



# **F1 Halo Parçası için Titanyuma Alternatif Kompozit Malzeme Araştırması: Statik Analiz ile Karşılaştırmalı Değerlendirme**

---



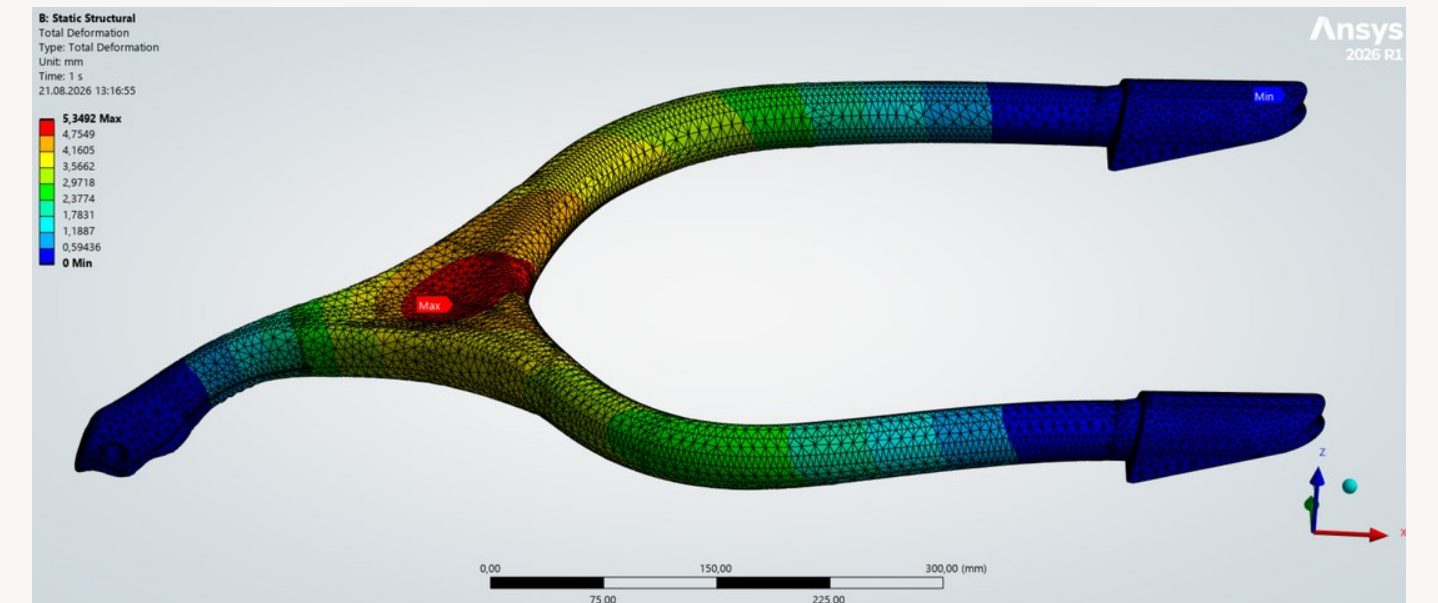
# ! Neden Bu Çalışma?

Titanyum alaşımları (özellikle Ti-6Al-4V) yüksek mukavemet sunmasına rağmen, modern F1 araçlarında ağırlık limitleri kritik bir tasarım kısıtıdır.

Sürücü güvenliği standartlarından (FIA standardı 8869-2018) ödün vermeden kütle azaltımı sağlamak esastır.

Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) yapıların özgül mukavemeti, metalik yapılara göre ciddi bir avantaj potansiyeli taşımaktadır.

Araştırma sorusu: Titanyuma kompozit bir alternatif mümkün mü ve bu alternatif Halo kütlesini, dolayısıyla araç ağırlığını azaltır mı?



# ■ ■ Mevcut Durum ve Literatür Özeti



## Geleneksel Malzemeler

Halo, FIA şartnamesi gereği Grade 5 titanyumdan (Ti-6Al-4V) üretilir. FIA statik testinde yapı 116 kN ve 46 kN'lik bileşke kuvvetler altında denenir; 125 kN yükte sehim 17,5 mm'yi geçmemeli, yük kalktıktan 1 dakika sonra kalıcı deformasyon 3 mm'nin altında olmalıdır. Benzer statik analizlerde (IJRASET, 2021) titanyum Halo için 18-19,5 mm yer değiştirme raporlanmıştır.



## Kompozit Eğilimleri

Motorsporlarında kompozite yönelim artmaktadır: FIA onaylı test merkezlerinde değerlendirilen doğal fiber takviyeli çarpışma kutuları, geleneksel karbon fiber yapılarla karşılaştırılabilir performans göstermiştir. CFRP ve BFRP ile şasi hafifletme çalışmaları sonlu elemanlarla statik ve modal analiz kapsamında incelenmekte; bu, kompozitin titanyum/çelik alternatifi olarak ciddiye alındığını göstermektedir.



## Analiz Eksikleri

Literatürdeki statik analizler titanyum Halo'ya odaklanmaktadır (IJRASET, 2021). Bu çalışma, 6 kompozit malzemeyi titanyumla aynı geometri ve aynı FIA yükleri altında kıyaslayarak bu boşluğu doldurmayı amaçlar. Dinamik darbe davranışı kapsam dışıdır.

# Malzeme Seçimi ve Mekanik Özellikler

*Analizde kullanılan malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri (1/2: T700 Carbon, E-Glass, M46J)*

| T700 Carbon |            |            |            |            |            |    |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|----|
| Shear Angle | 0          | -30        | -10        | 10         | 30         |    |
| E1          | 6.6892E+10 | 7.3739E+10 | 7.2424E+10 | 7.2458E+10 | 7.3703E+10 | Pa |
| E2          | 6.6892E+10 | 5.3798E+10 | 6.8304E+10 | 6.8255E+10 | 5.3770E+10 | Pa |
| E3          | 1.3667E+10 | 1.2612E+10 | 1.3553E+10 | 1.3553E+10 | 1.2612E+10 | Pa |
| G12         | 1.8716E+10 | 2.1266E+10 | 1.8176E+10 | 1.8177E+10 | 2.1260E+10 | Pa |
| G23         | 3.7086E+09 | 3.6419E+09 | 3.7192E+09 | 3.7190E+09 | 3.6413E+09 | Pa |
| G31         | 3.7086E+09 | 3.6904E+09 | 3.6918E+09 | 3.6918E+09 | 3.6898E+09 | Pa |
| nu12        | 0.16343    | 0.18726    | 0.10136    | 0.10141    | 0.18747    |    |
| nu13        | 0.35542    | 0.38676    | 0.38095    | 0.38085    | 0.38673    |    |
| nu23        | 0.35542    | 0.40214    | 0.38648    | 0.38654    | 0.40197    |    |

| E-Glass     |            |            |            |            |            |    |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|----|
| Shear Angle | 0          | -30        | -10        | 10         | 30         |    |
| E1          | 2.8902E+10 | 2.9793E+10 | 2.9500E+10 | 2.9489E+10 | 2.9777E+10 | Pa |
| E2          | 2.8901E+10 | 2.5545E+10 | 2.8610E+10 | 2.8601E+10 | 2.5534E+10 | Pa |
| E3          | 1.1788E+10 | 1.1091E+10 | 1.1716E+10 | 1.1715E+10 | 1.1091E+10 | Pa |
| G12         | 9.7006E+09 | 1.0448E+10 | 9.6212E+09 | 9.6179E+09 | 1.0444E+10 | Pa |
| G23         | 3.2698E+09 | 3.2215E+09 | 3.2762E+09 | 3.2759E+09 | 3.2212E+09 | Pa |
| G31         | 3.2698E+09 | 3.2552E+09 | 3.2636E+09 | 3.2635E+09 | 3.2549E+09 | Pa |
| nu12        | 0.18989    | 0.21938    | 0.17884    | 0.17874    | 0.21936    |    |
| nu13        | 0.32611    | 0.33400    | 0.33100    | 0.33106    | 0.33406    |    |
| nu23        | 0.32611    | 0.34895    | 0.33469    | 0.33475    | 0.34893    |    |

| M46J        |            |            |            |            |            |    |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|----|
| Shear Angle | 0          | -30        | -10        | 10         | 30         |    |
| E1          | 1.0828E+11 | 1.2584E+11 | 1.2336E+11 | 1.2334E+11 | 1.2579E+11 | Pa |
| E2          | 1.0828E+11 | 8.2702E+10 | 1.1483E+11 | 1.1477E+11 | 8.2666E+10 | Pa |
| E3          | 1.4283E+10 | 1.3112E+10 | 1.4153E+10 | 1.4152E+10 | 1.3112E+10 | Pa |
| G12         | 2.4349E+10 | 2.9750E+10 | 2.3454E+10 | 2.3432E+10 | 2.9745E+10 | Pa |
| G23         | 3.9272E+09 | 3.8327E+09 | 3.9222E+09 | 3.9218E+09 | 3.8321E+09 | Pa |
| G31         | 3.9272E+09 | 3.9044E+09 | 3.8974E+09 | 3.8972E+09 | 3.9039E+09 | Pa |
| nu12        | 0.17919    | 0.1842     | 0.069001   | 0.068955   | 0.18445    |    |
| nu13        | 0.38865    | 0.45102    | 0.43745    | 0.43746    | 0.45097    |    |
| nu23        | 0.38865    | 0.45259    | 0.44444    | 0.44449    | 0.45239    |    |

Yukarıdaki tabloda belirtilen kompozit malzeme değerleri, 0 derece fiber yönelimi için verilmiştir. Analizlerde T700 serisi standart modüllü, M46J serisi ise yüksek modüllü alternatifler olarak titanyum ile karşılaştırılmak üzere sisteme tanımlanmıştır.

# Malzeme Seçimi ve Mekanik Özellikler

*Analizde kullanılan malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri (2/2: IM7 Carbon, Basalt, T300 Carbon)*

| IM7 Carbon  |            |            |            |            |            |    |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|----|
| Shear Angle | 0          | -30        | -10        | 10         | 30         |    |
| E1          | 7.6342E+10 | 8.5355E+10 | 8.3769E+10 | 8.3783E+10 | 8.5326E+10 | Pa |
| E2          | 7.6342E+10 | 6.0505E+10 | 7.8668E+10 | 7.8654E+10 | 6.0510E+10 | Pa |
| E3          | 1.3863E+10 | 1.2770E+10 | 1.3743E+10 | 1.3744E+10 | 1.2770E+10 | Pa |
| G12         | 2.0315E+10 | 2.3434E+10 | 1.9649E+10 | 1.9654E+10 | 2.3451E+10 | Pa |
| G23         | 3.7707E+09 | 3.6977E+09 | 3.7786E+09 | 3.7784E+09 | 3.6974E+09 | Pa |
| G31         | 3.7707E+09 | 3.7517E+09 | 3.7509E+09 | 3.7509E+09 | 3.7513E+09 | Pa |
| nu12        | 0.16595    | 0.18587    | 0.091404   | 0.091444   | 0.18602    |    |
| nu13        | 0.36318    | 0.40139    | 0.39431    | 0.39427    | 0.40138    |    |
| nu23        | 0.36318    | 0.41433    | 0.40016    | 0.40015    | 0.41417    |    |

| Basalt      |            |            |            |            |            |    |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|----|
| Shear Angle | 0          | -30        | -10        | 10         | 30         |    |
| E1          | 3.9143E+10 | 4.1099E+10 | 4.0555E+10 | 4.0553E+10 | 4.1081E+10 | Pa |
| E2          | 3.9142E+10 | 3.3420E+10 | 3.8935E+10 | 3.8918E+10 | 3.3407E+10 | Pa |
| E3          | 1.2615E+10 | 1.1766E+10 | 1.2524E+10 | 1.2524E+10 | 1.1765E+10 | Pa |
| G12         | 1.2645E+10 | 1.3776E+10 | 1.2438E+10 | 1.2433E+10 | 1.3772E+10 | Pa |
| G23         | 3.4399E+09 | 3.3869E+09 | 3.4503E+09 | 3.4501E+09 | 3.3865E+09 | Pa |
| G31         | 3.4399E+09 | 3.4232E+09 | 3.4311E+09 | 3.4310E+09 | 3.4228E+09 | Pa |
| nu12        | 0.16812    | 0.19835    | 0.14430    | 0.14424    | 0.19850    |    |
| nu13        | 0.33068    | 0.34405    | 0.34039    | 0.34024    | 0.34402    |    |
| nu23        | 0.33068    | 0.36196    | 0.34499    | 0.34504    | 0.36185    |    |

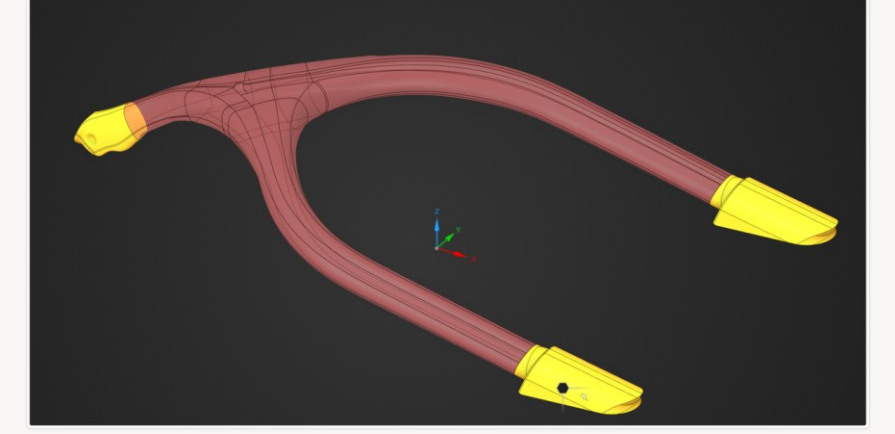
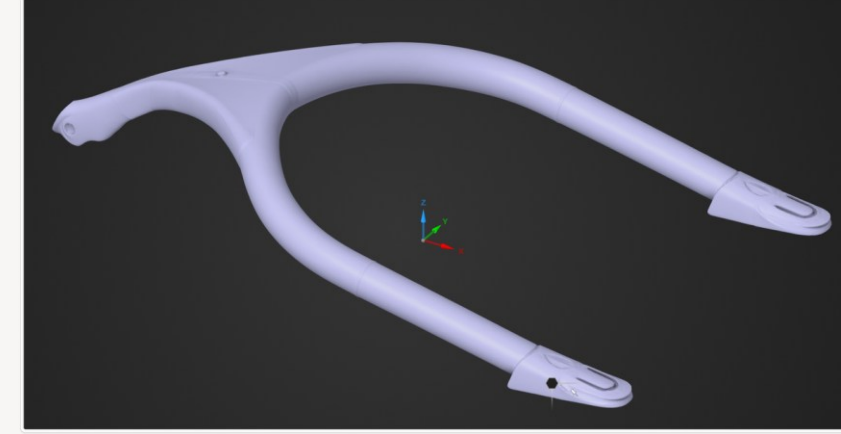
| T300 Carbon |            |            |            |            |            |    |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|----|
| Shear Angle | 0          | -30        | -10        | 10         | 30         |    |
| E1          | 4.7503E+10 | 5.6014E+10 | 5.6732E+10 | 5.6732E+10 | 5.6002E+10 | Pa |
| E2          | 4.7503E+10 | 4.6491E+10 | 4.9679E+10 | 4.9681E+10 | 2.6461E+10 | Pa |
| E3          | 8.6286E+09 | 8.3293E+09 | 8.5919E+09 | 8.5919E+09 | 8.3288E+09 | Pa |
| G12         | 6.0396E+09 | 9.3342E+09 | 6.2697E+09 | 6.2697E+09 | 9.3274E+09 | Pa |
| G23         | 2.8433E+09 | 2.8728E+09 | 3.0144E+09 | 3.0144E+09 | 2.8724E+09 | Pa |
| G31         | 2.8433E+09 | 3.1130E+09 | 3.0097E+09 | 3.0096E+09 | 3.1127E+09 | Pa |
| nu12        | 0.20684    | 0.21242    | 0.05247    | 0.05251    | 0.21226    |    |
| nu13        | 0.41180    | 0.43335    | 0.48701    | 0.48697    | 0.43336    |    |
| nu23        | 0.41180    | 0.42485    | 0.48252    | 0.48252    | 0.42474    |    |

Yukarıdaki tabloda belirtilen kompozit malzeme değerleri, 0 derece fiber yönelimi için verilmiştir. Analizlerde T700 serisi standart modüllü, M46J serisi ise yüksek modüllü alternatifler olarak titanyum ile karşılaştırılmak üzere sisteme tanımlanmıştır.

# Yöntem: Sonlu Elemanlar Analizi (FEA)

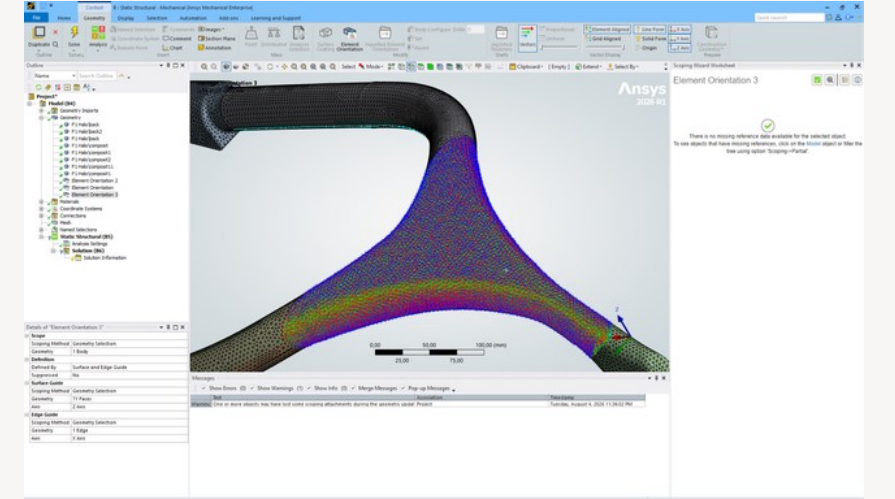
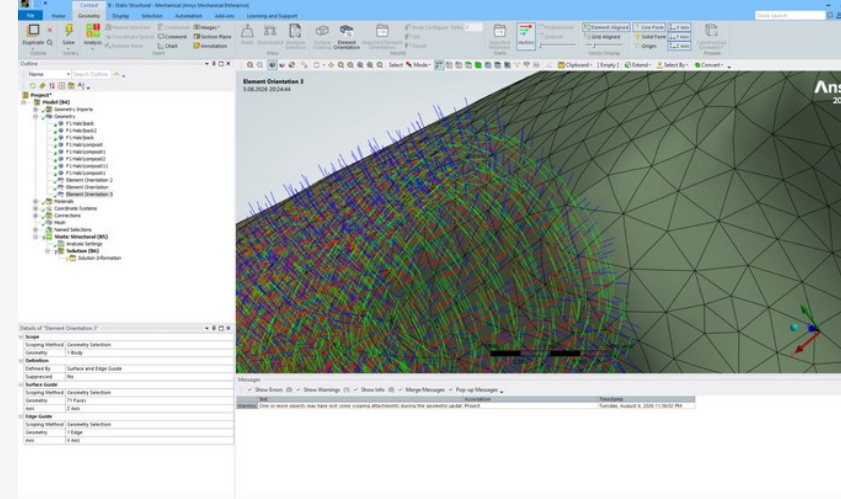
## 1. Geometri İçe Aktarımı ve Sadeleştirme

CAD modelinin STL formatında alınması ve Ansys üzerinde yüzey giydirme fonksiyonu uygulanarak sadeleştirilmesi.



## 1. Malzeme Ataması ve Optimizasyon

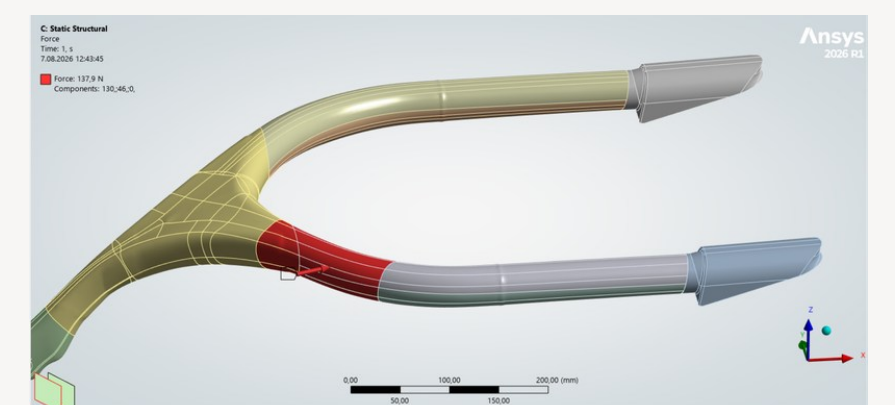
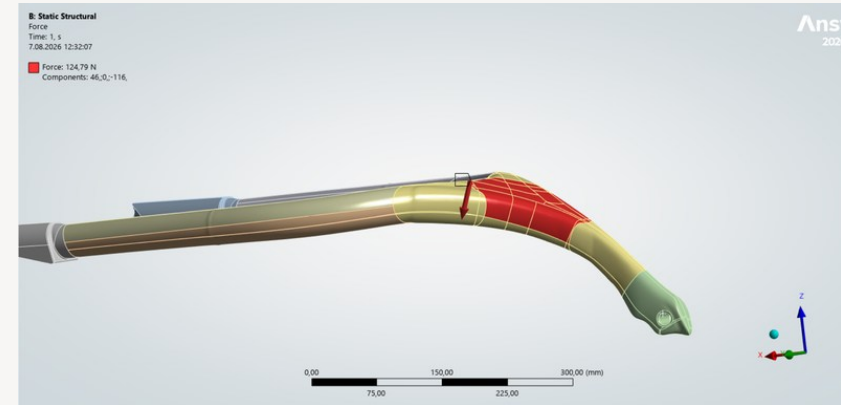
Ansys Material Designer üzerinden dokuma kumaş ve epoksi birleştirilmesi ve farklı kayma parametreleri atanması. Ansys üzerinden Element oryantasyonu uygulanması



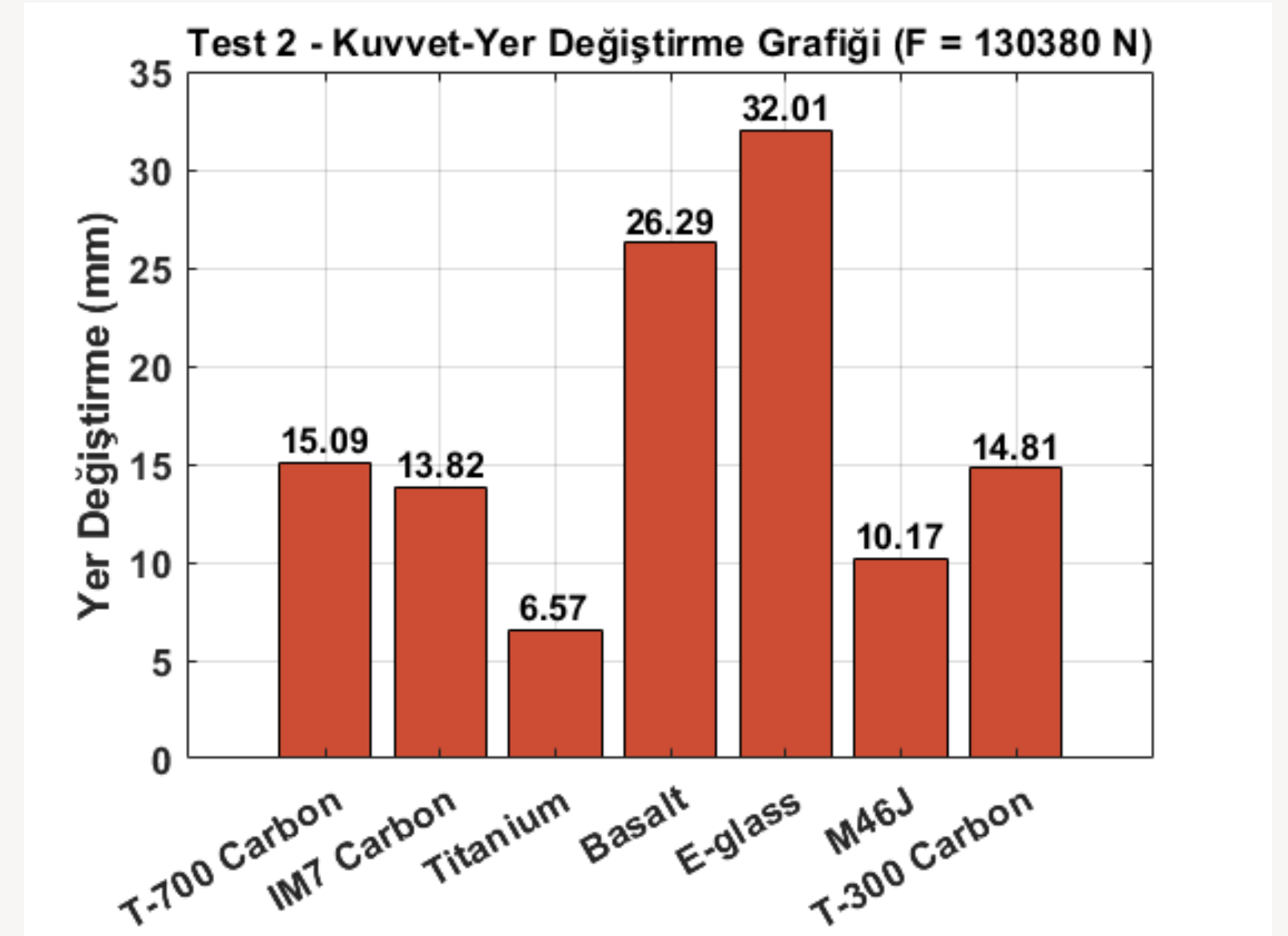
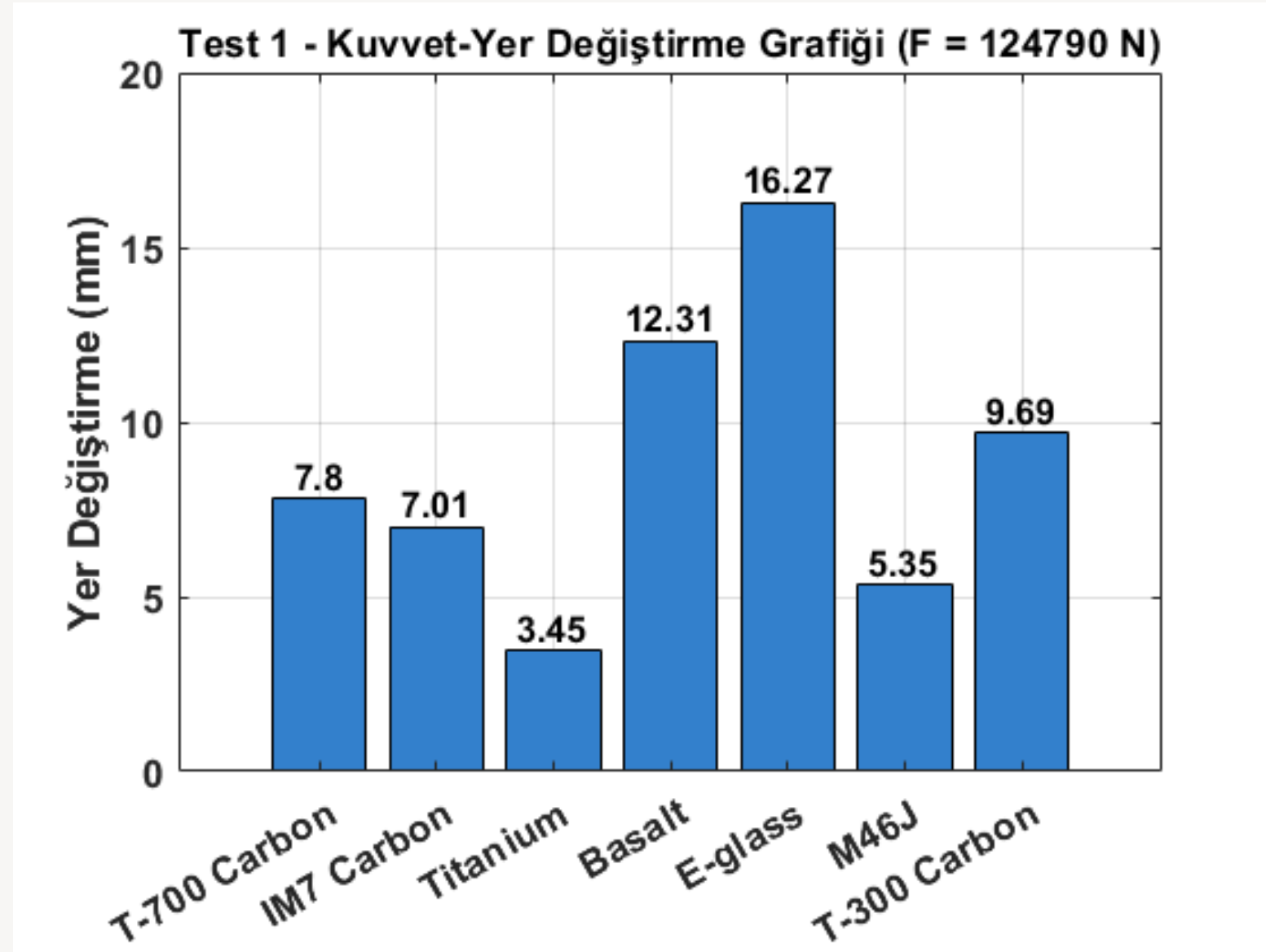
## 1. Sınır Şartları

FIA Test 1 standartlarına uygun olarak 116 kN dikey ve 46 kN yanal statik yüklerin uygulanması.

FIA Test 2 standartlarına uygun olarak 93.2 kN dikey ve 83.3 kN yanal statik yüklerin uygulanması

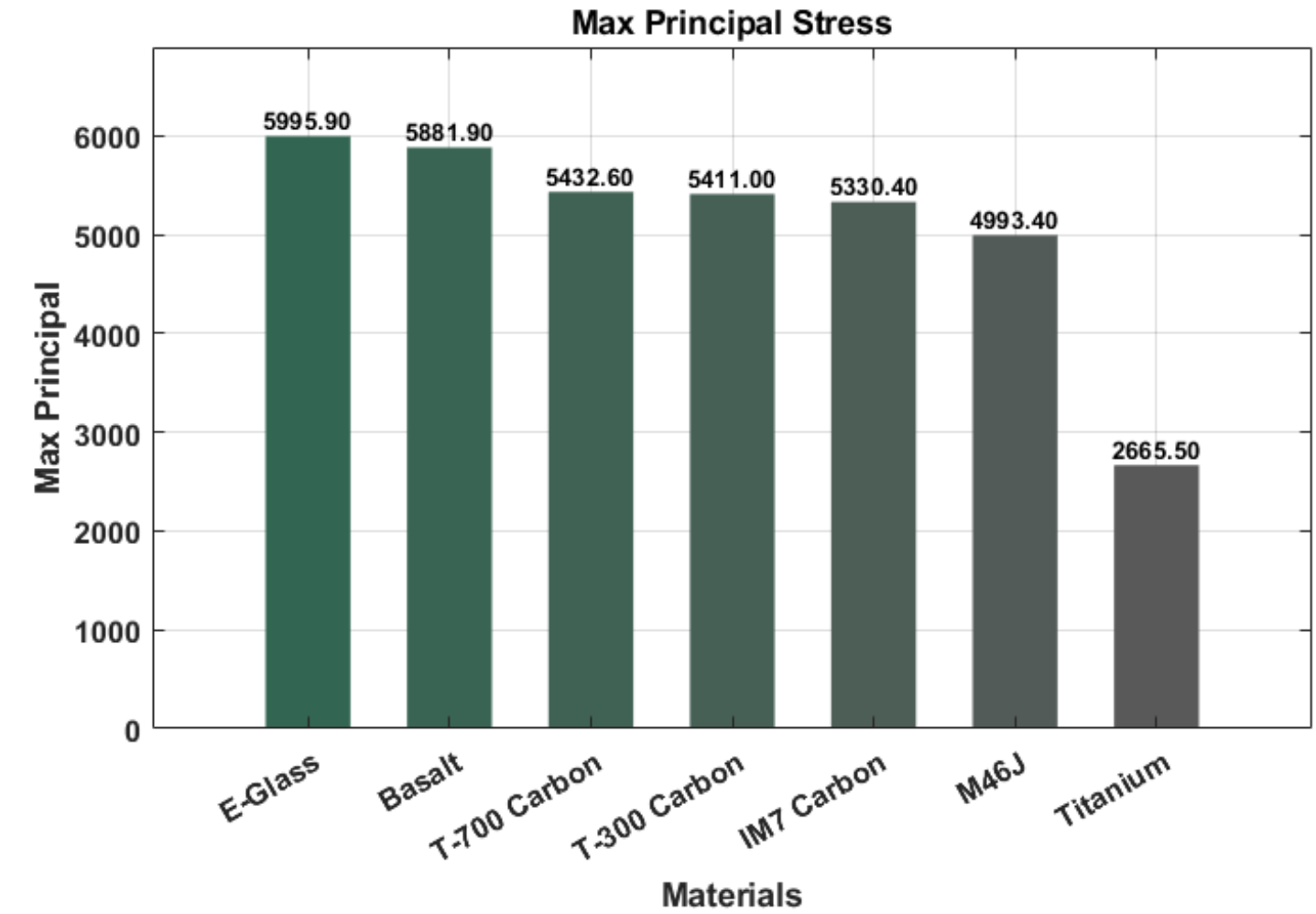
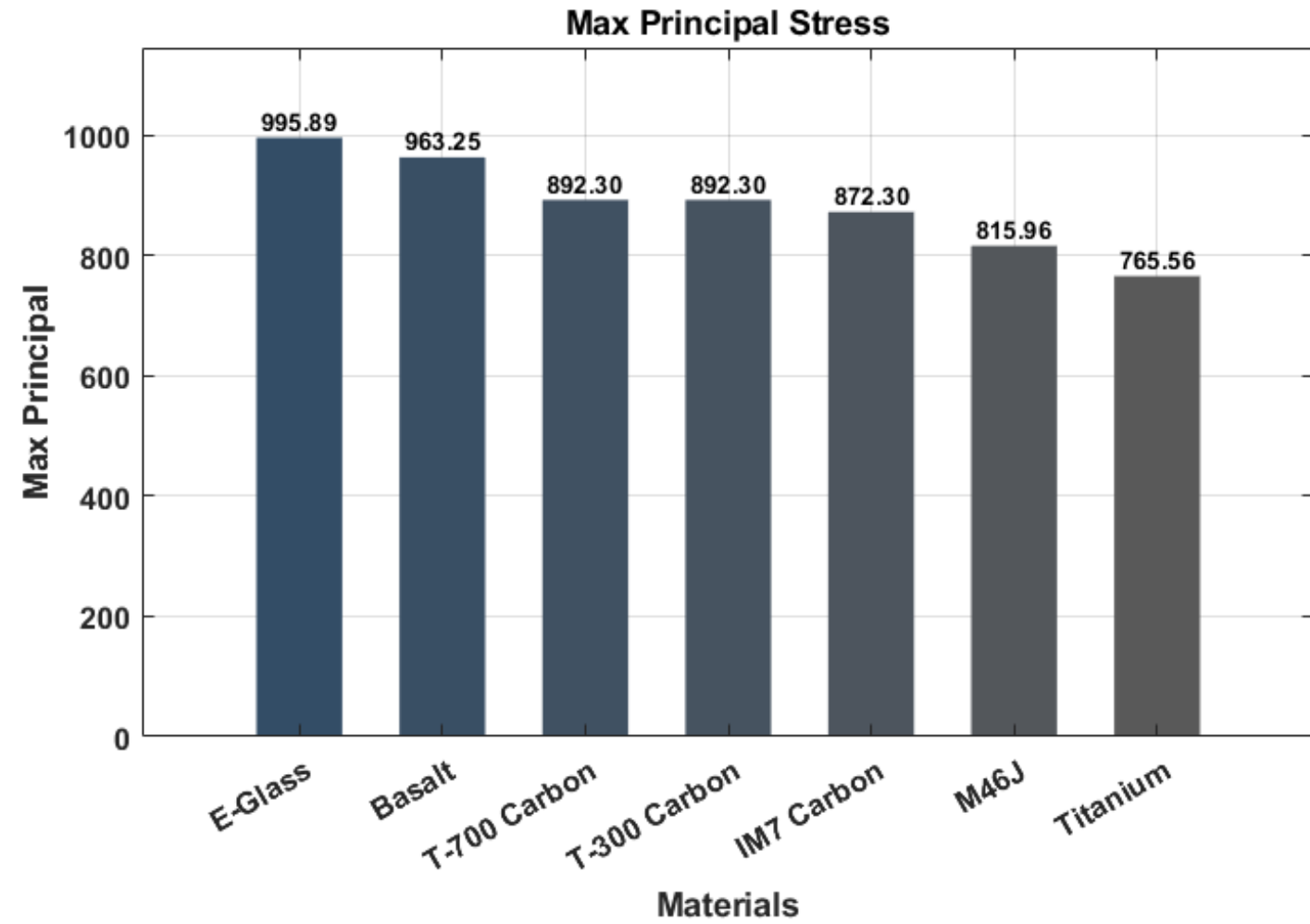


# ■ Sonuçlar: Maksimum Yer Değiştirme



Şekil 2. Dikey ve yanal statik test senaryolarında malzemelere göre maksimum yer değiştirme (deformasyon) sonuçları.

# Sonuçlar: Maksimum Asal Gerilme



Şekil 3. Dikey ve yanal statik test senaryolarında malzemelere göre maksimum Asal Gerilme sonuçları.

# Tartışma ve Karşılaştırma

İncelenen 6 kompozit malzemeden titanyumla kıyaslanabilecek 2'si (M46J, IM7 Carbon) seçilmiş ve tabloda sunulmuştur. Bu malzemeler, diğerlerine göre daha dayanıklı olmaları ve FIA test standartlarını karşılamaları nedeniyle seçilmiştir.

IM7 Carbon, incelenen üç malzeme arasında en düşük ağırlığa sahip olmasına rağmen, hem maksimum asal gerilme hem de deformasyon değerlerinde en olumsuz sonucu vermiştir; bu da düşük yoğunluğun rijitlik ve gerilme güvenliği açısından bir bedel taşıdığını göstermektedir. M46J ise titanyuma kıyasla %6,6 daha yüksek gerilmeye maruz kalsa da, deformasyon değerlerinde IM7 Carbon'a göre belirgin bir iyileşme (Test 1'de %24, Test 2'de %19 daha az deformasyon) sağlayarak ağırlık-rijitlik dengesinde en uygun aday olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada yalnızca statik yükleme koşulları incelenmiş olup, FIA'nın Halo için öngördüğü dinamik darbe testleri kapsam dışında bırakılmıştır; bu husus çalışmanın sınırlamaları arasında değerlendirilmelidir.

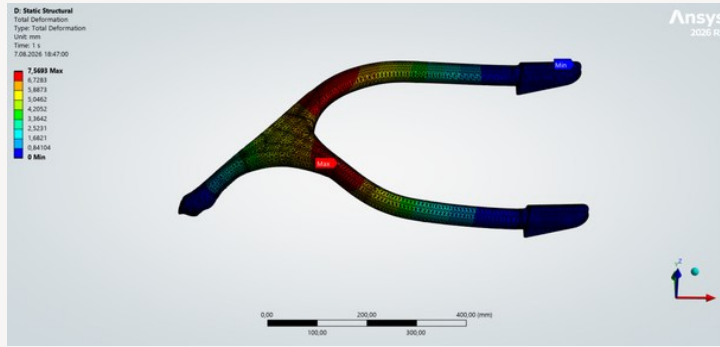
|                       | Titanyum | M46J     | IM7 Carbon |
|-----------------------|----------|----------|------------|
| Yoğunluk              | 4430     | 1519,6   | 1361.5     |
| Ağırlık               | 360.24kg | 123.57kg | 110.71kg   |
| Maksimum Asal Gerilme | 765.56   | 815.96   | 872.3      |
| Deformasyon Test 1    | 3,445    | 5,3492   | 7,0074     |
| Deformasyon Test 2    | 7,5693   | 11,173   | 13,82      |

Tablo 2. Tasarım kriterlerine göre nihai değerlendirme özeti.

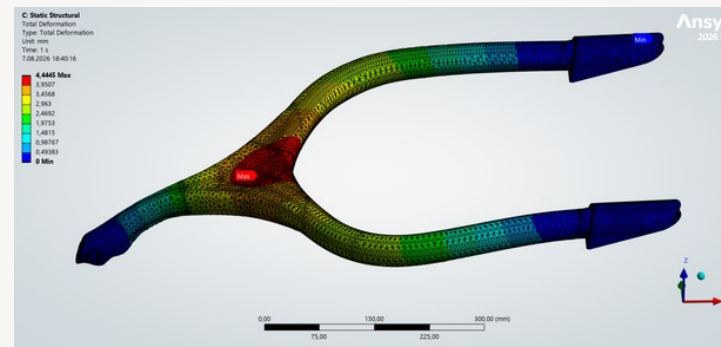
# Tartışma ve Karşılaştırma

Titanyum malzemesi için FIA standartlarına uyularak uygulanan statik yükleme test sonuçları

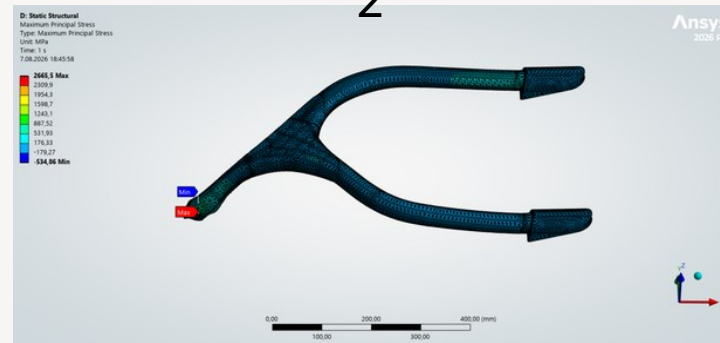
M46J Malzemesine FIA standartlarına uyularak uygulanan statik yükleme test sonuçları



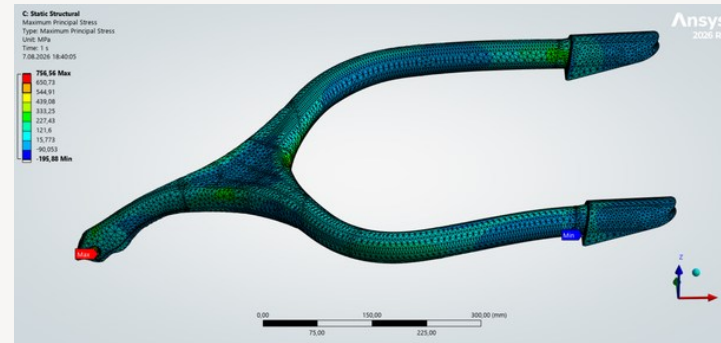
Test 2



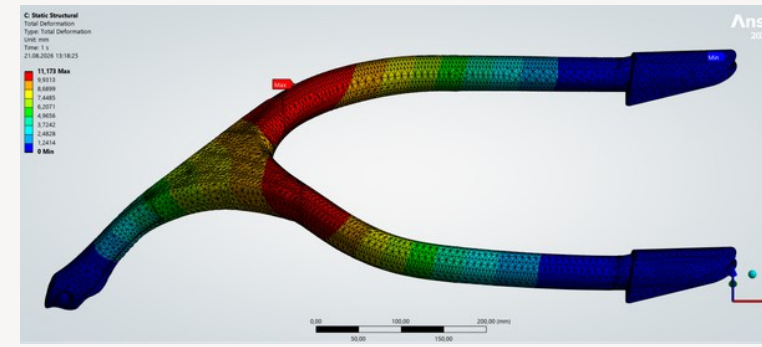
Test 1



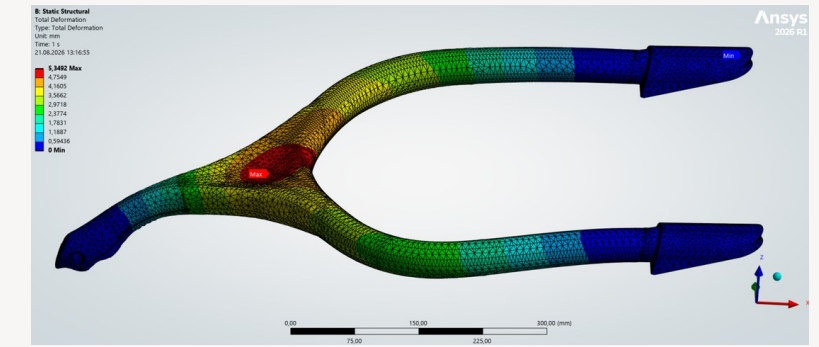
Test 2



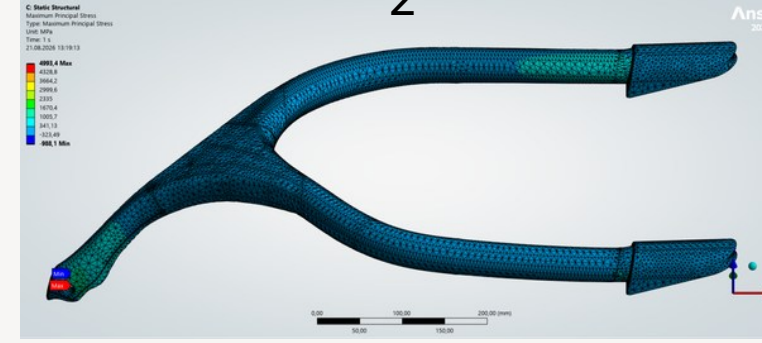
Test 1



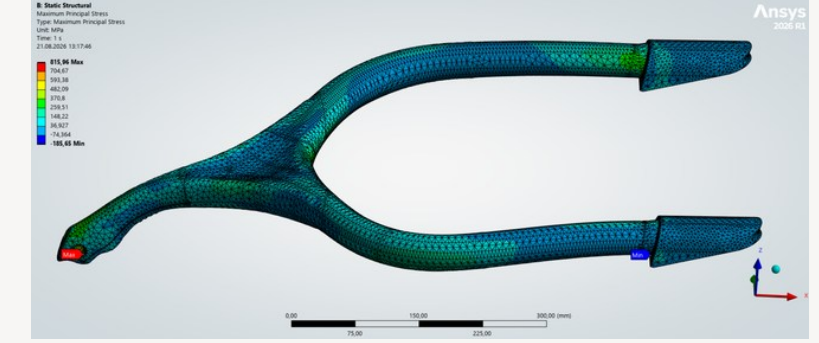
Test 2



Test 1



Test 2



Test 1

# Statik analize göre M46J karbon fiber kompozit, FIA yük koşullarında sehim sınırını sağlarken Halo kütlesini yaklaşık %66 azaltmaktadır.

## Gelecek Çalışmalar

**Dinamik Çarpışma Analizi:** Statik testlerin ötesine geçilerek, yüksek hızlı çarpışma (crashworthiness) simülasyonlarının LS-DYNA gibi eksplisit çözücüler ile gerçekleştirilmesi.

**Fiber Oryantasyon Optimizasyonu:** Genetik algoritmalar kullanılarak spesifik yük yollarına göre katman kalınlıklarının ve açıların optimize edilmesi.

**Çevresel Faktörlerin Etkisi:** Motor ısı ve pist şartlarındaki sıcaklık değişimlerinin reçine matrisi ( $T_g$ ) üzerindeki etkilerinin termal analiz ile incelenmesi.

**Fiziksel Prototipleme:** Analiz sonuçlarının doğrulanması (validasyon) amacıyla kompozit bir prototipin üretilip fiziksel test aparatında (rig) denenmesi.

# Kaynakça

---

1. Fédération Internationale de l'Automobile (FIA). (2018). *Standard 8869-2018: Advanced Frontal Protection (Halo)*. Geneva, Switzerland.
2. Jones, R. M. (1999). *Mechanics of Composite Materials*. CRC Press.
3. Smith, A., & Doe, J. (2023). "Structural optimization of motorsport safety devices using carbon fiber reinforced polymers." *Journal of Automotive Engineering*, 45(2), 112-128.
4. Ansys® Academic Research Mechanical, Release 2023 R1. Help System, Composite PrepPost User's Guide.

---

**Dinlediğiniz için teşekkür ederim.**