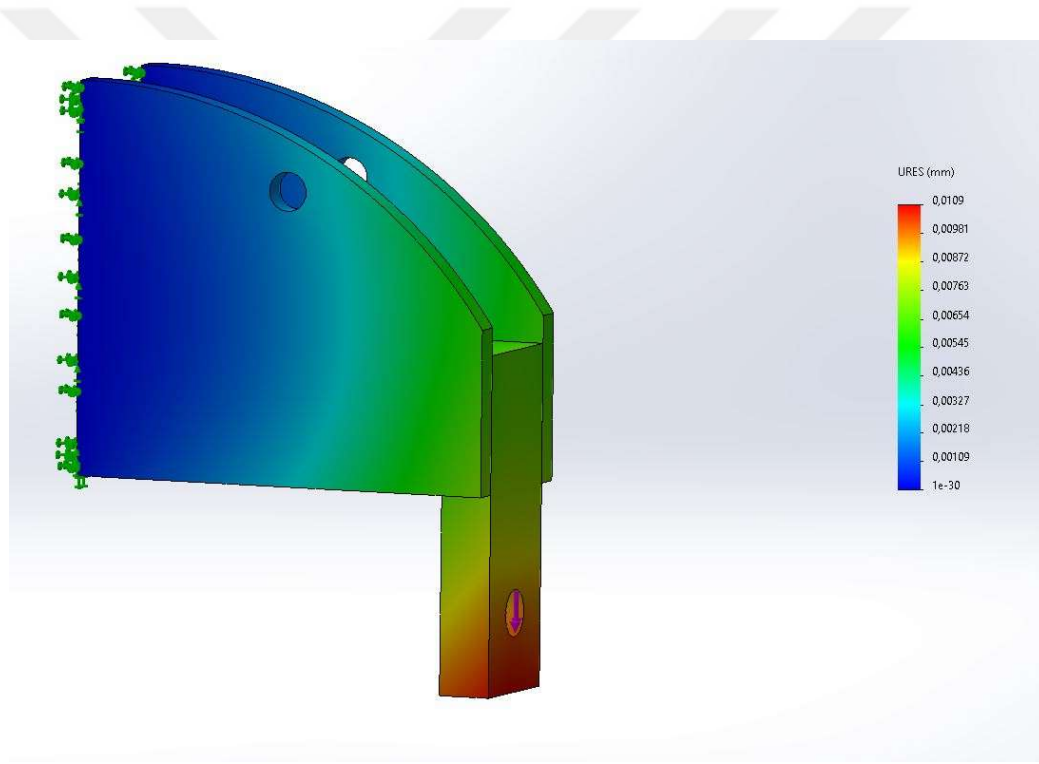


Şekil 4.27. Kanat Sistemi ve Asansör Şasisi Bağlantı Lamaları Von-Mises Gerilme Grafiği

Grafikte görüldüğü gibi, bağlantı lamaları tasarımında maksimum gerilme 9,04 MPa olarak belirlenmiştir. Bu durum gösteriyor ki, 381 MPa akma mukavemetine sahip bağlantı lamaları kanat ağırlığını taşıyabilme açısından oldukça mukavemetli bir yapıya sahiptir. Burada kullanılacak bağlantı civatasının kalitesi de dayanıma etki etmekle birlikte, uygun kaliteye sahip civata seçildiği zaman tasarımda tehlikeli durumlar oluşmayacaktır.

#### 4.2.5.2. Kanat Taşıyıcı Profil Yer Değiştirme Analizi

Bağlantı lamalarına etkiyen kuvvetlerin sonucu olarak, lamalarda oluşan eğilmeleri Şekil 4.28'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.28. Kanat Sistemi ve Asansör Şasisi Bağlantı Lamaları Yer Değiştirme Grafiği

Grafikte görüldüğü gibi, bağlantı lamaları üzerinde oluşan gerilmelerin yarattığı yer değiştirmeler, tehlikeli bir durum yaratmayacak kadar küçük yer değiştirmelerdir.

#### 4.3. Civata Kesme Hesapları

Teleskopik kanat sisteminde, hareket tekerleklerinde, hareket tekerleklerinin kanatlara bağlantısında ve kanat sisteminin ilaçlama makinesine bağlanmasında altıköşe başlı civatalar kullanılmıştır. Bu civatalar, üzerlerine gelen kuvvetlere karşı kesme zorlanmasına maruz



kalmaktadırlar. Bu civataların kesme zorlanması değerleri 20 numaralı denklem ile bulunmaktadır.

Dış kanadın hareket tekerleklerini yataklanmasında, DIN M10x25 civata kullanılmıştır. Bu civata da DIN M10x1.25 somun ile ön gerilme ile sıkılmıştır. Bu civata seçilirken, tekerlek boyutları ve dış kanadın genişliği baz alınmıştır. Dış kanat tekerleklerine gelen maksimum kesme kuvveti 4 numaralı denklem yardımıyla 1547,66 N olarak bulunmuştu. Kullanılan civatanın yarıçapı da 5 mm'dir. Bu değerleri 3.20 numaralı denklemde yerlerine koyduğumuzda aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$\tau = \frac{1547,66}{\pi \cdot 5^2} = 19,7 \text{ MPa olarak hesaplanmıştır.}$$

Benzer şekilde orta kanadın hareket tekerleklerinin yataklanmasında da civata kullanılmıştır. Buraya etkiyen kuvvetlerin daha büyük olması ve orta kanadın daha geniş olması sebebiyle, DIN M12x60 civata kullanılmış, M12x1.25 somun ile ön gerilmeli şekilde sıkılmıştır. Orta kanat tekerleklerine gelen maksimum kesme kuvveti 12 numaralı denklemde 7805,92 N olarak bulunmuştu. Kullanılan M12 civatanın da yarıçapı 6 mm'dir. Bu değerleri 20 numaralı denklemde yerlerine koyduğumuzda aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$\tau = \frac{7805,98}{\pi \cdot 6^2} = 69 \text{ MPa olarak hesaplanmıştır.}$$

Cıvatalı bağlantının kullanıldığı diğer bir kritik yer ise, kanat sisteminin ilaçlama makinesine bağlandığı lamalardır. Burada, kanat ağırlığını ve ekstra kuvvetleri taşıyabilmek için M20x80 civata kullanılmıştır, M20x1,25 somun ile ön gerilmeli şekilde sıkılmıştır. Bağlantı lamalarına gelen kesme kuvveti 18 numaralı denklemde 2462,31 N olarak bulunmuştur. Kullanılan M20 civatanın da yarıçapı 10 mm'dir. Bu değerleri 20 numaralı denklemde yerlerine koyduğumuzda aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$\tau = \frac{2462,31}{\pi \cdot 10^2} = 7,83 \text{ MPa olarak hesaplanmıştır.}$$

Görüldüğü üzere, üç farklı bağlantıda etkiyen maksimum kesme gerilmesi 69 MPa'dır. Genellikle civata ve somunlar çelikten imal edilmektedir. Civataların mekanik özellikleri, üretim sırasında üzerlerinde kabartma usulü ile yazılmaktadır (Akkurt, 1990). Günümüzde standartlaştırılan civata özellikleri Şekil 4.29'daki tabloda görülmektedir.

DIN 267 ye Göre Cıvata ve Somunlar için Mukavemet ve Sertlik değerleri													
CİVATA MUKAVEMET SINIFLARI		3,6	4,6	4,8	5,6	5,8	6,6	6,8	6,9	8,8	10,9	12,9	14,9
Kopma Mukavemeti $S_B$ (Kg / mm <sup>2</sup> )	Min	34	40	50	60	80	100	120	140				
	Max	39	55	70	80	100	120	140	160				
Sertlik HB	Min	90	110	140	170	225	280	330	390				
	Max	150	170	215	245	300	365	425	—				

Şekil 4.29. DIN 267'ye Göre Cıvata ve Somunlar için Mukavemet ve Sertlik Değerleri (Anonim,2021s)

Bu tabloya göre, tasarımda kullanılacak civatalar, hem maksimum zorlanmaya hem de oluşabilecek ekstra kuvvetlere karşı emniyetli olabilmesi adına 6,6 kalitede seçilmiştir. Buna göre seçilen civataların kopma mukavemeti 600 MPa'dır. Bu değer de, hesaplanan kesme kuvvetleri için emniyetli bir değerdir.

#### 4.4. Rulman Ömür Hesapları

Teleskopik kanat sisteminde orta ve dış kanatların hareket tekerleklerinde, aksel bilyalı rulmanlar kullanılmaktadır. Bu rulmanların dinamik koşullar altındaki ömürleri 21 numaralı denklemde bulunmaktadır. Dış kanat tekerleklerinde,61900 numaralı SKF marka rulman kullanılmıştır (AB SKF,2021). Üreticinin internet sitesinden alınan C değeri, 2,07 kN olarak belirtilmiştir (AB SKF,2021). Her bir tekerlekte çift rulman kullanıldığı için, tek bir rulmana etkiyen kuvvet, tekerleğe etkiyen kuvvetin yarısı olarak alınabilir. Bu durumda, dış kanat tekerleklerine gelen maksimum kuvvet 1547,66 N olarak hesaplanmıştır. Tek bir rulmana ise 773,83 N kuvvet etki etmektedir. 21 numaralı denklemdeki p değeri, bilyalı rulmanlar için 3 olarak alınmıştır (Akkurt, 1990). Bu değerleri 3.21 numaralı denkleme yazdığımızda sonuç aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$L = \left(\frac{2070}{773,83}\right)^3 = 19,14 \times 10^6 \text{ devir olarak hesaplanmıştır.}$$

Burada en kritik bölgedeki rulmanın 19 milyon devirde ömrünü tamamlaması, yapılan tasarımda, katlanma mekanizmasının ömrünün, tarım makinelerinin 300 saat olarak önerilen kullanım ömürlerinden çok daha fazla olduğunu göstermektedir (Temiz, 2021).

Orta kanat hareket tekerleklerinde ise, 6202 numaralı SKF marka rulman kullanılmıştır. Üreticinin internet sitesinden alınan C değeri, 8,06 kN olarak belirtilmiştir (AB SKF,2021). Her

bir tekerlekte çift rulman kullanıldığı için, tek bir rulmana etkiyen kuvvet, tekerleğe etkiyen kuvvetin yarısı olarak alınabilir. Bu durumda, orta kanat tekerleklerine gelen maksimum kuvvet 7805,92 N olarak hesaplanmıştı. Tek bir rulmana ise 3902,5 N kuvvet etki etmektedir. 21 numaralı denklemdeki p değeri, bilyalı rulmanlar için 3 olarak alınmıştır. (Akkurt,1990). Bu değerleri 21 numaralı denkleme yazdığımızda sonuç aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$L = \left(\frac{8060}{3902,5}\right)^3 = 8,81 \times 10^6 \text{ devir olarak hesaplanmıştır.}$$

Burada en kritik bölgedeki rulmanın 8,8 milyon devirde ömrünü tamamlaması, yapılan tasarımda, katlanma mekanizmasının ömrünün, tarım makinelerinin 300 saat olarak önerilen kullanım ömürlerinden çok daha fazla olduğunu göstermektedir (Temiz, 2021).

## 5. SONUÇ

Tarımda kimyasal ilaç kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu kimyasalların verimli kullanımı, en az kimyasalla en yüksek biyolojik etkinlik ile mümkündür. İlaçlama uygulamalarının arazi üzerinde homojen olarak yapılması da bu verimi arttıran faktörlerin başında gelmektedir. Homojen bir ilaçlamada da ilaçlama makineleri kilit rol oynamaktadır. İlaçlama makinesinin herhangi bir bileşeninin görevini tam yerine getirememesi, ilaç ve ürün kayıplarına sebep olmaktadır. Dünyadaki gıda tedarikinin artan nüfus karşısında gün geçtikçe tehlikeye giriyor olması göz önüne alındığında, bu kayıplar göz ardı edilemeyecek kadar önemli hale gelmektedir.

Tarla tipi ilaçlama makinelerinde, ilaçlama homojenliği için en önemli bileşenlerin başında, ilaçlama makinesi kanatları (bum) gelmektedir. Yapılan çalışmada, tarla bitkilerinde bitki koruma uygulamalarında kullanılan tarla pülverizatörleri için, teleskopik olarak katlanabilir bir bum tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımda 12 metre iş genişliğine sahip, 24 adet yelpaze hüzmeli ilaçlama makinesinin 50 cm aralıklarla yerleştirildiği, karayollarında seyir halinde izin verilen iş genişliğini aşmayacak şekilde yol konumuna getirilebilen 5 parçadan oluşan kanat sistemi bulunmaktadır. Bu 5 parçadan bir tanesi merkezde bulunmakta ve diğer 4 parçayı üzerinde taşımaktadır. Sağ ve solda ikişer adet olarak dizilen bu kanatlar birbiri üzerinde doğrusal izafi hareket yaparak, çalışma konumundan, yol konumuna geçebilmektedir. Bu hareket, redüktörlü bir elektrik motorunun çıkış milindeki dişlinin, bir kremayer dişlisi üzerinde dönerek, bağlı olduğu kanadı sağa ve sola iletmesi ile mümkün olmaktadır.

Teleskopik katlanır kanat sistemi, çalışma konumunda 11702 mm genişliğe, yol konumunda ise 2800 mm genişliğe sahiptir. Toplam kanat kütlesi 275 kg'dır. Konvansiyonel ilaçlama makinesi kanatları ile karşılaştırıldığında kütlede belirgin farklar olmasa da, tasarım ve mukavemet açısından daha emniyetli bir yapıya sahiptir.

Kanat tasarımında, yapılan tasarımın mukavemetini ölçmek için Sonlu Elemanlar Yöntemi yardımıyla, Solidworks programının Simulation modülünde, statik yapısal analizler yürütülmüştür. Bu analizlerde, önce kanatlara ve mesnet noktalarına gelen kuvvetler, serbest cisim diyagramları oluşturularak hesaplanmış, etkiyen kuvvetler analizde uygun noktalara yerleştirilip analizler yürütülmüştür. Yürütülen analizlerde, dış ve orta kanatlarda emniyetli tasarımlar ortaya çıkmıştır. Merkezde bulunan ana kanatta ise, ilk tasarım emniyetsiz olarak hesaplanmış, tasarım iyileştirmesi yapılarak, ek profiller ve destek lamaları eklenmiş, yapısal

analiz tekrar yürütülmüştür. Yeni tasarımla beraber emniyetli bir kanat yapısı ortaya çıkmıştır. Bunlara ek olarak, cıvata kesme kuvvetleri ve rulman ömür hesapları yapılarak kritik bağlantı ve yataklama elemanları da yapısal emniyet açısından kontrol edilmiştir.

Tasarlanan kanat sistemi, sac parçalar ve profiller satın alınıp, tasarıma göre bükütürölüp kesilerek, birbirine kaynaklanmıştır. Elektrik motorları ve dişliler gibi hazır parçaların da sisteme dahil edilmesi ile bu üretimin toplam maliyeti 6000€ olmuştur. Ülkemiz ekonomik koşulları ve enflasyon düzeyi, bu maliyeti belirsizleştirmektedir.

Kanat sisteminin konvansiyonel ilaçlama makinalarına göre çeşitli avantajları bulunmaktadır. İlk olarak, yol konumu ile çalışma konumu arasında geçişte, simetrik bir şekilde açılıp kapanma olacağı için, kanatın ağırlık merkezi, mesnet noktasından uzaklaşmayacaktır. Bu durumda da anlık yuvarlanma momentinin getirdiği ekstra yükler oluşmayacaktır. İkinci olarak, tarla içerisinde ilaçlama makinesinin kanatları hizasına denk gelen direk, ağaç, bina gibi engellerde, çarpma olasılığı bulunan kanat parçası traktör kabini içerisinde elektronik kumanda ile yol konumuna yaklaştırılıp, çarpma engellenecektir. Konvansiyonel ilaçlama makinelerinde bu durumun önüne geçebilmek için traktörün engelden uzaklaşması gerekmektedir. Üçüncü olarak, ilaçlama memeleri, kanat şasisi içerisine oturtulduğu için, herhangi bir dış darbeden etkilenmeyecektir.

## KAYNAKLAR

- AB SKF (2021). Rulman özellikleri, <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6202-2Z> (erişim tarihi: 05.05.2021)
- Akkurt, M. (1990). Makine Elemanları Cilt: 1. *Birsen Yayınevi*.
- Amazone Co,2021. Tarla Pülverizatörü Kanat Yapısı. [www.amazone.de](http://www.amazone.de) (erişim tarihi: 04.05.2021)
- Anonim, (2021a). Sırtta Takılan Benzinli İlaçlama Makinesi. <https://www.07magaza.com/urun/oleo-mac-am162-4-5hp-motorlu-sirt-ilaclama-makinasi-atomizer/> (erişim tarihi: 03.05.2021)
- Anonim (2021b). Radyal Fanlı Bahçe Tipi İlaçlama Makinesi. <https://www.newholland.com.tr/ekipman.aspx?model=12> (erişim tarihi: 03.05.2021)
- Anonim (2021c). Kendi Yürür İlaçlama Makinesi. <https://www.farmingahead.com.au/spraying/news/1330356/review-agrifac-condor-endurance> (erişim tarihi: 03.05.2021)
- Anonim (2021d). Pervaneli Tek Motorlu İlaçlama Uçağı [https://en.wikipedia.org/wiki/Agricultural\\_aircraft](https://en.wikipedia.org/wiki/Agricultural_aircraft) (erişim tarihi: 03.05.2021)
- Anonim (2021e). İlaçlama İçin Kullanılan İnsansız Hava Aracı <https://www.youtube.com/watch?v=Dn7Q4oIrP3I> (erişim tarihi: 03.05.2021)
- Anonim (2021f). Tarla Pülverizatörü. <https://www.topairequip.com/3pt-sprayers/600-gallon/> (erişim tarihi: 03.05.2021)
- Anonim (2021g). Manuel ve Elektronik Kontrollü Regülatörler. <https://timagri.com/urun/6788/annovi-reverberi-ucm-6-regulator/50> (erişim tarihi: 04.05.2021)
- Anonim (2021h). İlaçlama Kontrol Sistemi. <https://timagri.com/urun/18932/arag-pro-5-yollu/142-regulator-2> (erişim tarihi: 04.05.2021)
- Anonim (2021ı). İlaçlama makinesi kanadının tarla ve yol konumlarındaki görüntüsü. [https://www.badilli.com.tr/tr/urunler-2/cobra\\_600\\_tarla\\_ilaclama-69.html](https://www.badilli.com.tr/tr/urunler-2/cobra_600_tarla_ilaclama-69.html) (erişim tarihi: 04.05.2021)

- Anonim (2021j). Farklı tipte ve genişlikteki ilaçlama kanatları. <https://www.farmmachineriesales.com.au/editorial/details/bargam-grimpeur-and-grimac-sp-sprayers-touchdown-in-oz-118848/> (erişim tarihi: 04.05.2021)
- Anonim (2021k). İlaç hareketlerinin ilaç dağılımına etkisi. <https://www.semanticscholar.org/paper/Dynamic-Analysis-of-The-Intelligent-Sprayer-Boom-Wiggers-Maagaard/24e4ec99a5e155c96c3ef796f5bbd1d8b7a0bcae> (erişim tarihi: 04.05.2021)
- Anonim (2021l). Meyve bahçelerinde ilaç sürüklenmesi. <https://sprayers101.com/spray-drift/> (erişim tarihi: 04.05.2021)
- Anonim (2021m). İlaçlama izlerinin ağacın etrafından dolanması. <https://www.mewallpaper.com/9581-tree,-field-download-hd-wallpaper> (erişim tarihi: 04.05.2021)
- Anonim (2021n). Tekli Meme Başlığı. [www.timagri.com.tr](http://www.timagri.com.tr) (erişim tarihi: 04.05.2021)
- Anonim (2021o). Isı Tesiri Altındaki Bölge Oluşumu. <http://web.hitit.edu.tr/dosyalar/materyaller/eminerdin@hititedutr300320186Q3C5L6N.pdf> (erişim tarihi: 04.05.2021)
- Anonim (2021p). İlaçlama Memelerinin Kanat Profili İçerisine Yerleştirildiği Tasarımlar. <https://www.farmmachineriesales.com.au/editorial/details/bargam-grimpeur-and-grimac-sp-sprayers-touchdown-in-oz-118848/> (erişim tarihi: 05.05.2021)
- Anonim (2021r). Bir parçanın Solidworks Simülasyon Modülünde Gerilme Analizi. <http://muhendisoldum.blogspot.com/2012/09/solidworks-simulation-gerilme-analizi.html> (erişim tarihi: 05.05.2021)
- Anonim (2021s). DIN 267'ye göre Cıvata ve Somunlar İçin Mukavemet ve Sertlik Değerleri. <http://www.muhendislikbilgileri.com/?pnun=139&pt=VİDA-CİVATA> (erişim tarihi:05.05.2021)
- Bayat, A., & Itmec, M. (2018). The current state of sprayer manufacturers in Turkey and some strategies for the future. *Scientific Papers-series A-agronomy*, 61(2), 105-108.
- Björnsson, O. H., Maargaard, J., Terp, C. I., & Wiggers, S. L. (2013). *Dynamic analysis of the intelligent sprayer boom*. September, 9–12.

- Cannon, M. D. (1979). Development of a Wide Boom Field Sprayer. *Paper - American Society of Agricultural Engineers, January*. <https://doi.org/10.13031/2013.35142>
- Clijmans, L., Swevers, J., De Baerdemaeker, J., & Ramon, H. (2000). Sprayer boom motion, part 1: derivation of the mathematical model using experimental system identification theory. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76(1), 61-69.
- Celen, I. H. (2010). The effect of spray mix adjuvants on spray drift. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 16(1), 105-110.
- Çelen, I. H. (2016). Hava Emisli Yelpaze Hüzme Püskürtme Memelerinde Püskürtme Dağılımının İlerleme Hızına Bağlı Olarak Değişimi/The Change of The Spray Distribution on Air Inlet Fan Spray Nozzles depending on Different Forward Speeds. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*, 13(1), 99.
- Demir, C., & Çelen, H. İ. (2006). Tekirdağ ilindeki tarımsal işletmelerdeki pülverizatörlerin durumu ve sorunları üzerine bir araştırma.
- 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. <https://doi.org/10.1006/bioe.2001.0023>
- FAO (Dünya Gıda ve Tarım Örgütü), (2017). Tarımda Pestisit Kullanımı. Erişim Adresi: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- FAOSTAT,(2017). Dünya'daki toplam tarım alanı, Erişim adresi; <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- FAOSTAT,(2020). Dünya'daki toplam tarım alanının yıllara göre değişimi. Erişim adresi; <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- FAOSTAT,(2020). Türkiye'deki tarım alanlarının yıllara göre değişimi, Erişim adresi; <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Felsot, A. S., Unsworth, J. B., Linders, J. B., Roberts, G., Rautman, D., Harris, C., & Carazo, E. (2010). Agrochemical spray drift; assessment and mitigation—A review. *Journal of Environmental Science and Health Part B*, 46(1), 1-23.
- Fujita, H., & Sugiyama, H. (2012). Development of flexible telescopic boom model using absolute nodal coordinate formulation sliding joint constraints with LuGre friction.



- Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2(6), 063005.  
<https://doi.org/10.1063/2.1206305>
- He, Y. J., Qiu, B. J., & Yang, Y. F. (2014). Simulation analysis of isolation about spray boom. *Advanced Materials Research*, 900, 742–745.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.900.742>
- Herbst, A., & Wolf, P. (2000). Spray deposit distribution from agricultural boom sprayers in dynamic conditions. *Proceedings of the 25th International Conference on Noise and Vibration Engineering, ISMA, 0300(xx)*, 1621–1627. <https://doi.org/10.13031/2013.7335>
- Herbst, A., Osteroth, H. J., Fleer, W., & Stendel, H. (2015). A method for testing automatic spray boom height control systems. In 2015 ASABE Annual International Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Herbst, S., Steinke, K. F., Maier, H. J., Milenin, A., & Nürnberger, F. (2016). Determination of heat transfer coefficients for complex spray cooling arrangements. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*.
- Hewitt, A. J. (2000). Spray drift: impact of requirements to protect the environment. *Crop Protection*, 19(8-10), 623-627.
- Hilz, E., & Vermeer, A. W. (2013). Spray drift review: The extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction. *Crop Protection*, 44, 75-83.
- Jafari Malekabadi, A., Sadeghi, M., & Zaki Dizaji, H. (2016). Comparing quality of a telescopic boom sprayer with conventional orchard sprayers in Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 18(3), 585–599.
- Jeon, H. Y., Womac, A. R., & Gunn, J. (2004). Sprayer boom dynamic effects on application uniformity. *Transactions of the ASAE*, 47(3), 647.
- Jeon, H. Y., Womac, A. R., Wilkerson, J. B., & Hart, W. E. (2004). *S b i f u*. 47(3), 659–666.
- Kennes, P., Anthonis, J., & Ramon, H. (1998). Modelling and Optimization of the Dynamic Behaviour of Sprayer Booms. *IFAC Proceedings Volumes*, 31(2), 321–325.  
[https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)44217-0](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)44217-0)
- Khalifeh, A. R., Banaraki, A. D., Manesh, H. D., & Banaraki, M. D. (2018). Investigating of the tensile mechanical properties of structural steels at high strain rates. *Materials Science and Engineering: A*, 712, 232-239.

- Lee, J. H., Park, S. H., Kwon, H. S., Kim, G. S., & Lee, C. S. (2014). Laser, tungsten inert gas, and metal active gas welding of DP780 steel: comparison of hardness, tensile properties and fatigue resistance. *Materials & Design*, *64*, 559-565.
- Lupea, I., Tudose, L., Stanescu, C. M., & Lupea, M. (2009). Dynamic simulation and experiment on a sprayer boom structure. *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, January*, 1541–1542.
- Matthews, G. (2008). *Pesticide application methods*. John Wiley & Sons.
- Manea, D., Gidea, M., Marin, E., & Mateescu, M. (2018). Simulation of mechanical parameters of sprayer boom. *Engineering for Rural Development*, *17*, 45–51. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N048>
- Nation, H. J. (1982). The dynamic behaviour of field sprayer booms. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *27*(1), 61–70. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(82\)90058-0](https://doi.org/10.1016/0021-8634(82)90058-0)
- 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*(6), 813–820. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(03\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(03)00045-0)
- Ozyurt, H. B., Onler, E., & Celen, I. H. (2020). *Determination of the Field Sprayers and Their Problems in Thrace Region , Turkey. November*.
- Raftoyiannis, I. G., & Michaltsos, G. T. (2013). Dynamic behavior of telescopic cranes boom. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, *13*(1). <https://doi.org/10.1142/S0219455413500107>
- Ramon, H., & De Baerdemaeker, J. (1997). Spray boom motions and spray distribution: Part 1, derivation of a mathematical relation. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, *66*(1), 23–29. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0114>
- Ramon, H., Missotten, B., & De Baerdemaeker, J. (1997). Spray boom motions and spray distribution: Part 2, experimental validation of the mathematical relation and simulation results. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, *66*(1), 31–39. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0115>
- Roylance, D. (2001). Finite element analysis. *Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge*.

- Savruk, M. P., & Kazberuk, A. (2017). *Stress concentration at notches* (p. 2). Cham: Springer International Publishing
- Seitl, S., Pokorný, P., Miarka, P., Klusák, J., Kala, Z., & Kunz, L. (2020). Comparison of fatigue crack propagation behaviour in two steel grades S235, S355 and a steel from old crane way. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 310, p. 00034). EDP Sciences.
- Solidworks, Dassault Systems (teknik resim yazılımı), Tennessee, 2018
- 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. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(74\)90027-4](https://doi.org/10.1016/0021-8634(74)90027-4)
- Sun, J., & Miao, Y. (2011). Simulation and controller design for an agricultural sprayer boom leveling system. *Proceedings - 3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2011*, 3, 245–248. <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2011.632>
- Temiz, V. (2021). Rulmanlı Yataklar, Makine Elemanları 1-2 Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi
- TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu, (2019). Türkiye’deki Toplam Traktör ve Biçerdöver Adedi. Erişim Adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=tarim-111&dil=1>
- TÜİK, (2019). Türkiye’deki Sırt Pülverizatörü Adedi. Erişim Adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=tarim-111&dil=1>
- TÜİK, (2019). Türkiye’deki Tarla Pülverizatörü Adedi. Erişim Adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=tarim-111&dil=1>
- WHO (Dünya Sağlık Örgütü), (2019). World Population Prospects, Erişim adresi: <https://population.un.org/wpp/Graphs/>
- Zhang, J., Wang, X., & Li, S. (2019). Finite Element Modeling and Robust Control of Plant Protection Machine Boom. *Journal of Advanced Agricultural Technologies*, 6(4), 257–262. <https://doi.org/10.18178/joaat.6.4.257-262>
- Zhao, X., Liu, X., Yuan, J., & Chen, R. (2016). *ADAMS and ANSYS based Mechanism Optimization of Multifunctional Sprayer and Performance Test*. Iwama, 175–178. <https://doi.org/10.2991/iwama-16.2016.32>