

Bir Uçağın Burun İniş Takımı Parçasının Yapısal Analizi ve Malzeme Seçimi

Emre ŞAHİN^{1*}, Cengiz ELDEM¹

¹Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Geliş: 12.06.2024, Kabul: 02.08.2024, Yayınlanma: 04.10.2024

ÖZ

Bir hava aracının iniş takımı en önemli parçalarından birisidir. Uçağın iniş anında uçak üzerindeki yükleri dengelemesi, tekerleri aracılığıyla darbeleri sönmüleyip, uçağın güvenli bir şekilde yere inip taksi yapabilmesi için gerekli görev elemanlarının başında gelmektedir. İniş takımları bir uçağın ömrü boyunca en çok yüke maruz kalacak parçalarından birisidir. Düşük hacim, yüksek dayanım, uzun ömür ve iyi performans sağlayabilmesi için doğru analiz edilmiş ve tasarlanmış olması gerekmektedir. İniş takımları burun iniş takımı ve ana iniş takımları olmak üzere ikiye ayrılır. İniş takımları tipine göre farklı alt parçalardan meydana gelmektedir. Bu çalışmada CATIA V5 programında tasarlanan burun iniş takımı parçalarından olan tork iletim parçası için farklı malzemelerdeki dayanımı hesaplanan yükler ile analiz edilmiş olup sonuçlardaki farklılıklar incelenmiştir. ANSYS Workbench programında tamamlanan analiz çalışmasında farklı malzemeler kullanıldığında oluşan gerilme ve deformasyon sonuçları karşılaştırılarak tasarım için uygun olan malzemeler belirlenmiştir. Analizlerde PH13-8 Mo çeliği, Titanyum Ti-6Al-4V, Alüminyum 7075 alaşımı, 15-5 PH çeliği ve AISI 4340 çelik malzemeleri kullanılarak elde edilen sonuçlardaki deformasyon ve gerilme değerleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Burun İniş Takımı; Statik Analiz; Deformasyon; ANSYS, Yapısal Malzemeler

Structural Analysis and Material Selection of Nose Landing Gear Part of an Aircraft

ABSTRACT

The landing gear of an aircraft is one of its most crucial components. It plays a vital role in balancing the loads on the aircraft during landing, absorbing shocks through its wheels, and enabling the aircraft to safely touch down and taxi. Landing gear is one of the components that undergoes the highest levels of stress throughout an aircraft's lifespan. To ensure low volume, high strength, long lifespan, and optimal performance, it must be accurately analyzed and designed. Landing gear is typically divided into nose landing gear and main landing gear, each composed of various sub-components depending on the type of landing gear. In this study, tork link parts of the nose landing gear, designed in the CATIA V5 program, was analyzed using loads calculated for different materials, and the differences in results were examined. In the analysis completed in the ANSYS Workbench program, stress and deformation results under different material conditions were compared to determine suitable materials for design. Materials including PH13-8 Mo steel, Titanium Ti-6Al-4V, Aluminum 7075 alloy, 15-5 PH steel, and AISI 4340 steel were used in the analysis, and displacement and stress values were examined.

Keywords: Nose Landing Gear; Static Analysis; Deformation; ANSYS, Structural Materials

1. GİRİŞ

Günümüzde havacılık endüstrisi sürekli olarak gelişmekte ve yenilikçi teknolojilerle donatılmış uçaklar, daha güvenli ve verimli seyahat imkanı sunmaktadır. Bu teknolojilerden biri de iniş takımlarıdır. Uçakların temel parçalarından birisi olan iniş takımları mekanik bir sistemdir. Bu sistem uçakların iniş ve kalkış sırasında statik ve dinamik yüklere maruz kalmaktadır. Bu sebepten iniş takımı parçaları bu yükleri karşılayabilecek kadar sağlam olmalıdır. İniş takımları bu yükleri karşılayamaz ise uçakta felakete sebebiyet verecek yapısal hasarlar meydana gelebilecektir. Bu nedenle iniş takımı tasarımı ve malzeme seçimi oldukça önemlidir (Yaylacı, 2021).

İniş takımı tasarımı uçağın kullanım amacına, uçak tipine, ağırlığına göre değişmektedir. Tasarım sürecinde iniş takımı için minimum ağırlık, maksimum dayanım, yüksek ömür, düşük maliyet hedeflenmektedir. İniş takımı tasarımının en önemli kriteri yüksek dayanım, minimum ağırlıktır. Bir uçağın önemli parçalarından birisi olan iniş takımı ağırlık yönünden uçak üzerinden büyük paya sahiptir. Bu nedenle iniş takımlarında kullanılan malzemelerin analizi ve karşılaştırılması, havacılık endüstrisindeki mühendislik ve tasarım uygulamaları açısından büyük önem taşımaktadır. Bu sebepten ötürü uçak üzerinde ağırlık azaltmak iniş takımı malzemesinin değiştirilmesi ile mümkündür (Aydın, 2023).

Bu makalede iniş takımı parçalarından birisi olan ve iniş takımının yük taşıma kapasitesini artırarak iniş ve taksit sırasında oluşan kuvvetlerin düzgün bir şekilde dağıtılmasına yardımcı olan tork iletim parçasına yapısal analiz yapılarak tasarım güncellemeleri yapılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda iniş takımı parçaları üzerinde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Günümüzde en yaygın olan üç tekerlekli bisiklet tipi iniş takımı belirlenmiştir. Tasarım için gerekli olan ölçüler ve değerler hesaplanmıştır. CATIA V5 programında tasarlanan iniş takımı parçası ANSYS Workbench programında yapısal analiz sonuçları gerçekleştirilmiştir.

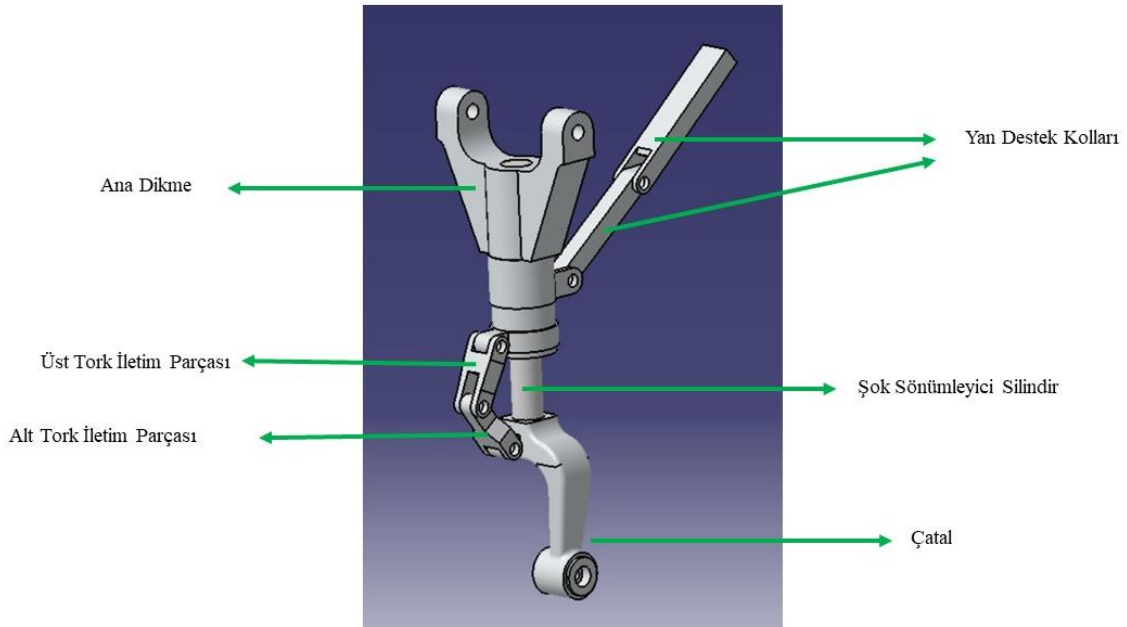
Makale için incelenen literatürde Currey (1988) tarafından yazılan "Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices" kitabı, iniş takımlarının tasarım prensiplerini ve uygulamalarını kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Currey, iniş takımlarının uçak ağırlığının %3 ila %5'ini oluşturduğunu ve bu nedenle ağırlık optimizasyonunun kritik bir öneme sahip olduğunu belirtmektedir. Raymer (2012) "Aircraft Design: A Conceptual Approach" adlı eserinde, iniş takımlarının uçak performansı üzerindeki etkilerini vurgulamakta ve yapısal analizlerin önemini açıklamaktadır. Raymer, iniş takımlarının maruz kaldığı yüklerin doğru analiz edilmesi gerektiğini ve bu yüklerin dayanıklılığı etkilediğini belirtir. Caputo ve diğerlerinin (2018) yaptığı çalışmada, tek boyutlu ve üç boyutlu olarak modeli oluşturulan iniş takımının sonlu elemanlar analizi (SEM) ile sonuçları karşılaştırılmıştır.

"Design And Strength Analysis of Nose Landing Gear" (Raju M ve diğerleri, 2017) başlıklı makalede burun iniş takımının farklı malzemelerle yapılan sonlu elemanlar analizinde deformasyon, gerilme, yorulma ve titreşim değerlerini kıyaslamışlardır.

"Advanced Materials in Aerospace" (Mair, 1996) başlıklı çalışmada, hafif ancak yüksek mukavemetli malzemelerin iniş takımı tasarımında nasıl kullanıldığını incelemiştir. Özellikle alüminyum alaşımları, titanyum malzemelerin iniş takımı tasarımında sıkça tercih edildiğinden bahsetmektedir.

3. GEOMETRİ

İniş takımı birçok yapıdan meydana gelmektedir. İniş takımı tiplerine göre parçalar değişmektedir. Bu makalede üç tekerlekli bisiklet model iniş takımı üzerinde analiz uygulanacaktır. Şekil 1'de burun iniş takımı geometrisi gösterilmektedir. Tork iletim parçası iniş takımının dönüş hareketlerini kontrol etmeye yarayan önemli bir parçadır. İniş takımının stabilitesini artırarak, iniş sırasında veya taksi yaparken oluşabilecek titreşimleri ve sallantıları azaltır. Ayrıca iniş takımı üzerindeki yükün dağıtılmasını sağlayarak denge sağlamaya yardımcı olur. Tork iletim parçası, iniş takımının güvenliği ve etkinliği açısından kritik bir bileşendir. İniş sırasında veya taksi yaparken oluşabilecek mekanik sorunları ve aşırı yüklenmeleri önleyerek, uçak operasyonlarının güvenliğini artırır (Smith ve John, 2021).



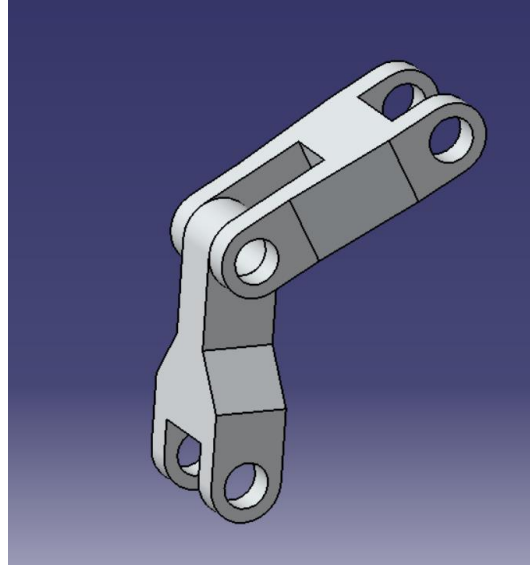
Şekil 1: Burun iniş takımı geometrisi.

4. SONLU ELEMANLAR METODU

Sonlu Elemanlar Metodu, karmaşık yapıların davranışlarını matematiksel olarak modellemek ve analiz etmek için kullanılan bir mühendislik aracıdır. Bu yöntem, bir yapıyı veya malzemeyi küçük parçalara böler, her bir elemanın davranışını diferansiyel denklemlerle ifade eder ve sonuçta geniş bir sistem oluşturur. Bu metodun temel amacı, bir yapı veya malzemenin gerilme, deformasyon, sıcaklık dağılımı gibi önemli parametrelerini belirlemek ve bu parametrelerin çeşitli çalışma koşullarında nasıl değişeceğini tahmin etmektir. Bu sayede, bir yapı veya malzeme tasarımının optimize edilmesi, dayanıklılığın artırılması ve güvenlik faktörlerinin belirlenmesi sağlanır (Güler ve Şen, 2016).

4.1. Geometrinin Modellenmesi

İniş takımı tork iletim parçası, bir iniş takımının en önemli alt elemanlarından birisidir. İniş takımının yük taşıma kapasitesini artırarak iniş ve taksit sırasında oluşan kuvvetlerin düzgün bir şekilde dağıtılmasına yardımcı parçasıdır. Tork iletim parçası CATIA V5 programı ile tasarlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2: Burun iniş takımı tork iletim parçaları.

4.2. Mesh

İniş takımı tork iletim parçasının analiz edilebilmesi için en önemli kısımlardan biriside mesh yapısının doğru oluşturulmasıdır. Oluşturulan mesh yapısı analiz sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Yeterince iyi bir mesh yapısı oluşturulamazsa analiz sonuçlarında çıkan değerler sağlıklı olmayacaktır. Bu durum doğrudan tasarımı etkileyebilmektedir. Kalite parametrelerine dikkat edilerek mesh yapısı oluşturulmuştur (Şekil 3). Mesh işlemi yapıldıktan sonra mesh kalite parametrelerinden aspect ratio (boyut oranı) ve

skewness (çarpıklık) değerleri kontrol edilmiştir. Skewness değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. İdeal ortalama değer 0,25' altında olmalıdır fakat 0,5'in altında olması genellikle kabul edilebilir olarak kabul görmektedir. 0,9'un üzerindeki skewness değerleri işe çözüm doğruluğunu ciddi şekilde etkilemektedir (Aydın ve Ozkol, 2022). Analizde uygulanan mesh yapısının skewness değeri ortalama 0,24'dür. Bu değer ideal bir çarpıklık değerine sahip olduğunu bizlere göstermiştir. Aspect ratio değeri bir elemanın en uzun kenarının en kısa kenarına oranıdır. İdeal ortalama değer 1'e yakın olmalıdır. Fakat 1 ile 5 arasındaki değerlerde kabul edilebilirdir (Aydın ve Ozkol, 2022). Analizde uygulanan mesh yapısının aspect ratio değeri ortalama 1,87'dir. Bu değer ideal bir boyut oranı değerine sahip olduğunu bizlere göstermiştir.



Şekil 3: Mesh yapısı.

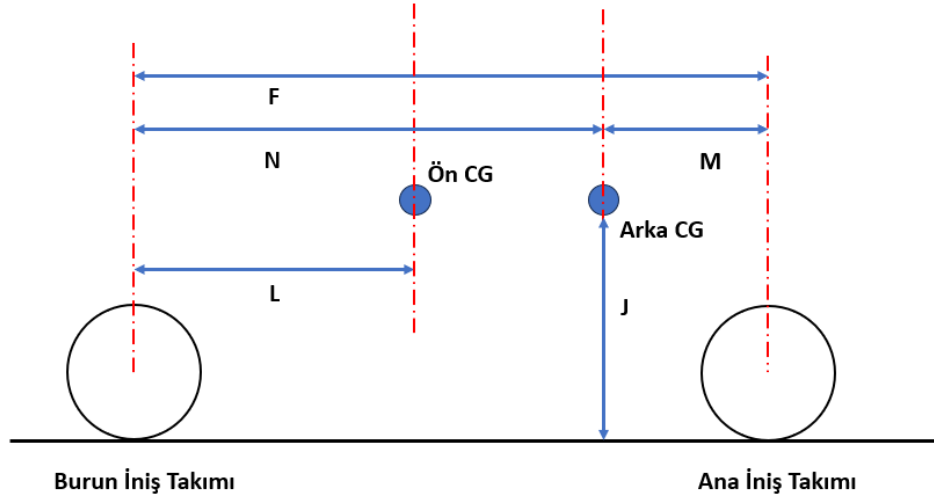
4.3. Yük ve Sınır Şartları

Yapılacak analizin sonuçlarını ve doğruluğunu etkileyen bir başka önemli noktada analiz yapılırken girilen sınır koşulları ve yüklerdir. Bu sebepten sınır şartları analiz yapılırken doğru tanımlanmalıdır. Burun iniş takımı tork iletim parçasının analizi için uçağın maksimum kalkış ağırlığı referans alınmıştır. Burun iniş takımının taşıyabileceği yük iniş takımı tasarımı için gerekli olan mesafelere göre hesaplanmaktadır (Çizelge 1). Bu çizelgeye göre maksimum uçak ağırlığı W, 166700 Newton'dur. Burun iniş takımına gelecek yükler aşağıda verilen Denklem 1 ve Denklem 2 eşitlikleriyle hesaplanmaktadır. Denklem 1'e göre burun iniş takımı üzerine gelen maksimum statik yük 54100 Newton olarak hesaplanmıştır. Denklem 2'e göre dinamik yük 10354 Newton olarak hesaplanmıştır. Denklem 3'e göre ise burun iniş takımına gelen net dikey yük 64454 Newton'dur (Çizelge 2).

$$F_{statik} = \frac{W(F-L)}{F} \quad (1)$$

$$F_{dinamik} = \frac{10.J.W}{(32,2).F} \quad (2)$$

$$F_{burun\ net\ dikey\ yük} = F_{statik} + F_{dinamik} \quad (3)$$



Şekil 4: İniş takımları yerleşimi.

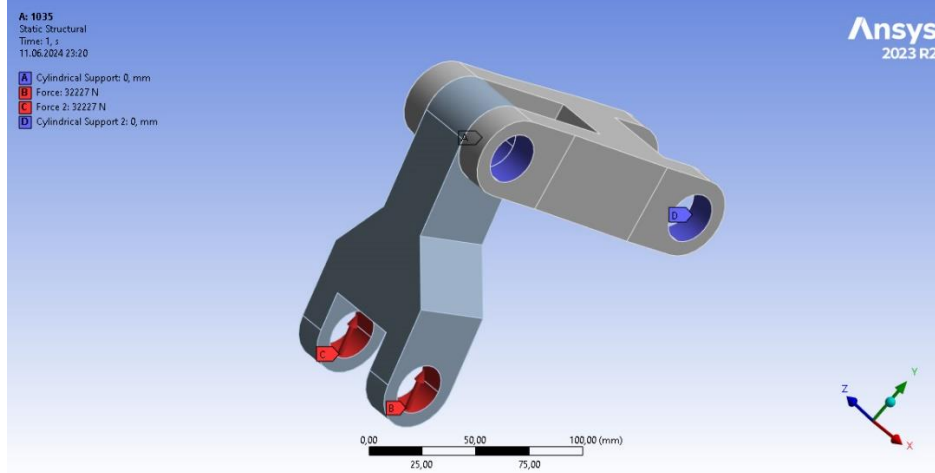
Çizelge 1: İniş takımı tasarımı için gerekli olan mesafeler.

Burun iniş takımı ile ana iniş takımı arasındaki mesafe (F)	Burun iniş takımı ile ön ağırlık merkezi arasındaki mesafe (L)	Burun iniş takımı ile arka ağırlık merkezi arasındaki mesafe (N)	Ana iniş takımı ile arka ağırlık merkezi arasındaki mesafe (M)	Uçak gövdesi ile iniş takımları arasındaki mesafe (J)
5m	3,378m	3,62m	1,38m	1m

Çizelge 2: Burun iniş takımı üzerine uygulanan yük ve parametreler.

Parametre	Değer
Uçak kalkış ağırlığı	17000 kg
F_{statik}	54100 N
$F_{dinamik}$	10354 N
$F_{net\ dikey\ yük}$	64454 N

Tork iletim parçasına uygulanacak dikey yük iki kola eşit olarak bölünmüş şekilde uygulanmıştır. İki tork iletim parçası arasında pim bağlantısı olacağı için silindirik destek tanımlanmıştır. Dönme hareketi serbest bırakılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5: Sınır şartları ve yükler.

4.4. Malzeme Tanımlanması

Burun iniş takımı tork iletim parçasına malzeme seçimi yapılırken malzemelerin mekanik özellikleri, fiziksel özellikleri, korozyon dayanımı gibi kriterler incelenerek seçilmiştir. Havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan PH13-8 Mo çeliği, Titanyum Ti-6Al-4V alaşımı, Alüminyum 7075 alaşımı, 15-5 PH çeliği ve AISI 4340 çelik malzemeleri kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre yüksek dayanım, hafiflik gibi kriterler incelenerek uygun malzeme belirlenecektir. Analizde kullanılacak malzeme bilgileri çizelgeye işlenmiştir (Çizelge 3-4).

Çizelge 3: Malzeme özellikleri (Aydın ve Ozkol, 2022).

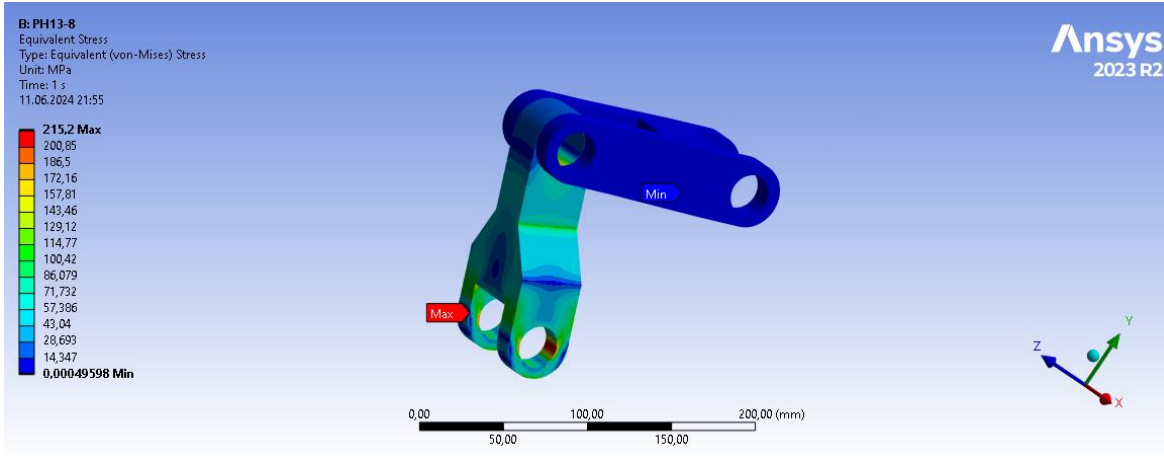
Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Dayanım (MPa)	
				Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı
PH13-8 Mo	7,8	221000	0,28	1480	1415
AISI 4340	7,7	200000	0,29	1792	1496
Ti-6Al-4V	4,43	113800	0,37	960	880
Al 7075	2,81	70960	0,33	572	503

Çizelge 4: 15-5 PH malzeme özellikleri (Aircraft Materials, 2021).

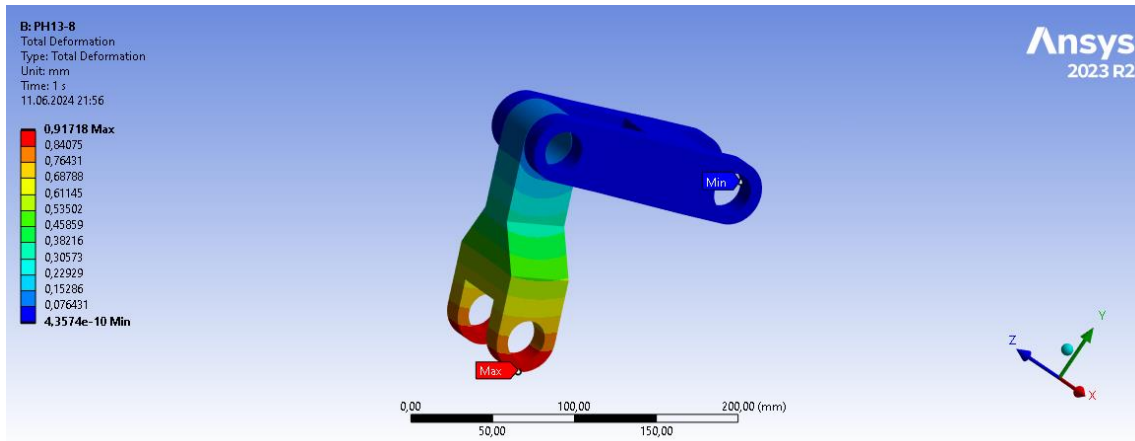
Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Dayanım (MPa)	
				Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı
15-5 PH	7,8	190000	0,28	1200	1140

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

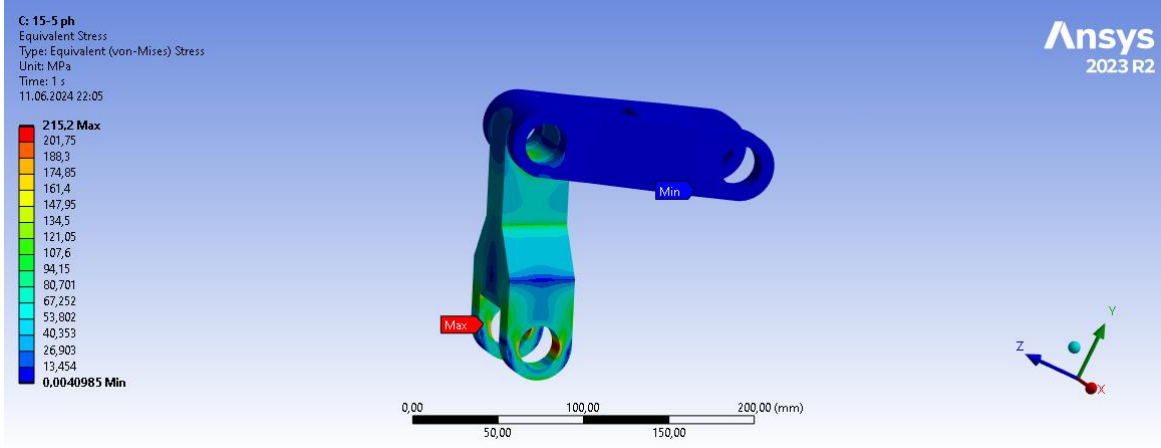
Gerilme analizi, montajların yapısal güvenliği ve bütünlüğünün değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Önceden tahmin edilen gerilme değerleri, uygun malzeme seçimi ve geometrik boyutların belirlenmesine yardımcı olur. Güvenlik faktörlerinin hesaplanmasıyla birlikte, gerilme tahminleri yapıların boyutlarının optimize edilmesini sağlar. Güvenlik faktörü, tasarlanan yapının güvenlik marjını yansıtarak, yapının ne kadar sağlam tasarlandığını ve bileşenlerinin ne kadar güvenli olduğunu belirler. Bu çalışmada, belirli bir yükü taşıyabilecek farklı malzemelerin kapasiteleri analiz edilmiştir ve ayrıca yer değiştirme analizleri de bu değerlendirmede incelenmiştir. PH13-8 Mo çeliği (Şekil 6-7), 15-5 PH çeliği (Şekil 8-9), Al 7075 alaşımı (Şekil 10-11), Ti-6Al-4V alaşımı (Şekil 12-13), AISI 4340 çeliği (Şekil 14-15) malzemesi kullanıldığında oluşan gerilme ve deformasyon miktarları görselleştirilmiştir.



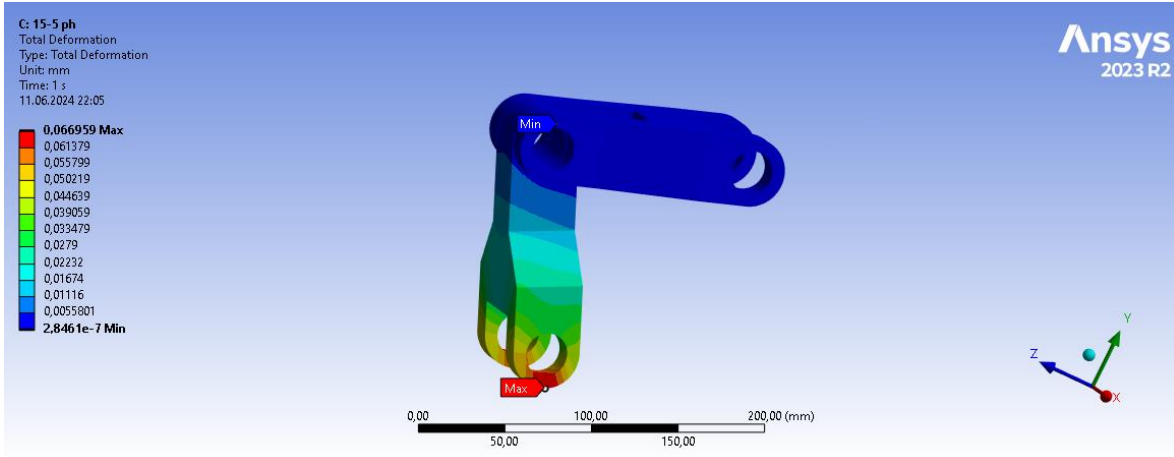
Şekil 6: PH13-8 Mo malzeme Von-Mises gerilme analiz sonuçları.



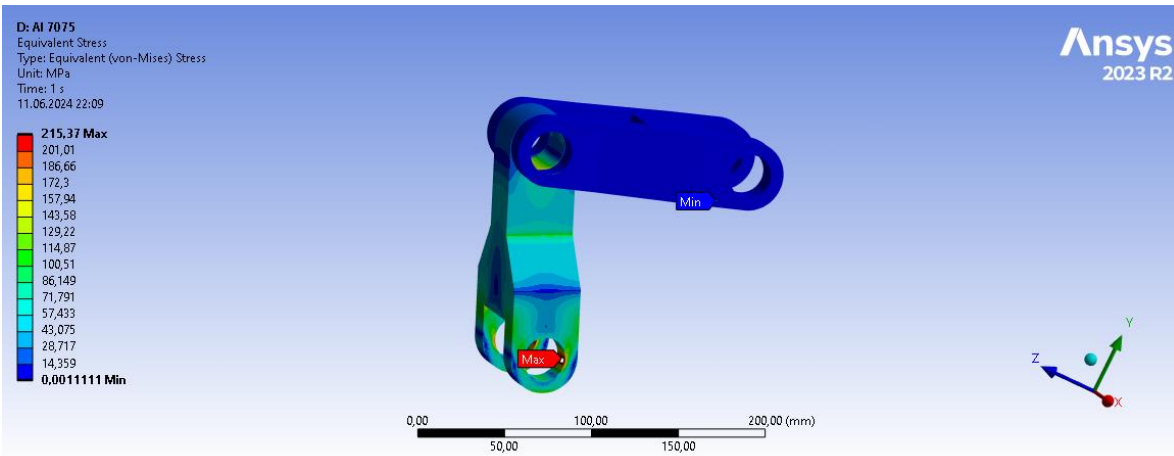
Şekil 7: PH13-8 Mo malzeme deformasyon analiz sonuçları.



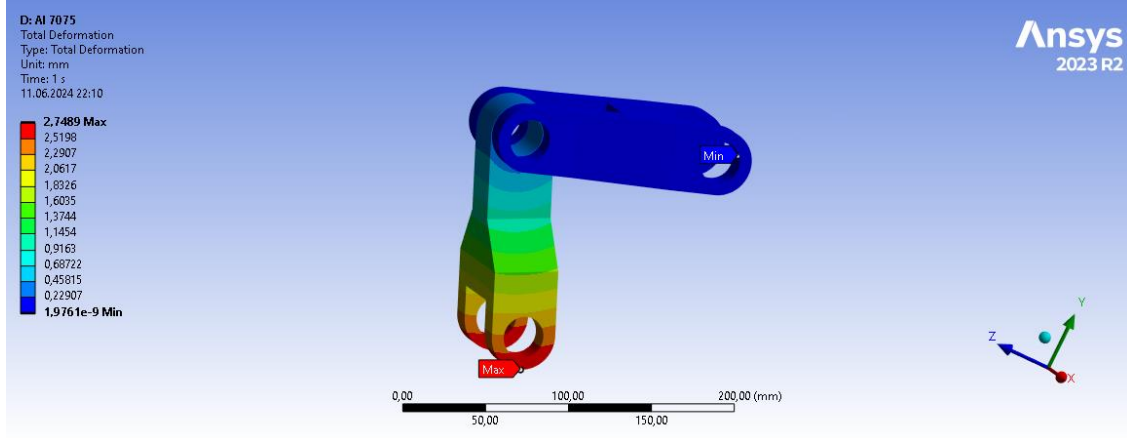
Şekil 8: 15-5 PH malzeme Von-Mises gerilme analiz sonuçları.



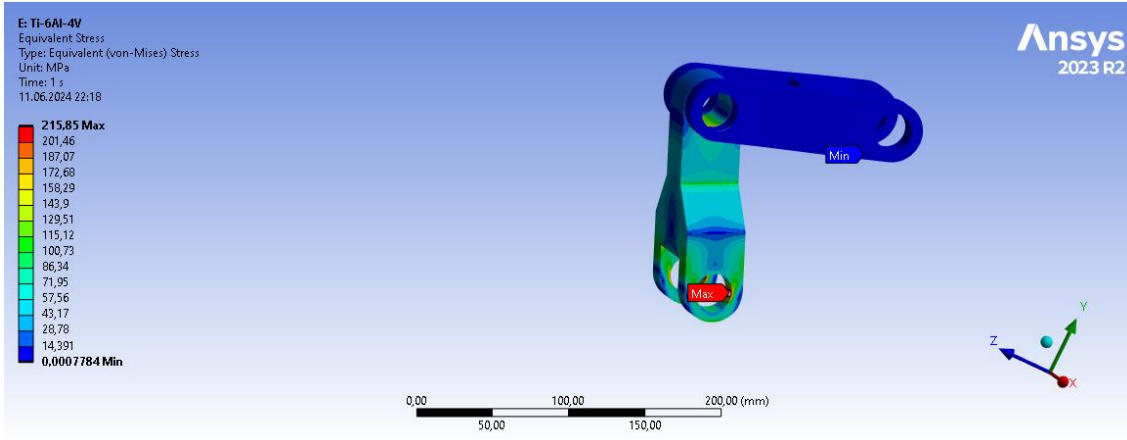
Şekil 9: 15-5 PH malzeme deformasyon analiz sonuçları.



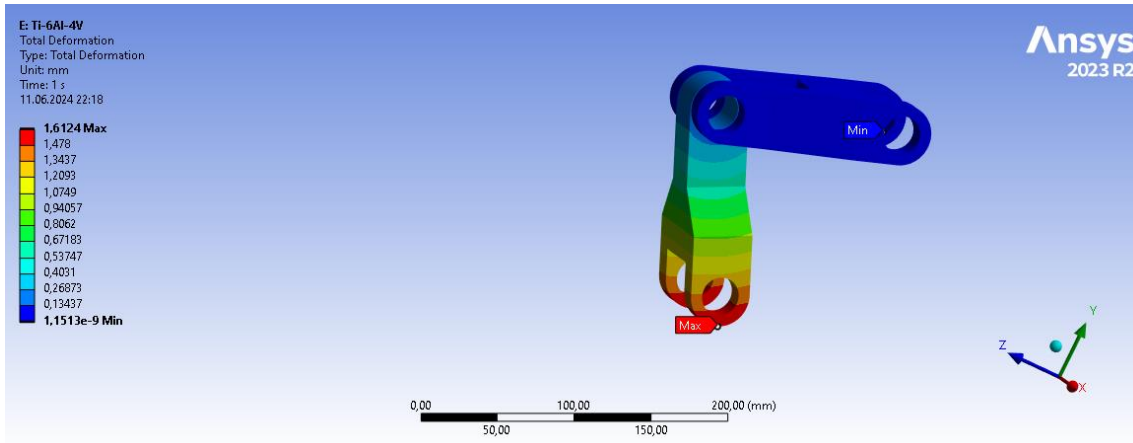
Şekil 10: Al 7075 Von-Mises gerilme analiz sonuçları.



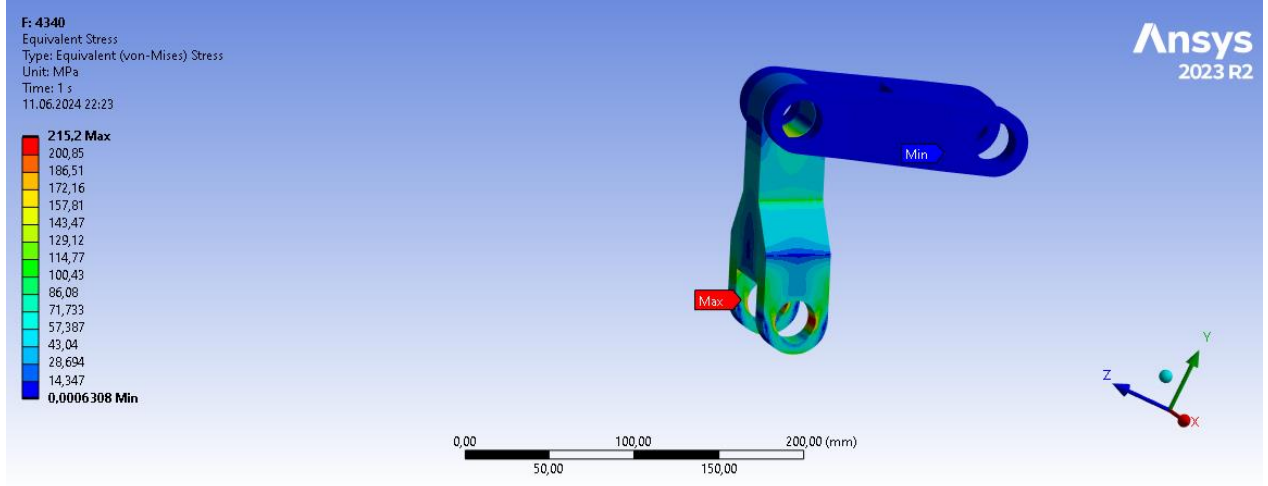
Şekil 11: Al 7075 malzeme deformasyon analiz sonuçları.



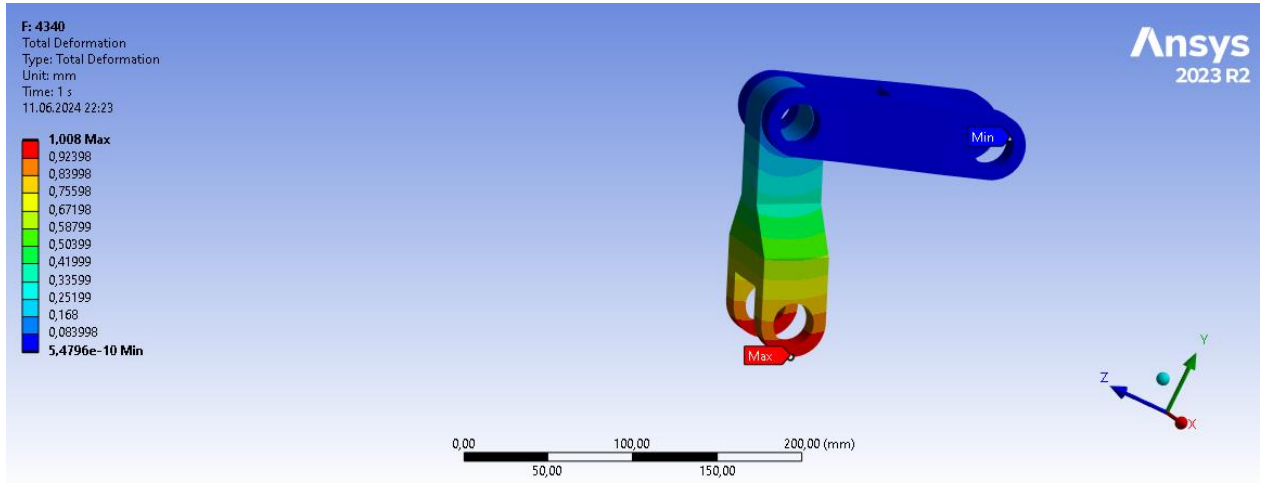
Şekil 12: Ti-6Al-4V malzeme Von-Mises gerilme analiz sonuçları.



Şekil 13: Ti-6Al-4V malzeme deformasyon analiz sonuçları.



Şekil 14: AISI 4340 malzeme Von-Mises gerilme analiz sonuçları.



Şekil 15: AISI 4340 malzeme deformasyon analiz sonuçları.

Yapılan analiz sonucunda elde edilen gerilme değerlerinin anlamlandırılabilmesi için emniyet faktörü hesaplanır. Emniyet faktörü malzeme akma dayanımının analiz sonucu okunan maksimum gerilmeye bölünmesi ile bulunur. Emniyet payı ise emniyet faktöründen bir çıkartılması ile bulunur. Elde edilen sonuçlara göre emniyet faktörünün 1'den, emniyet payının ise 0'dan büyük olması beklenir (Smith ve Jones, 2010).

$$\text{Emniyet Faktörü} = \frac{\text{Akma Dayanımı}}{\text{Maksimum Gerilme}} \quad (4)$$

$$\text{Emniyet Payı} = \frac{\text{Akma Dayanımı}}{\text{Maksimum Gerilme}} - 1 \quad (5)$$

Çizelge 5: Analizde kullanılacak malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması.

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Ağırlık (kg)	Deformasyon (mm)	Max.Dayanım (MPa)	Emniyet Faktörü
PH13-8 Mo	7,8	3,306	0,917	215,2	6,575
Al 7075	2,81	0,922	2,749	215,37	2,335
15-5PH	7,8	3,306	0,067	215,2	5,297
Ti-6Al-4V	4,43	1,875	1,612	215,85	4,076
AISI 4340	7,7	3,260	1,008	215,2	6,951

6. SONUÇ

Bu çalışmada bir iniş takımı üzerinde bulunan tork iletim parçalarının sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Burun iniş takımı üzerine uygulanacak kritik iniş koşulları belirlenmiş ve yük hesaplamaları yapılmıştır. Tork iletim parçaları arasındaki temas ilişkileri tanımlanmış ve analiz gerçekleştirilmiştir. Gerilme analiz sonuçları incelendiğinde beş farklı malzemede de benzer sonuçlar çıktığı gözlenmiştir (Çizelge 5). Fakat deformasyon sonuçları incelendiğinde en çok Al 7075 malzemesinde 2,749 mm deformasyon gerçekleşirken, en az 15-5 PH çelik malzemesinde 0,067 mm deformasyon gerçekleşmiştir. Yoğunluk parametresine göre inceleme yaptığımızda en hafif malzeme Al 7075 olurken, en ağır malzeme PH13-8 ve 15-5PH olarak tespit edilmiştir. Emniyet faktörü değerleri incelendiğinde ise bütün malzemeler havacılık emniyet katsayılarına göre emniyetli bulunmuştur. Bütün bu sonuçlar ve parametreler incelendiğinde havacılık alanında malzemelerdeki dayanım ve deformasyon önemli olduğu için burun iniş takımı tork iletim parçalarının malzemesine en uygun 15-5 PH olduğu tespit edilmiştir. Parçaların ağırlığını azaltmak için gelecek çalışmalarda topoloji optimizasyonları uygulanarak parçalar üzerinde boşaltmalar yapılabilir. Ayrıca Al 7075 malzemesi kullanıldığında oluşan deformasyonu önlemek için tasarım üzerinde iyileştirmeler yaparak deformasyon miktarı azaltılırsa ağırlık yönünden Al 7075 kullanımı uygun olacaktır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

E.Ş.: Yöntem, yazılım, doğrulama, araştırma, kaynaklar, yazı yazma.

C.E.: Yöntem, yazılım, doğrulama, araştırma, kaynaklar, gözden geçirme ve düzenleme.

KAYNAKLAR

Aydın, G. (2023). *Bir savaş uçağının burun iniş takımı yapısal analizi*. İTÜ Uçak ve Uzay Mühendisliği.

Aydın, G., & Ozkol, I. (2022). Structural Analysis of the Nose Landing Gear of a Fighter Aircraft. *European Journal*

- of Science and Technology*, (43), 126-135.
- Aircraft Materials. (2021). 15-5PH. <https://www.aircraftmaterials.com/data/alstst/ams5659.html>. Erişim Tarihi: 01.06.2024
- Currey, N. S. (1988). *Aircraft landing gear design: principles and practices*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Güler, M., & Şen, S. (2016). Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56-66.
- Mair, H. U. (1996). *Advanced materials in aerospace*. Springer.
- Raymer, D. P. (2012). *Aircraft design: A conceptual approach (5th ed.)*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Caputo, F., De Luca, A., Greco, A., Marro, A., Apicella, A., Sepe, R. & Armentani, E. (2018). Established numerical techniques for the structural analysis of a regional aircraft landing gear. *Advances in Materials Science and Engineering*. Hindawi
- Raju, M.M., Patan, S. (2017). Design and strength analysis of nose landing gear. *International Journal and Magazine of Engineering, Technology, Management and Research*, 04, 71-750.
- Smith, J., & Johnson, M. (2021). Fatigue Analysis of Torque Link in Landing Gear. *Journal of Aircraft Engineering*, 45(3), 233-245. <https://doi.org/10.2514/1.C034567>
- Smith, J., & Jones, M. (2010). Evaluating Safety Factors in Engineering Design. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 132(2), 045001.
- Yaylacı, E. (2021). *Bir iniş takımı ve yuvasının tasarımı*. İTÜ Uçak Mühendisliği.