

PAPER DETAILS

TITLE: Tarımsal İlaçlamada X tipi Katlanabilen ve Geleneksel Kanatlarda Olusan Gerilme-Gerinimin Tahmini ve Taguchi Analizi

AUTHORS: Hacı ERDOĞAN,Ahmet SAYRUGAÇ,Bekir YALÇIN

PAGES: 797-810

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/3010151>

Araştırma Makalesi / Research Article

Tarımsal İlaçlamada X tipi Katlanabilen ve Geleneksel Kanatlarda Oluşan Gerilmenin Tahmini ve Taguchi Analizi

Hacı ERDOĞAN¹, Ahmet SAYRUGAÇ¹, Bekir YALÇIN^{2*}¹Önallar Tarım Aletleri, Konya, TÜRKİYE.²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, TÜRKİYE.

Sorumlu yazar e-posta*: bekiryalcin@aku.edu.tr

arge3@onallar.com.tr

ahmetsayrugac@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0102-7769>ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-7391-4500>ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-3157-6975>

Geliş Tarihi: 15.03. 2023

Kabul Tarihi: 14.06.2023

Özet

Günümüz teknolojisinde, tarımsal ilaçlama makinelerinin genişliklerinin artmasıyla ilaç püskürtücü kanatların katlanma ve montaj usullerinde farklılaşmaya gidilmiştir. Orta ve uzun kanatlı ilaçlama makineleri, daha ekonomik ve hızlı ilaçlama avantajlarını sunmakla birlikte arazi, çevre koşulları ve düşük montaj rijitlik etkisiyle kanatlarda ürün ilaçlama kalitesini etkileyen stabilite problemlerine sebep olmaktadır. Bu çalışmada, tarımsal ilaçlama makinelerinde kullanılan X tipi katlanır kanatlar ile geleneksel kanatlar; tasarım farklılığı, farklı yüklemeler altında oluşan gerilme ve gerinim bakımından mukayese edilmiştir. Konuyla ilgili literatür araştırması yapıldıktan sonra, her iki kanat tipi tasarlanarak gerekli malzeme sabitlerine ve literatürde belirtilen farklı deplasman değerlerine göre yüklemeler altında yapısal sonlu elemanlar analizleri (FEA) yapılmıştır. Taguchi deney tasarımına göre yapılan FEA neticesinde; X tipi katlanan kanatta maksimum gerilme ve gerinimler püskürtücü kanadın kayar mekanizmaya montaj konstrüksiyonunda, geleneksel kanatlarda profillerin kaynaklı montaj bağlantılarında yoğunlaşmıştır. Ayrıca, FEA analiz sonuçları kullanılarak yapılan Taguchi analizi ile yorumlanarak imalata projeksiyon bilgileri elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler

Tarımsal ilaçlama makinesi; X tipi katlanır kanat; Sonlu elemanlar analizi; Taguchi.

Abstract

In today technology, differentiation has been made in methods of boom folding and mounting methods with increased width of agricultural spraying machines. Spraying machines with middle and long booms offer advantage of more economical and fast spraying and cause stability problems affecting plant spraying quality due to terrain and environment condition, and also low rigid fixing. In this study, X type folding boom compared with conventional boom in terms of stresses and strains and also design differences. After doing literature surveys, the X type and conventional spraying booms were designed and then the structural finite elements analyses (FEA) were performed by defining of materials constants and under the determined loading according to displacements of booms mentioned in literature. As results of FEA analyses with Taguchi experimental design; the obtained stresses and strains focused on the mounting construction to sliding mechanism of agriculture spraying machine, on the other hand, stresses and strains localized on welding connection of boom profiles. The projection information obtained with interpreting of the Taguchi analyses using FEA results to manufacturing of sprayer boom.

Keywords

Agricultural spraying machine; X type folding boom; Finite elements analyses; Taguchi.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

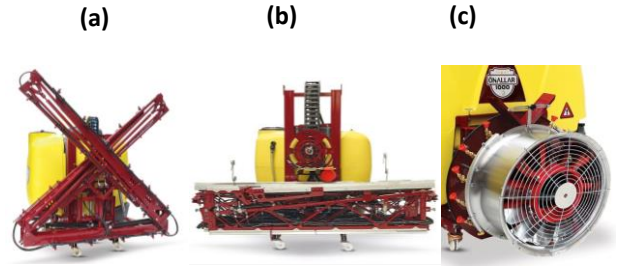
1. Giriş

Dünya nüfusundaki artış, ülkelerin tarım politikalarını tekrar gözden geçirmesine neden

olmuş ve potansiyel ekilebilir tarım arazilerinin tarımsal üretiminde kullanılması için radikal yasal düzenlemeler yapılmaya başlanmıştır. Bununla birlikte, dünya genelinde yaşanan pandemi, yerli

tarımsal üretim konusunda önemli farkındalık oluşturmuş ve yerli üretimin önemini ortaya çıkarmıştır. Bu önem, erişilebilir tarımsal arazilerin ve ürünlerin verimini arttırmak adına bilimsel ve uygulamalı çalışmaların yapılmasına ve tarımsal mekanizasyon teknolojilerinin geliştirilmesine katkı sağlamıştır.

2022 yılında yapılan bir çalışmada (Lipinski *et al.* 2022), tarımsal ürün kalitesini ve verimliliğini arttırmak, ürünü zararlılardan ve hastalıklardan korumak için stabil ilaçlama teknolojilerinin geliştirilmesi üzerine odaklanılmıştır. Homojen tarımsal ilaçlamanın, arazi ve hava koşullarına, traktör ve ilaçlama makinesinin bağlama elemanları rijitliğine, uygulamanın kalitesine bağlı olduğu bilinmektedir. Bir başka çalışmada (Bisesi and Koren 2003), tarımsal hastalıkların ve zararlıların ürünün verimini, tane büyüklüğünü, depolanma süresini ve kalitesini düşürmekle birlikte olası hastalığın hızlıca yayılmasına neden olduğu ve yeterli ilaçlamanın önemi vurgulanmıştır. Diğer yandan, ilaçlamada yanlış uygulama ve fazla dozajın toprağın ve yüzeyinin, suyun kirlenmesine ve ayrıca bitkide fazla ilaç kalıntısına sebep olabileceği de rapor edilmektedir (Ilıca ve Boz 2017). Yapılan bir çalışmada (Jink and Wei 2023), pirinç üretiminde homojen ilaçlama için yeni nesil saçak veya tente usulü akıllı püskürtücülerin geliştirildiği ifade edilmektedir. Pek çok çalışmada (Gil and Badiola 2007; Cui *et al.* 2017; Jeon *et al.* 2004; Langenakens *et al.* 1999), ilaçlama kalitesinin diğer ilaçlama parametreleri ile birlikte püskürtücülerin montajlı olduğu kanatların stabilitesine bağlı olduğu rapor edilmektedir. Önallar'ın raporuna (Önallar 2022) göre de, tarımsal ilaçlama makinelerinde püskürtücülerin bulunduğu mekanizasyon kanatların genelde çekilir tip (trailed type) ve montajlı tip (mounted type) olmak üzere iki tip tasarlandığı anlaşılmaktadır ve bu durum Şekil 1'de verilmiştir.

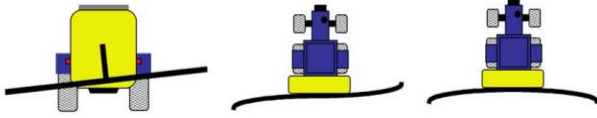


Şekil 1. Tarımsal ilaçlama makinesi püskürtücü kanatlar (a) X tipi katlanabilen (b) Geleneksel yatay katlanabilen (c) Dikey püskürtmeli (Önallar 2022)

Günümüz malzeme ve imalat teknolojileri ile püskürtücü kanatların genişlikleri dramatik bir şekilde arttırılmış ve 45m genişliğe kadar püskürtücü kanatlara sahip ilaçlama makinelerinin ticarileştiği görülmektedir. Çin'de yapılan istatistik çalışmalara göre 10m ila 14.9m aralığına sahip tarım ilacı püskürtücü kanatların kısa ve orta uzunlukta olduğu ileri sürülmektedir (Zhuang *et al.* 2018). Orta ve uzun püskürtücü kanatlar ile ilaçlamada, düzensiz tarla koşulları, araç hızı değişimi, teker yükü düzensizliği ve ilaç deposunun çalkalanması ve montajlama hatalarından dolayı püskürtücü kanatların yatay konumu ve zemine olan mesafesi değişerek bitkiyi aşırı ilaçlama, eksik bırakma ve dengesiz ilaç dağılımı gibi ilaçlama problemlerinin ortaya çıkmasına sebep olduğu ifade edilmektedir (Lipinski *et al.* 2022; Yan *et al.* 2021). Püskürtücü kanatlar çok parçalı kafes sisteme sahiptirler ve bu parçaların doğru montajlanması esneklik ve dayanım için önem arz etmektedir.

Mekanizasyon kaynaklı tarımsal ilaçlama problemlerin çözümü adına, püskürtücü kanatta ve montaj deliklerinde mekanik ve metalürjik karakterizasyon çalışmalarının yaygınlaşmaya başladığı anlaşılmıştır. Örneğin, Lipinski *et al.* (2022) püskürtücünün üniform ilaçlamaya etkisini incelemişler ve engebeli arazide düşük sıvı akışına sahip püskürtücülerin stabil ilaçlamaya katkı sağladığını ileri sürmektedirler. Bazı çalışmalarda (Benez *et al.* 2016; Cui *et al.* 2019), yaklaşık 12m genişliğe sahip ilaç püskürtücü kanatlar ile yapılan ilaçlama makinelerinde kanat stabilizasyon sisteminin kullanılmadığına yer verilmiştir. İlaçlama sırasında araç sürüş yönündeki eksen etrafında

dikey düzlemde ve yatay düzlemde esneme ve sarsıntı şeklinde kanat hareketleri meydana gelmektedir (Antonis *et al.* 2005). Ayrıca, yatay düzlemdeki sarsıntı ve esneme şeklindeki kanat hareketlerinin daha kritik olduğu ve dikey yöndeki hareketlerin ilave süspansiyon sistemleri ile tolere edilebildiği ileri sürülmektedir. Şekil 2’de dikey ve yatay yöndeki kanat sehimlerini temsili eden şematik gösterilmiştir (Antonis *et al.* 2005).



Şekil 2. Dikey ve yatay yöndeki kanat yer değiştirmelerinin temsili şematığı (Antonis *et al.* 2005).

Geniş kanatlı püskürtmeyle ilaçlama kalitesini etkileyen püskürtücünün bitkiye olan yüksekliğinin; püskürtücü koniklik açısı ile bitkinin boyuna bağlı olduğu ve ideal püskürtücü yüksekliğinin bitki üzerindeki ilaçlama paternini üst üste bindirebilecek mesafe olduğu rapor edilmektedir (Bets and Gordon 2020). Püskürtücülerin yüksekliğini kontrol eden otomatik sistem geliştirirken püskürtücü kanadın maksimum hızının 2m/s ve maksimum hızlanmanın 10m/s² test parametrelerinin nominal limit değerleri olduğu ileri sürülmektedir (Herbst *et al.* 2018). Literatürde (Griffith *et al.* 2012), kanat yüksekliğini kontrol etmek için Hockley İndeksi (H-İndeks) geliştirilmiş ve Eşitlik 1’de verilmiştir. Eşitlik 1’de, B1 toplam ilaçlama süresince püskürtücü kanadın hedeften 635mm altında kaldığı süreyi, B2 381 ila 635mm aralığında hedefin altında kaldığı süreyi, B3 hedeften 127mm aşağıda kaldığı süreyi, B4 kanadın hedefte ve hedefin 127mm üstünde kaldığı süreyi, B5 kanadın hedefin 127 ila 381mm üzerinde kaldığı süreyi, B6 kanadın hedefin 381 ila 635mm üzerinde kaldığı süreyi ve B7 ise kanadın hedefin 635mm üzerinde kaldığı süreyi ifade etmektedir (Griffith *et al.* 2012).

$$H = B1(-1) + B2(0.25) + B3(0.75) + B4(1) + B5(0.75) + B6(0.25) + B7(-1) \quad (1)$$

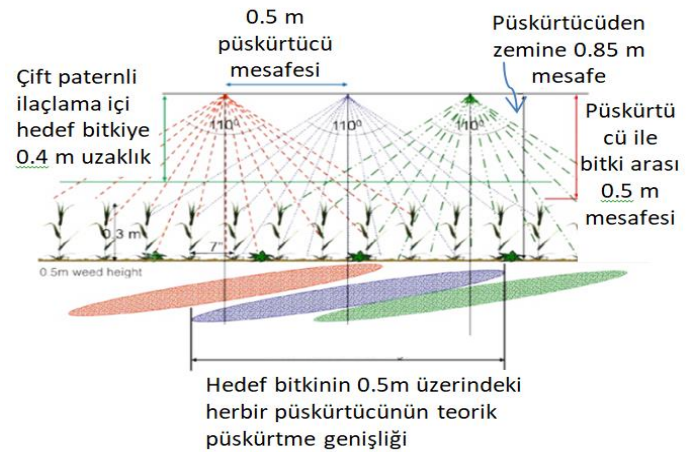
Benzer olarak bir başka araştırmada (Miles, 2018), püskürtme kanadının yüksekliğinin standart

değişimiyle ilgili Eşitlik 2’de verilen teorik hesaplama yönteminden bahsetmektedir. Eşitlik 2’de N gözlemlenen kanat yükseklik sayısını, B_i gözlemlenen mm olarak kanat yüksekliği, $\sigma_s(BH)$ mm olarak gözlemlenen kanat yüksekliğindeki standart değişim, $\mu(BH)$ (Eşitlik 3) mm olarak gözlemlenen kanat yüksekliğinin ortalamasını ifade etmektedir.

$$\sigma_s(BH) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |B_i - \mu(BH)|^2} \quad (2)$$

$$\mu(BH) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_i} \quad (3)$$

İdeal tarım ilaçlama durumu, püskürtücülerin çift ilaçlama paterni (spraying overlap) ve bitki hedefinin üzerinde ideal yükseklik değeri Şekil 3’de gösterilmiştir.



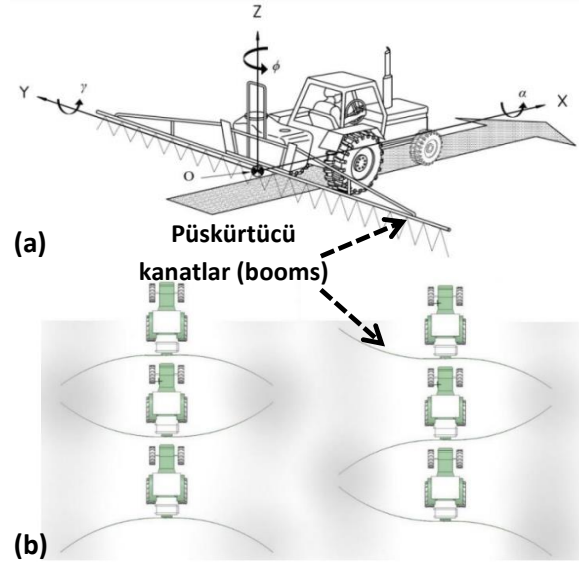
Şekil 3. İdeal tarım ilaçlama durumu, püskürtücülerin çift ilaçlama paterni ve bitki hedefinin üzerinde ideal yüksekliği gösteren şematik (Bets and Gordon 2020)

Şekil 3’de görüleceği üzere, 0.5m aralıklarla dikilen bitkinin 110° koniklik açısına sahip ve 0.5m aralıkla montajlanan püskürtücüler ile verimli ilaçlama için, püskürtücü kanadın zeminden 0.85m yükseklikte olması ve püskürtücülerin bitki yaprak ucundan üst üste bindirmeli hizada (overlap patern) püskürtme için 0.4m ile 0.5m aralığında yukarıda olması tavsiye edilmektedir (Bets and Gordon 2020).

Günümüz mühendislik tasarım ve analiz çalışmaları, prototip imalatı deneme yanılma sayısını ciddi

anlamda azaltmış ve herhangi bir mekanik yapının imalatına kabul edilebilir oranlarda (>80) tahmini veriler elde edilebilir hale gelmiştir. Endüstride mühendislik tasarımları, en yaygın bilinen Autocad, Solidworks, Catia, Pro-Engineering, Fusion ve NX yazılımlara gerçekleştirilirken; tasarımların uygunluğunun analizinde ise sonlu elemanlar tabanlı yaygın bilinen ANSYS, Abaqus, Cutpro, Nastran ve Marc mühendislik programlarının kullanıldığı bilinmektedir. Örneğin; hibrit kompozit yapıların kırılma davranışının belirlenmesinde (Yalçın ve Ergene 2019), kesme işlemlerinin simülasyonunda (Kurt 2009; Zang and Bagchi 1994; Yalçın vd., 2017; Tang and Huang 2011), bazı mekanik parçaların yüke bağlı hasar oluşumunun tahmininde (Yalçın vd., 2019; Mahen 2007) sonlu elemanlar modelleme (FEM) tabanlı programların yaygınca kullanıldığı görülmüştür. Tarım makine tasarımlarının analiz ve optimizasyonunda, FEM analizlerinden yararlanıldığı görülmektedir (Baijing *et al.* 2014; Wu and Miao 2016; Kappaun *et al.* 2021; Ergene ve Bolat 2023). Bu çalışmalarda, ilaçlama püskürtücü kanatların pasif süspansiyon sistemin, modelleme ve analizinde ANSYS programını kullanmış ve neticede püskürtücü kanadın yatay rijitliğinin salınımlı harekete bağlı olduğu ve püskürtücü kanadın yeniden boyutlandırılarak rijitliğin arttırılabileceği ve yeni kanat tasarımlarının ortaya çıktığı belirtilmektedir. Alves (2013), FEM metodunun sürekli sistemlerde gerilme ve gerinim davranışlarını yaklaşık hesaplayan metot olduğunu ifade etmiştir. Engelen (2008) ise, püskürtücü kanatların düşük yapısal sönümlenmeye ve yatay yüksek esnekliğe sahip mekanik yapılar olduğunu, rezonans frekansının düşük ve hızlı olduğunu ve bu rezonansın kritik değerlere ulaşması durumunda kanatta yatay yönde mekanik hasarlara sebep olabileceği ileri sürmektedir. Literatürde (Kappaun *et al.* 2021) genelleştirilmiş koordinat sistemine göre traktör ve püskürtücü kanadın hareketleriyle ilgili gösterim Şekil 4’de verilmiştir. Şekil 4’de görüleceği üzere, ilaçlama sırasında traktörün sağa sola ilerlemesiyle püskürtücü kanatlarda Z eksenı boyunca dikey öteleme hareketi ile birlikte X eksenı etrafında dönme hareketi meydana gelmektedir. Bu hareketlerin özel süspansiyon ve yay mekanizmaları ile önlenemediği ancak ilaçlama sırasında oluşan

salınım hareketlerinin mekanize kanadın tasarımı ve malzeme seçimi ile en aza indirilebileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 4. (a) Genelleştirilmiş koordinat sistemine göre traktör ve püskürtücü kanadın hareketleri, (b) kanatta kırılmaya sebep olan salınım hareketleri (Kappaun *et al.* 2021).

Bu çalışmada, konuyla ilgili literatür araştırması yapıldıktan sonra, tasarım ve imalat tecrübesiyle tarımsal ilaçlama makinelerinde kullanılan X tipi katlanabilen kanatlar ile geleneksel kanatlar tasarlanmıştır. Gerekli malzeme sabitlerine ve belirlenen deplasman değerlerine göre farklı yüklemeler altında statik FEM yapılmıştır. Tasarım farklılığı, püskürtücü kanatlarda oluşan gerilme ve gerinimler mukayese edilerek projeksiyon bilgileri elde edilmiştir.

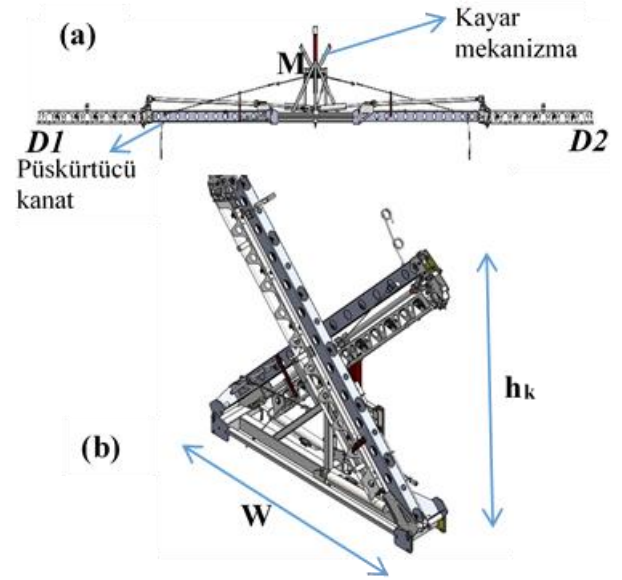
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, çekirir ilaçlama makinesinin X tipi katlanabilen ve geleneksel katlanan olmak üzere iki farklı tasarım Solidworks programıyla modellenmiş olup, tasarım farklılığı ve avantaj ile dezavantajları izah edilmiştir. Akabinde, X tipi ve geleneksel püskürtücü kanatlar literatürde belirtilen (Blaylock 2020) zeminden 0.85m yukarıda yatay pozisyonunda 50mm ve 100mm iki farklı mesafelerde sehım yapacak şekilde yüklemeler altında kanatta oluşan normal ve kayma gerilmeleri ile birlikte gerinim değerleri sonlu elemanlar analizi (FEA) ile tahmin

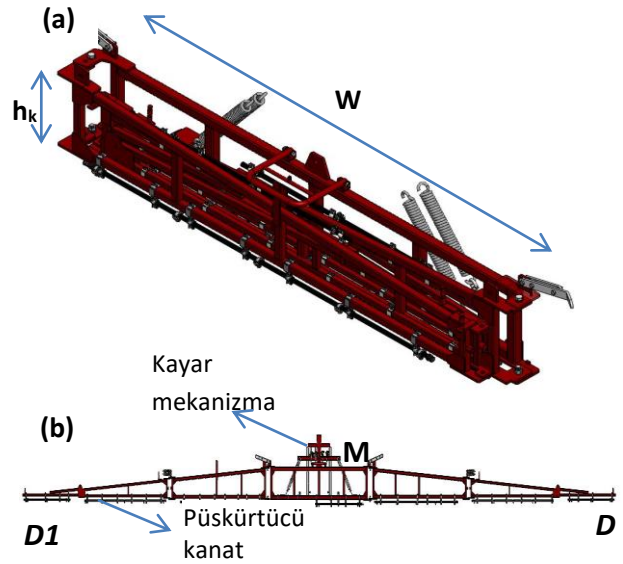
edilmiştir. Sonuçlar yorumlanarak her iki tarımsal ilaçlama kanat sisteminin imalatı için teorik bilgiler elde edilerek prototip imalat gerçekleştirilmiştir.

2.1 Tasarım ve FEA Prosedürü

Tarımsal ilaçlamada kullanılan çekilir makinelerin kanatları, geleneksel ve X tipi katlanır olmak üzere iki şekilde tasarlanmıştır. Şekil 5’de yeni nesil tarımsal ilaçlama makinesinin X tipi katlanabilen kanadın açık ve kapalı pozisyonu, Şekil 6’da ise geleneksel kanadın açık ve kapalı tasarımları verilmiştir. X tipi tarımsal ilaçlama makinesinin kanadı, kayar mekanizmasıyla Y ekeninde aşağı yukarı kayabilen sisteme sahiptir. 12m ve 15m genişlikte tarımsal ilaçlama yapabilen X tipi atlanabilen püskürtücü kanatlar, eğimli arazilerde bitkiye homojen ilaçlama mesafesinin sağlanabilmesi için komplike hidrolik sistemleriyle modernize edilmiştir. 15 m X tipi püskürtücü kanadın kapalı genişliği (W_k) 2541,25mm, kapalı yüksekliği (h_k) 2709mm, açık yüksekliği 1407mm ve ağırlığı 330kg’dır. 12m X tipi kanadın kapalı genişliği 2541mm, kapalı yüksekliği 2709mm, açık yüksekliği 1407mm ve ağırlığı 313kg’dır. 12m geleneksel püskürtücü kanadın kapalı genişliği 2700mm, kapalı yüksekliği 342mm, açık yüksekliği 342mm ve ağırlığı 64kg’dır. 15m geleneksel püskürtücü kanadın ise, kapalı genişliği 2713mm, kapalı yüksekliği 424mm, açık yüksekliği 148mm ve ağırlığı 64kg’dır. Ayrıca, geleneksel kanatların imalatında kutu St37 çelik profil kullanılmıştır. X tipi kanatlarda ise, yine aynı malzemeden sac yarı mamul, kesme, delme, bükme ve kıvrma şekillendirme yöntemleriyle imal edilmiştir. Şekillendirilmiş sac ve kutu profiller kaynaklı bağlantı ile montajlanmıştır. Her iki ilaçlama sisteminde cıvata somun bağlantısıyla ilaçlama makinasına tespit edilmiştir. Tarımsal ilaçlama sırasında oluşan aşırı sehimin absorbe edilebilmesi için, püskürtücü kanatlar uygulama tecrübesine bağlı olarak yay süspansiyon sistemleri ile desteklenmiştir. Tasarımsal çalışmalarda Solidworks, FEA analizlerinde Ansys Workbench mühendislik programları kullanılmıştır.



Şekil 5. Tarımsal ilaçlama makinesi için yeni X tipi katlanabilen püskürtücü kanat tasarımı, a) Kanadın açılmış hali, b) X tipi katlanmış hali.



Şekil 6. Tarımsal ilaçlama makinesi için geleneksel katlanan püskürtücü kanat tasarımı, a) Kanadın katlanmış hali, b) Açık hali.

Literatür araştırmasından sonra (Kappaun *et al.* 2021; Bets and Gordon 2020; Blaylock 2020; Önallar 2022; İtmeç ve Bayat 2017; Koç 2015), belirlenen X tipi katlanan püskürtücü kanadın ve geleneksel püskürtücünün FEA analizleri, ANSYS programı kullanılarak rijid body teorisine göre modellenmiştir. Gerekli malzeme sabitleri; 210 GPa elastisite modülü ve poisson oranı 0.3 olarak, sınır şartları kanadın makine gövdesine montajlandığı deliklerde tüm yönlerde hareket “0” olacak şekilde M noktasındaki montaj deliklerine (Şekil 7-c) silindirik

mesnet uygulanmış ve ilk yükleme koşulu (F1) kanat çırpma hareketi olarak bilinen D1 ve D2 uçtan aynı anda $-Y$ yönünde sırasıyla 50mm ve 100mm yer değiştirme uygulanmıştır. İkinci yükleme koşulunda (F2) ise; çapraz kanat hareketi olarak bilinen kanadın D1 ucundan $+Y$ yönde çapraz yönlü sırasıyla 50mm ve 100mm, eş zamanlı D2 ucundan da $-Y$ yönde sırasıyla 50 mm ve 100mm yer değiştirecek şekilde uygulanmıştır. FEA neticesinde, püskürtücü genişliği boyunca oluşan maksimum von-Mises gerilme ve kayma gerilmesi, ortalama asal gerilme, von-Mises gerinim elde edilmiştir. Kapsamlı yapılan FEA analizleri, Tablo 1’de verilen Taguchi deney tasarım parametreleri ve seviyeleri L8 (2^4) ortogonal dizinde ve 4 faktör 8 analiz sayısı ile yapılmış (Tablo 2) ve elde edilen FEA sonuçları Taguchi analizi yapılarak yorumlanmıştır.

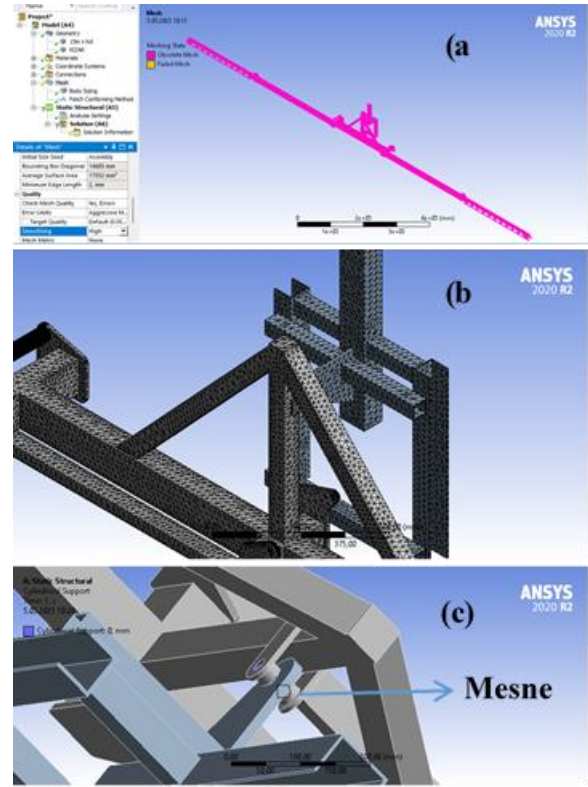
Tablo 1. Taguchi L8 (2^4) deney parametreleri ve seviyeleri.

		Seviyeler	
Parametreler		1	2
A	Kanat Uzunluğu (m)	12	15
B	Yer Değiştirme Miktarı(mm)	50	100
C	Yer Değiştirme Yönü	F1 (Kanat çırpma)	F2 (Çapraz)
D	Kanat Tipi	Geleneksel	X tipi

Tablo 2. Taguchi Ortogonal Dizin Test Tasarımı L8 (2^4).

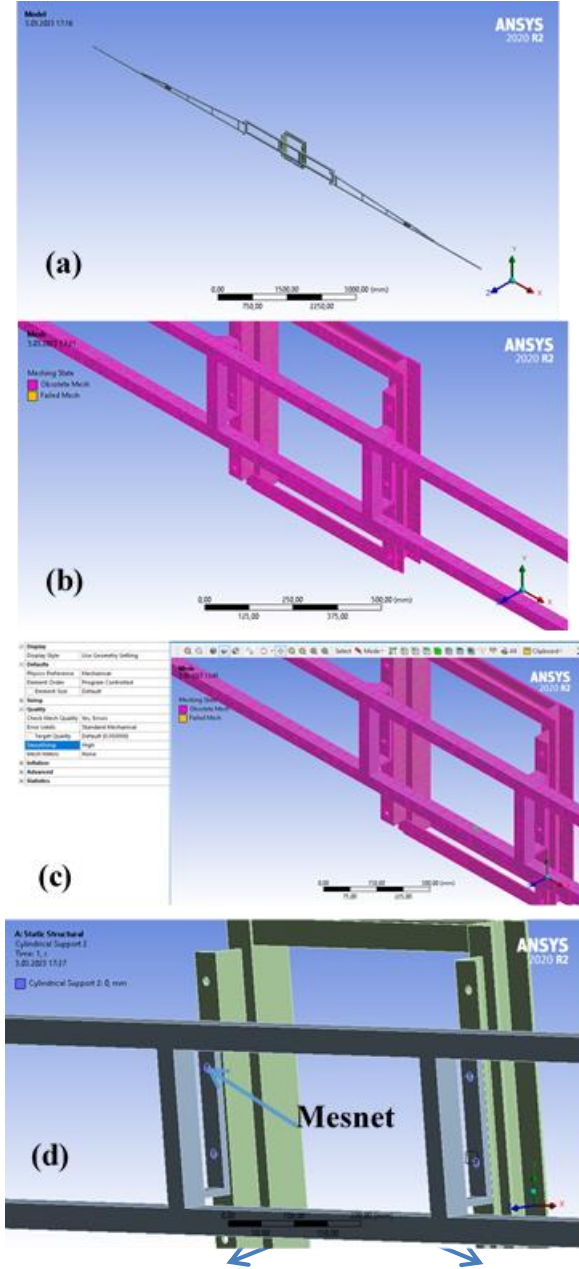
FEA Analiz No	FEA Analiz Koşulları			
	A	B	C	D
1	12	50	1	1
2	12	50	2	2
3	12	100	1	2
4	12	100	2	1
5	15	50	1	2
6	15	50	2	1
7	15	100	1	1
8	15	100	2	2

Sonlu elemanlar analizinde ANSYS 2020 Workbench mühendislik programı, sonuçların Taguchi analizinde Minitab programı kullanılmıştır. Taguchi analizi ile girdi parametrelerin sonuçlara etkisi, elde edilmiştir. FEA analizlerde, tetrahedral üçgen elemen tipi seçilmiş ve yüksel kalitede mesh yapılmıştır. Şekil 7’ de, 15m uzunluğa sahip X tipi katlanabilen ilaç püskürtücü kanadın sonlu elemanlar modeli, mesh görüntüsü, ve mesnet durumu gösterilmiştir.



Şekil 7. a) Tarımsal ilaçlama makinesinin 15m X tipi katlanabilen püskürtücü kanatın FEA modeli, b) Uygulanan yüksek mesh kalitesi, c) Silindirik mesnet uygulanan montaj delikleri.

Element boyutu beş farklı (1-20mm aralığında) büyüklükte deneme yapılarak sonuçları ihmal edilebilecek düzeyde etkileyen element boyutu seçilmiştir. İlaç püskürtücü kanat için element kenar uzunluğu 5mm ve kayar mekanizması için 10mm belirlenmiştir. 10m ve 15m geleneksel kanatların FEA’de sırasıyla 159032 ve 238548 adet element, 318064 ve 477096 node elde edilmiştir. 10m ve 15m X tipi katlanır kanatların FEA’de sırasıyla 159032 ve 280397 adet element, 373597 ve 560296 node elde edilmiştir. Mesh kalitesini arttırmak için, standart mekanik (standart mechanical) ve yüksek hassasiyet (yüksek smooting) modları açık otomatik metot kullanılmıştır. Malzeme olarak, kanadın imalatında kullanılan St37 sınıfındaki çelik malzeme seçilmiştir.



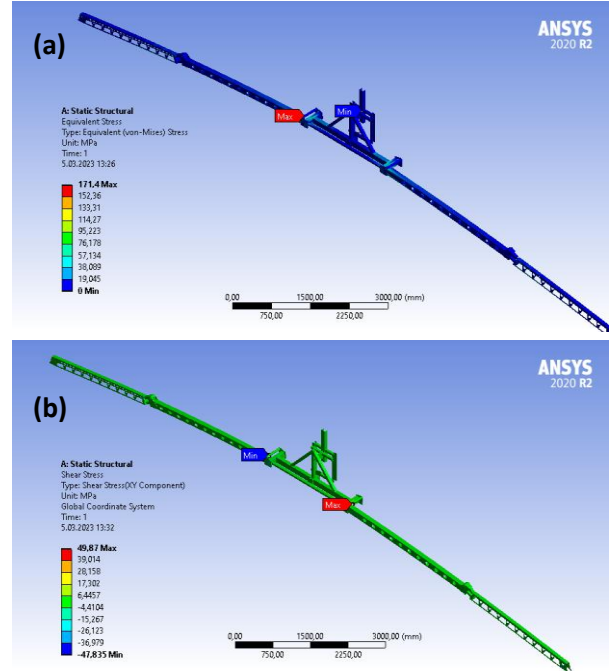
Şekil 8. a) 12m tarımsal ilaçlama makinesi püskürtücü kanatın FEA modeli, b ve c) Uygulanan yüksek mesh kalitesi, d) Silindirik mesnet uygulanan montaj delikleri.

2. FEA Sonuçları

2.1 Tasarım Farklılığın Değerlendirilmesi

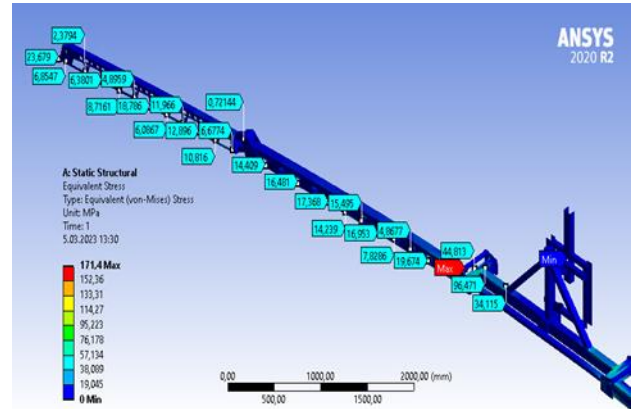
Aynı şartlarda yapılan FEA’de, gerilme ve gerinim sonuçlarının püskürtücü kanadın tasarımına, yer değiştirme tipine ve şiddetine, kanadın uzunluğuna bağlı olarak değiştiği görülmüştür. FEA sonuçlarından seçilen 4 adet sonlu elemanlar analizlerinin sonuçları Şekil 9 ve Şekil 16 arasında

verilerek yorumlanmıştır. Şekil 9’da 15m genişliğe sahip X tipi katlanan tarımsal ilaç püskürtücü kanat çırpma denilen her iki uçtan –Y yönünde 50mm deplasmana sebep olan F1 yüklemesi altında (5 nolu FEA analiz) meydana gelen bileşke von-Mises gerilme ve kayma gerilmesi dağılımı verilmiştir.



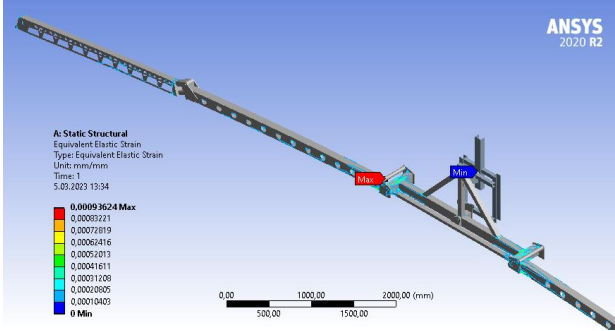
Şekil 9. 15m X tipi katlanan tarımsal ilaç püskürtücü kanadın her iki ucundan -50mm deplasman sonucu a) Bileşke von-Mises gerilme ve b) Kayma gerilmesi dağılımı (5 nolu FEA analiz).

Şekil 9’da görüleceği üzere, püskürtücü kanadın katlandığı mafsalda 171.4 MPa maksimum bileşke gerilme ile birlikte aynı mafsalda –47.835 MPa kayma gerilmesi meydana gelmiştir.



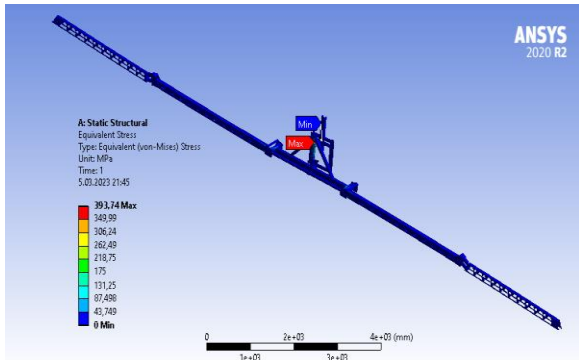
Şekil 10. 15m X tipi katlanan von-Mises bileşke gerilmenin kanat üzerinde dağılımı.

Karmaşık ve ince kesitli saçtan imal edilmiş püskürtücü kanadın bünyesinde 0 ila 40 MPa aralığında von-Mises gerilme konsantre olmuştur (Şekil 10). Ayrıca kanadın ince kesitli bölgelerinde oluşan kayma gerilmesinin -4.4 MPa ila 6.6 MPa arasında olduğu anlaşılmıştır. Şekil 11’de ise püskürtücü kanatta oluşan gerinim akışı gösterilmektedir.



Şekil 11. 15m genişliğe sahip X tipi katlanan von-Mises bileşke gerinimin kanat üzerinde dağılımı.

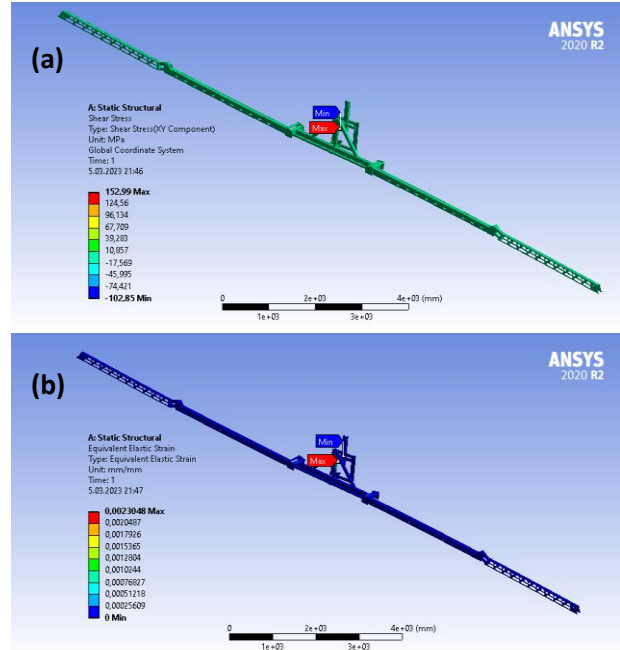
Şekil 11’e göre maksimum gerinim kanadın katlandığı mafsalda $\%0.09221$ mertebesinde gerçekleşmiş ve kanadın diğer kesitlerinde ortalama $\%0.020805$ gerinim oluşmuştur. Kanadın genelinde oluşan gerinimin, mafsal bağlantısında oluşan gerinimden 4.6 kat daha düşük değerde olduğu saptanmıştır. Benzer şekilde püskürtücü kanadın ince kesitli ve tarım ilacı püskürtme memelerinin montajlı olduğu bölgelerdeki kayma gerilmesinin, kanadın katlandığı mafsalda oluşan erilmesinde yaklaşık 9 kat düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 12’de, 8 numaralı analize ait gerilme analizi verilmiştir.



Şekil 12. 15m genişliğe sahip X tipi katlanır kanadın çapraz yükleme (F2) ile von-Mises bileşke gerilme dağılımı (8 numaralı FEA).

Şekil 12’de görüleceği üzere, 15m uzunluğa ve X tipi katlanan kanadın bir ucundan $-Y$ yönünde 100mm ve diğer ucundan $+Y$ yönünde 100mm çapraz yer değiştirmesi sonucu oluşan yükleme altında, maksimum bileşke gerilme kanatta değil de, kanadın ilaçlama makinesine montajlandığı kayar mekanizmada 393.74 MPa şiddetinde meydana gelmiştir. Montaj konstrüksiyona göre daha karmaşık ve ince kesitli kanatta ise 0 ila 87 MPa von-Mises bileşke gerilme görülmüştür. Çapraz yükleme durumunda, montaj konstrüksiyonda 152.99 MPa maksimum kayma gerilmesi görülmüştür. Kanat gövdesinde de, -12.54 MPa ile $38,26$ MPa arasında değişen kayma gerilmesi elde edilmiştir. Bu durum Şekil 13-a’da gösterilmiştir. Şekil 13-b ise $\%0.23$ gerinimin yine kanadın tarımsal ilaçlama makinesine montajlandığı yatağa yakın bölgede meydana geldiğini göstermektedir.

Şekil 13. 15m genişliğe sahip X tipi katlanan kanadın

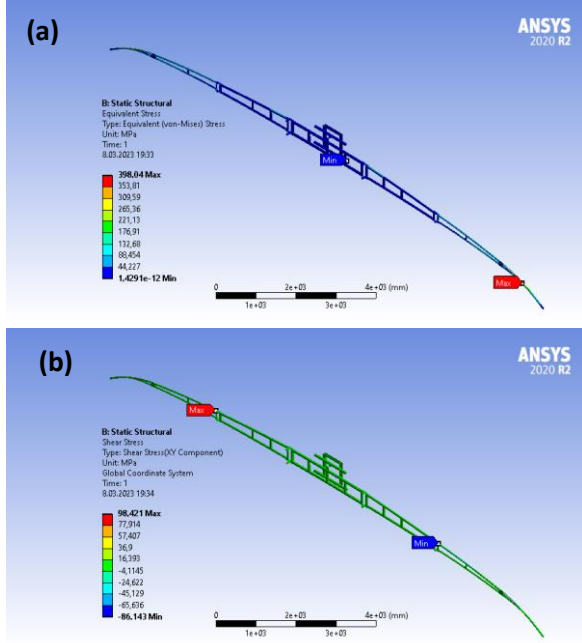


çapraz yükleme sonucu a) kayma gerilmesi dağılımı, b) von-Mises bileşke gerinimin kanat üzerinde dağılımı.

Yeni X tipi katlanan tarımsal ilaç püskürtücü kanadın $-Y$ eksenini boyunca aşağı yönlü salınım hareketinde meydana gerilme ve gerinimlerin kanat mafsalı üzerinde konsantre olurken, X eksenine göre çapraz salınım hareketiyle oluşan gerilme ve gerinimler kanadın montaj deliğine yakın bölgede yoğunlaşmıştır. Bu durum, kanat çırpma hareketi

olarak ta adlandırılan F1 yükleme durumunun kanadın mafsallarını zorladığı ve -Y yönünde deplasmanın artmasına karşı önlem alınması gerektiği ile ilgili ön bilgi vermektedir. Şekil 14'de 15m uzunluğa sahip geleneksel katlanan püskürtücüdeki von-Mises bileşke gerilme ve kayma gerilmesi dağılımı (7 nolu FEA) verilmiştir.

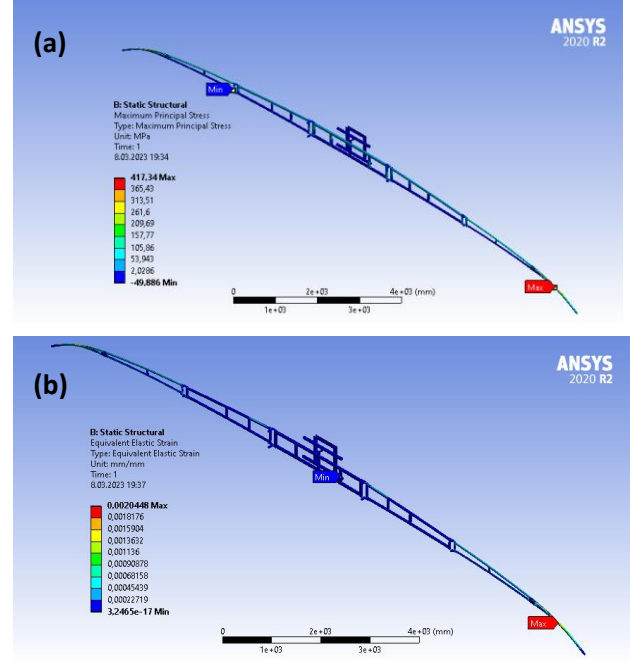
Şekil 14. a) 15m uzunluğa sahip ve geleneksel katlanan kanatta F1 yükleme ile oluşan



von-Mises bileşke gerilme dağılımı, b) Kayma gerilmesi dağılımı (7 nolu FEA).

Şekil 14-a'da görüleceği üzere, 398,04 MPa maksimum bileşke gerilme kanadın uca yapın profil bağlantısında meydana gelmiştir. Benzer olarak, aynı profil bağlantısının olduğu yerde 98.421 MPa maksimum kayma gerilmesi görülmüştür. Bu sonuç, konvansiyonel katlanan püskürtücü kanadın daha fazla risk altında çalıştığı ve kanatta oluşan maksimum asal gerilmenin ise kanadın ucuna daha yakın profilin kaynak bağlantısında yoğunlaşması ile desteklenmektedir. Bu durum Şekil 15-a'da görülmektedir. Benzer olarak, maksimum gerininin %0.20448 mertebesinde kanadın uç bölgesine yakın profil bağlantısında lokalize olduğu Şekil 15-b'de görülmektedir. Ayrıca, Şekil 14'e göre, kanadın genel yapısında 44 MPa ile 132 MPa arasında değişen bileşke gerilme ile birlikte -24 MPa ile 16 MPa arasında değişen kayma gerilmesinin meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu gerilme değerlerinin X

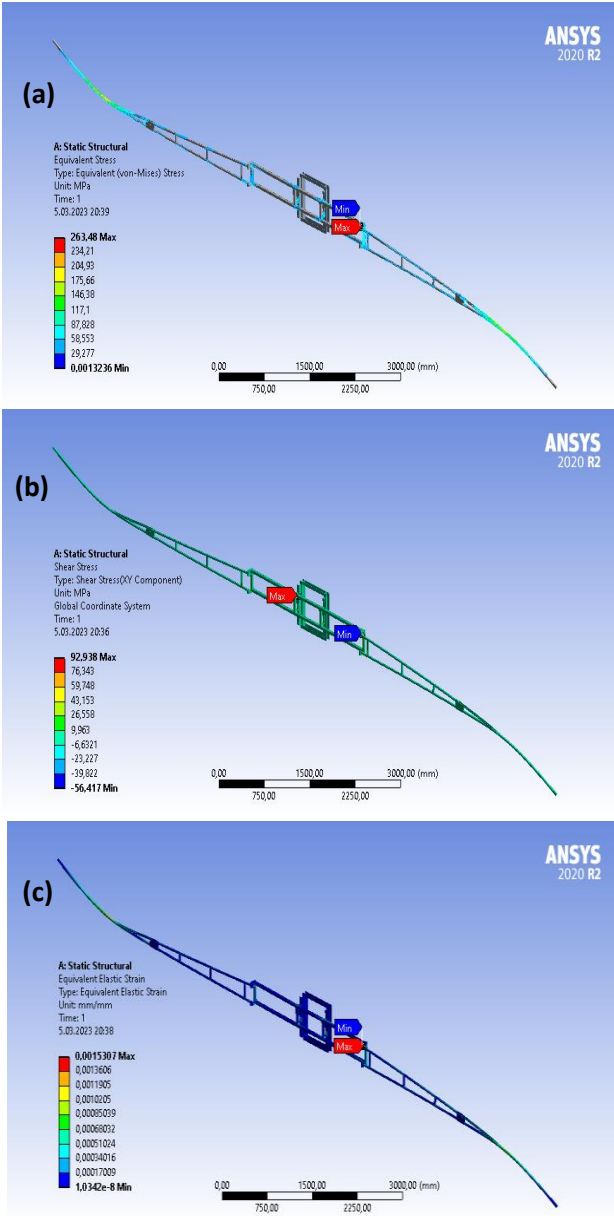
tipi katlanabilen yeni püskürtücü kanatta oluşan gerilme değerlerinden daha büyük olduğu saptanmıştır. Bunun nedeni, geleneksel katlanan püskürtücü kanatta çelik profil kullanılmış, diğer yandan, X tipi kanadın imalatında profil yerine hafifleştirilmiş delme ve bükme uygulanmış topolojik tasarıma sahip çelik sac kullanılmıştır bu da kanattaki gerilme değerlerinin düşmesine katkı sağlamıştır.



Şekil 15. a) 15m uzunluğa sahip ve geleneksel katlanan kanatta F1 yükleme ile oluşan maksimum asal gerilme dağılımı, b) Kayma gerilmesi dağılımı.

Şekil 16'da 12m genişliğe sahip geleneksel katlanan kanadın $\pm 100mm$ çapraz salınımına sebep olan F tipinde yükleme durumunda elde edilen von-Mises bileşke gerilme ve kayma gerilmesi sonucu verilmiştir. Şekil 16-a'da görüleceği üzere, 263.48 MPa maksimum bileşke gerilmenin kanat profil birleşiminde ve uç bölgelerdeki profillerde de maksimum gerilmeye yakın değerde gerilme meydana gelmiştir. Kanat genişliğinde, 0 ile 90 MPa arasında değişen von-Mises bileşke gerilme görülmüştür. Bununla birlikte, kanat gövdesinin profil birleşiminde 92.938 MPa maksimum kayma gerilmesi (Şekil 16-b), ve kanat gövdesinin genelinde de yaklaşık -6 MPa ile 26 MPa arasında değişen kayma gerilmesi görülmüştür. Bu gerilme değerlerinin aynı bağlantıda, %0.15307 maksimum

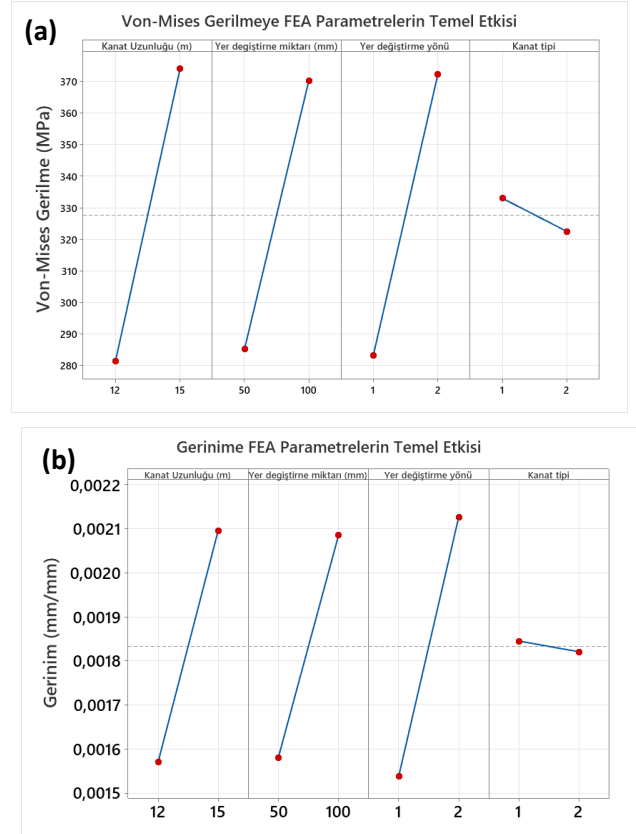
gerinime sebep olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum Şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16. a) 12m geleneksel katlanan kanadın $\pm 100mm$ çapraz yükleme (F2) sonucu elde edilen von-Mises bileşke gerilme, b) Kayma gerilmesi, c) von-Mises bileşke gerinim (7 nolu FEA).

Taguchi deney tasarımına (Tablo 2) göre yapılan sekiz adet (L8) sonlu elamanlar analizinde; 32 adet gerilme ve gerinim sonucu elde edilmiş olup, bu sonuçların tümü Taguchi analizi yapılarak yorumlanmıştır. Taguchi analizlerinde; Tablo 1'de verilen parametreler girdi parametresi olarak, kanatta elde edilen maksimum von-Mises bileşke gerilme, maksimum von-Mises bileşke gerinim,

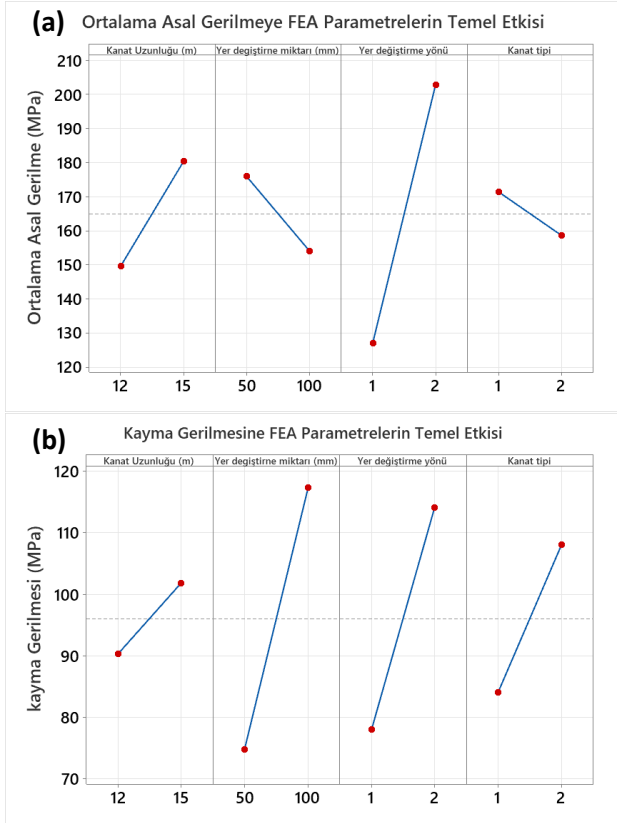
maksimum kayma gerilmesi ve ortalama asal gerilme çıktı olarak tanımlanmıştır. Yapılan Taguchi analizinde en küçük gerilme en küçük gerinim ve kanat dışı gerilme konsantrasyonu en iyi sonuç olarak seçilmiş ve çıktı parametrelerine girdi parametrelerinin etkisi tayin edilmeye çalışılmıştır. Şekil 17 ve Şekil 18'de de tarımsal ilaçlama makinesinin iki farklı püskürtücü kanadının FEA sonuçlarının Taguchi analiz sonuçları verilmektedir.



Şekil 17. a) FEA analiz parametrelerinin von-Mises bileşke gerilmeye etkisi, b) von-Mises bileşke gerinime etkisi.

Şekil 17-a'ya göre, kanat uzunluğu 12m'den 15m'ye arttırıldığında, çapraz yer değiştirme değeri $\pm 100mm$ olması durumunda von-Mises bileşke gerilme belirgin olarak artarken, kanat tasarımının X tipi katlanabilen olması durumunda da bileşke gerilmeye nispeten azalma eğilimi görülmüştür. Bileşke gerilmeyi kanat uzunluğu parametresi en fazla etkileyen değişken olmuştur. Kanat tipinin von-Mises bileşke gerinime etkisi çok daha düşük elde edilmiştir. Bileşke gerinime en büyük etki çapraz yükleme koşullarında görülmüştür. Şekil 18 püskürtücü kanatta oluşan ortalama asal gerilme ve

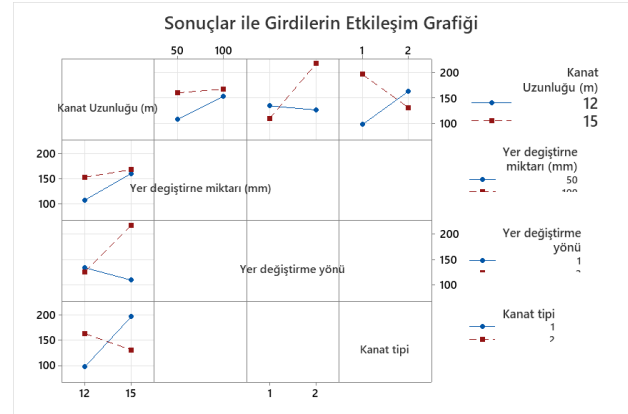
kayma gerilmesi üzerine FEA girdi parametrelerinin etkisini göstermektedir.



Şekil 18. Püskürtücü kanatta oluşan ortalama asal gerilme ve kayma gerilmesi üzerine FEA girdi parametrelerinin etkisi

Şekil 18-a'da göre, ortalama asal gerilme yer değiştirmenin çapraz salınımlı olması durumunda belirgin bir şekilde artarken, X tipi kanatta oluşan asal gerilme düşüş eğilimindedir. Kanat uzunluğu, asal gerilmeyi yer değiştirme parametresinden sonra ikinci etkileyen parametre olmuştur. X tipi kanat tasarımı kayma gerilmesinin artmasına sebep olmuş, bunun nedeni kanatın imalatında şekillendirilmiş sacın kullanılması olarak değerlendirilmiştir. Ancak, bu artışın oluşan maksimum kayma gerilmesi bakımından kanadın dışında kayar mekanizmada yoğunlaştığı, kanadın genelindeki kayma gerilmesinin maksimum kayma gerilmesinden on kat daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 9). Kayma gerilmesinin, çapraz yüklemeye (F2) ± 100 mm deplasman sonucu en fazla artış eğiliminde olduğu Şekil 18-b'den anlaşılmaktadır. Taguchi analizlerinde S/N grafikleri girdi parametrelerinin çıktılara somut etkisini ve en

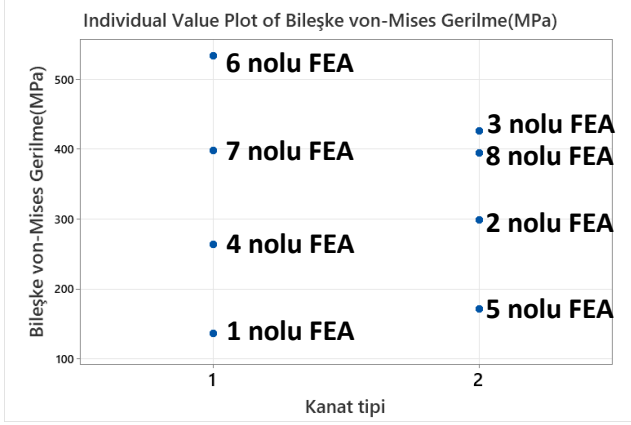
iyi koşulun tayini için önem arz etmektedir. Yapılan Taguchi analizinde, S/N grafikleri sonuçların en küçük değeri en iyi (smaller is better) yaklaşımına göre belirlenmiş ve Şekil 19'da verilmiştir.



Şekil 19. FEA analiz parametrelerinin sonuçlarla etkileşimiyle ilgili S/N grafikleri

Tüm gerilme ve gerinim sonuçları en düşük en iyi yaklaşımına göre yapılan Taguchi analizinde, çapraz yüklem durumu, yer değiştirme ± 50 mm'den ± 100 mm'ye artması halinde kanadın dışında kayar mekanizmada daha düşük gerilme konsantrasyonu elde edilmiş ve 12m X tipi katlanır kanat avantaj sergilemiştir. Öte yandan, ilaçlama genişliğini belirleyen kanat uzunluğu 15m'ye artırılması durumunda geleneksel kanat tipinin avantajlı hale geldiği yorumlanmıştır. Koç (2015)'un yaptığı çalışmada, alüminyum tarımsal ilaçlama makinesi kanatlarında 27mm toplam deformasyona karşılık 189 MPa bileşke gerilme; çelik kanatlarda 19mm deformasyona karşılık 399.67 MPa bileşke gerilme elde etmiştir. Manea *et al.* (2018), değişik yapıya sahip tarımsal ilaçlama püskürtücü kanatların mekanik performanslarını Ansys programıyla analiz etmişlerdir. Rijit body teorisi kullanılarak yapılan lineer statik analizleri sonucunda, 7mm deplasmana karşı 229 MPa bileşke gerilme elde etmişlerdir. Bu çalışmada, geliştirilen yeni X tipi katlanır püskürtücü gövdesinde -Y yönünde 50mm deplasmana karşılık 171,4 MPa bileşke gerilme elde edilmiştir. Dudda (2018), Ansys ile tarımsal ilaçlama püskürtücülerinin dayanım analizini gerçekleştirmiştir. Kutu profillerden oluşturulan kanadın FEA' de 24mm deplasmana karşı 148 MPa maksimum gerilmeyi elde ettiğini rapor etmiştir. Bu çalışmada, kutu profil ve şekillendirilmiş sacdan tasarlanan iki farklı

tarımsal ilaçlama püskürtücü kanatlarında daha yüksek deplasman değerleri ve iki farklı yükleme tipinin gerilme ve gerinime etkisi detaylıca araştırılmıştır. Sekiz farklı FEA ile elde edilen von-Mises bileşke gerilme sonucu Şekil 20’de verilmiştir.



Şekil 20. Taguchi L8’e göre yapılan FEA’de kanatlarda meydana gelen von-Mises bileşke gerilme değerleri.

3. Sonuçlar

Tarımsal ilaçlama makinelerinde yaygın kullanılan geleneksel katlanabilen ilaç püskürtücü kanatlar ve X tipi katlanır tasarlanan püskürtücü kanatlara, kanat çırpma koşulu (F1 yükleme) ve çapraz hareket koşulu (F2 yükleme) ile yapılan FEA analizinde aşağıda sıralanan sonuçlar elde edilmiştir:

- 1. FEA’ de, geleneksel katlanan kanatta 137.29 MPa von-Mises bileşke gerilme ve –Y yönde her iki uçta 50mm deplasman (F1) ile meydana gelmiştir. 1.8 güvenlik faktörü elde edilmiştir. 5. FEA’ de, X tipi kanatta 171.4 MPa von-Mises bileşke gerilme ve –Y yönde her iki uçta 50mm deplasman (F1) ile meydana gelmiştir ve güvenlik faktörü 1.45’dir. Bu sonucun, literatürde belirtilen (Manea *et al.* 2018; Dudda 2018), kanat tasarımı FEA analiz sonuçlarından daha iyi olduğu anlaşılmıştır.
- X tipi katlanabilen kanatta oluşan bileşke gerilme ve gerinim, ortalama gerilme; geleneksel kanatta oluşan sonuçlara göre düşüş eğilimindedir. Ancak, X tipi kanat şekillendirilmiş saçtan imal edildiği için kayma gerilmesi nispeten artış eğiliminde olmuştur.

- 12m’den daha geniş X tipi püskürtücü kanadın 50mm’den daha fazla çapraz ve kanat çırpma ihtimaline karşın, püskürtücü kanadın kayar mekanizma ile bir zincir tarafından desteklenmesi ve püskürtücünün makine gövdesine montajında $\pm Y$ eksenince oynar yatak kullanılması önerilebilir ve böylece efektif ilaçlama genişliğinin artırılabilceği düşünülmektedir.
- FEA analizlerinde elde edilen maksimum gerilme geleneksel kanatların gövdesinde oluşurken, X tipi kanatlarda ise kayar mekanizmada yoğunlaşmıştır. Bu durumun, X tipi katlanabilen püskürtücü kanatları tarımsal ilaçlama sırasında daha yüksek rijit davranış ile avantajlı hale getireceği düşünülmektedir.
- X tipi kanatta oluşan gerilmenin, kayar mekanizmada lokalize olan maksimum bileşke gerilmeden 4.6 kat daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 10). Geleneksel kanadı oluşturan kutu profillerin kaynaklı birleşim bölgelerinde, X tipinden daha yüksek bileşke gerilme yoğunlaşmıştır. Bu durumun, geleneksel kanatlara uygulanan kaynak kalitesinin artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Bu yayın, Önallar Tarım Makineleri A.Ş. firmasının ONAL-T-2022-005 nolu Tasarım Merkezi projesinden üretilmiştir. Yazarlar, katkılarından dolayı Önallar firmasına teşekkür etmektedirler.

4. Kaynaklar

- Alves A.F., 2013. Finite elements. The basis of CAE technology. São Paulo, 6 ed.
- Baijing, Q., Ning, Y., Xichao, X., Xianping, G., Chundun, W., 2014. Ideal spray boom response extraction with front and rear tires excited by step track. *Trans. Chin. Soc. Agric. Mach.*, **2**, 55–60.
- Benez, R.C., Antuniassi, U.R., Chechetto, R.G., Motta, A.A.B., Carvalho, F.K., 2016. Behavior of a sprayer boom stabilization system in vertical and horizontal movements, *Energia na Agricultura*, **31** (1), 1–9.

- Bisesi, M. and Koren, H., 2003. Handbook of environmental health: Biological, chemical, and physical agents of environmentally related disease. CRC press Boca Raton, New York, 824.
- Blaylock K.R., 2020. Active air spring control as a method of agricultural sprayer boom system suspension, Iowa State University, Master Theses, Agricultural and Biosystems Engineering, USA, 62.
- Cui, L.F., Xue, X.Y., Ding, S.M., Le, F.X., 2019. Development of a DSP-based electronic control system for the active spray boom suspension. *Comput. Electron. Agric.*, **166**, 105024.
- Cui, L., Xue, X., Ding, B. Qiao, Le, F., 2017. Analysis and test of dynamic characteristics of large spraying boom and pendulum suspension damping System. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.* **33 (9)**, 61–68.
- Dudda, W., 2018. Strength analysis of a boom sprayer with the use of CAD/CAE systems. *Mechanik*, **91 (7)**, 549–551.
- Engelen, K., 2008 Passive damping of flexible spray boom structures. Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Faculteit Ingenieurswetenschappen.
- Ergene, B., Bolat, Ç., 2023. Simulation of Fused Deposition Modeling of Glass Fiber Reinforced ABS Impact Samples: The Effect of Fiber Ratio, Infill Rate, and Infill Pattern on Warpage and Residual Stresses. *Hittite Journal of Science and Engineering*, **10 (1)**, 21–31.
- Gil, E., and Badiola, J., 2007. Design and verification of a portable vertical patternator for vineyard sprayer calibration. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, **23 (1)**, 35–42.
- Graham Betts and Bill Gordon, 2020. Boom stability and height control: the importance of design and control, Grain Research Development Corporation, Australia, 24.
- Griffith, J., Strelieff, B., & Schnaider, J., 2012. The Hockley Index. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. doi:10.13031/2013.41775.
- Herbst, A., Osteroth, H.J., Stendel, H., 2018. A novel method for testing automatic systems for controlling the spray boom height. *Biosystems Engineering*, **174**, 115–125.
- Ilica, A., Boz, A.F., 2018. Design of a nozzle-height control system using a permanent magnet tubular linear synchronous motor. *Tarım Bilimleri Dergisi*, **24**, 374–385.
- İtmeç, M., ve Bayat, A., 2017. Comparison of boom design parameters of three different tractor mounted domestically manufactured field crop sprayer booms. *Journal of Agricultural Machinery Science*, **13 (2)**, 99–105.
- Jeon, H.Y., Womac, A.R., Gunn, J., 2004. Sprayer boom dynamic effects on application uniformity. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **47(3)**, 647–658.
- Jing, L., Wei, X., 2023. Spray deposition and distribution on rice as affected by a boom sprayer with a canopy-opening Device. *Agriculture*, **13**, 94. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010094>
- Kappaun, R., de Meira Junio, A.D., Walber, M., 2021. Parameters for Modelling Passive Suspensions of Spray Bars. *Engenharia Agrícola*, **41 (3)**, 368–378.
- Koç, C., 2015. Structural analysis of field sprayer booms. *Tarım bilimleri Dergisi*, **23**, 147–155.
- Kurt, A., 2009, Modelling of the cutting tool stresses in machining of Inconel 718 using artificial neural networks. *Expert Syst Appl*, **36(6)**, 9645–9657
- Lipinski, A.J., Lipinski, S., Burg, P., Sobotka, S.M., 2022. Influence of the instability of the field crop sprayer boom on the spraying uniformity. *Journal of Agriculture and Food Research*, **10**, 10432.
- Langenakens, J.J., Clijmans, L., Ramon, H., De Baerdemaeker, J., 1999. The effects of vertical sprayer boom movements on the uniformity of spray distribution. *J. Agric. Eng. Res.*, **74 (3)**, 281–291.
- Mahendran, M., 2007. Applications of finite element analysis in structural engineering: In Siva Prasad, N. and Sekar, A.S. and Krishnapillai, S., Eds. Proceedings International Conference on Computer Aided Engineering, India, 38–46,

- Manea, D., Gidea, M., Marin, E., Mateescu, M., 2018. Simulation of mechanical parameters of sprayer boom. *Engineering for Ryal Development*, **23**, 45-53.
- Miles, L.T., 2018. Developing general procedure to quantitatively analyze boom height control performance on self-propelled agricultural sprayers. Iowa State University, Agricultural Engineering, Graduate Thesis, USA, 86.
- Önallar, 2022. Agricultural spreysers, Erişim: <https://onallar.com.tr/#0> (12.03.2023).
- Tang, L., Huang, J., Xie, L., 2011. Finite element modeling and simulation in dry hard orthogonal cutting AISI D2 tool steel with CBN cutting tool. *Int J Adv Manuf Technol.*, **53**, 1167–1181.
- Yan, J., Xue, X., Cui, L., Ding, S., Gu, W., Le, F., 2021. Analysis of dynamic behavior of spray boom under step excitation. *Appl. Sci.*, **11**, 10129.
- Wu, J., Miao, Y., 2016. Dynamic characteristic analysis of boom for wide sprayer with different exciting sources. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, **28**, 39–44.
- Yalçın, B. , Ergene, B. & Nar, S. 2019. 1.2367 takım çeliğinden imal edilmiş enjeksiyon yolluk burcunda hasar analizi ve geometrik tasarımda iyileştirme ile hasarı önleme. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, **11 (3)**, 137-146.
- Yalçın, B., Yılmaz, N., Kurt, A., 2018. Tool stresses in soft and hard finish turning with low content CBN tool by finite elements analysis. *ACTA Physica Polonica A*, **134 (1)**, 48-56.
- Zang, B., Bagchi, A., 1994. Finite element simulation of chip formation and comparison with machining experiment. *J Eng Ind.*, **116**, 289–297.
- Zhuang, T., Yang, X., Dong, X., Zhang, T., Yan, H., Sun, X., 2018. Research status and development trend of large self-propelled sprayer booms. *Trans. Chin. Soc. Agric.*, **49**, 189–198.