Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 14(3): 1369-1378 (2026)

Yüksek basınçlı kompozit hidrojen tankının sonlu elemanlar yöntemiyle yapısal analizi

Ramazan ÖZKAN[1,2*], İbrahim Deniz YANCI[1]

[1]*Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Muğla, Türkiye*

[2] *Rüzgâr Mühendisliği ve Aerodinamik Araştırma Laboratuvarı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38039 Kayseri, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/05/2026
Düzeltme: 01/06/2026
Kabul: 07/06/2026

Anahtar Kelimeler

Hidrojen
Kompozit
Sonlu elemanlar

Article info

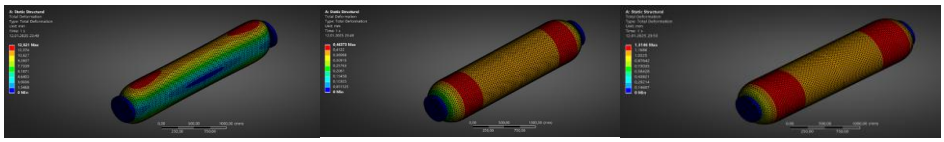
Research article
Received: 23/05/2026
Revision: 01/06/2026
Accepted: 07/06/2026

Keywords

Hydrogen
Composite
Finite elements

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada yüksek basınçlı bir hidrojen tankının yapısal davranışı sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Karbon fiber, paslanmaz çelik ve cam elyafı malzemeleri 750 bar iç basınç altında karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, paslanmaz çeliğin en yüksek rijitliği, karbon fiberin en yüksek özgül mukavemeti ve cam elyafının ise dengeli maliyet-performans avantajı sunduğunu göstermiştir. / In this study, the structural behavior of a high-pressure hydrogen tank was investigated using the finite element method. Carbon fiber, stainless steel, and glass fiber materials were compared under an internal pressure of 750 bar. The results showed that stainless steel exhibited the highest rigidity, carbon fiber the highest specific strength, and glass fiber offered a balanced cost-performance advantage.



Şekil A / Figure A: *Karbon Fiber - Paslanmaz çelik - Cam elyafı toplam deformasyon analizi / Total deformation analysis of carbon fiber - stainless steel - glass fiber*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Karbon fiber en yüksek özgül mukavemet ve hafiflik avantajını göstermiştir. / Carbon fiber has demonstrated the advantage of having the highest specific strength and lightness.*
- *Paslanmaz çelik en düşük deformasyon değerlerini sağlayarak en rijit yapı davranışını sergilemiştir. / Stainless steel exhibits the most rigid structural behavior by providing the lowest deformation values.*
- *Cam elyafı maliyet ve performans açısından dengeli bir alternatif olarak öne çıkmıştır. /Glass fiber had emerged as a balanced alternative in terms of cost and performance.*

Amaç (Aim): *Karbon fiber, paslanmaz çelik ve cam elyafı malzemelerinin yüksek basınçlı hidrojen tanklarının yapısal performansı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemek ve en uygun malzeme özelliklerini değerlendirmektir. / The aim of this study is to comparatively investigate the effects of carbon fiber, stainless steel, and glass fiber materials on the structural performance of high-pressure hydrogen storage tanks and to evaluate the most suitable material characteristics.*

Özgünlük (Originality): *Bu çalışmada üç farklı malzeme aynı tank geometrisi ve aynı yükleme koşulları altında değerlendirilmiş, böylece malzeme seçiminin hidrojen tanklarının yapısal davranışı üzerindeki etkileri doğrudan karşılaştırılmıştır. / In this study, three different materials were evaluated under the same tank geometry and identical loading conditions, allowing the direct comparison of the effects of material selection on the structural behavior of hydrogen storage tanks.*

Bulgular (Results): *Karbon fiber modeli yüksek deformasyon değerlerine rağmen üstün mukavemet/ağırlık oranı sağlamıştır. Paslanmaz çelik modeli en düşük deformasyon ve gerinim değerlerini göstererek en yüksek yapısal kararlılığı sunmuştur. Cam elyafı, mekanik performans ve maliyet açısından iki malzeme arasında dengeli bir davranış sergilemiştir. / The carbon fiber model provided a superior strength-to-weight ratio despite exhibiting higher deformation values. The stainless-steel model demonstrated the highest structural stability by showing the lowest deformation and strain values. The glass fiber model exhibited a balanced behavior between the two materials in terms of mechanical performance and cost.*

Sonuç (Conclusion): *Karbon fiber hafif ve yüksek performanslı uygulamalar için, paslanmaz çelik maksimum yapısal güvenlik için, cam elyafı ise ekonomik depolama sistemleri için uygun bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. / Carbon fiber is suitable for lightweight, high-performance applications, stainless steel for maximum structural safety, and glass fiber as a cost-effective alternative for storage systems.*

*Corresponding author, e-mail: ramazanozkan@mu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc. 1957798

GU J Sci, Part C, 14(3): 1369-1378 (2026)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Yüksek basınçlı kompozit hidrojen tankının sonlu elemanlar yöntemiyle yapısal analizi

Ramazan ÖZKAN[1,2*], İbrahim Deniz YANCI[1]

[1]*Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Muğla, Türkiye*

[2] *Rüzgar Mühendisliği ve Aerodinamik Araştırma Laboratuvarı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38039 Kayseri, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/05/2026
Düzeltme: 01/06/2026
Kabul: 07/06/2026

Anahtar Kelimeler

Hidrojen
Kompozit
Sonlu elemanlar

Öz

Hidrojen, temiz enerji sistemlerinde yüksek potansiyele sahip bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojenin güvenli biçimde depolanabilmesi için yüksek basınçlı tankların yapısal dayanımı kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, yüksek basınçlı kompozit bir hidrojen tankının farklı malzemeler altındaki yapısal davranışı sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Tank geometrisi ANSYS DesignModeler ortamında oluşturulmuş, statik yapısal analizler ANSYS Workbench kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde karbon fiber, paslanmaz çelik ve cam elyafı olmak üzere üç farklı malzeme değerlendirilmiş; toplam deformasyon, eşdeğer elastik gerinim ve eşdeğer gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre karbon fiber yüksek mukavemet ve hafiflik avantajı ile öne çıkarken, paslanmaz çelik en düşük deformasyon ve gerinim değerleriyle daha rijit bir davranış sergilemiştir. Cam elyafı ise karbon fiber ve paslanmaz çelik arasında dengeli bir performans göstererek maliyet-performans açısından alternatif bir malzeme olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, yüksek basınçlı hidrojen tanklarının malzeme seçimi ve yapısal tasarım süreçlerinde sonlu elemanlar analizinin etkili bir değerlendirme aracı olduğunu göstermektedir.

Structural analysis of a high-pressure composite hydrogen tank using finite element method

Article Info

Research article
Received: 23/05/2026
Revision: 01/06/2026
Accepted: 07/06/2026

Keywords

Hydrogen
Composite
Finite elements

Abstract

Hydrogen is an energy carrier with significant potential for clean energy systems. The structural strength of high-pressure tanks is critical for the safe storage of hydrogen. In this study, the structural behaviour of a high-pressure composite hydrogen tank under different material configurations was investigated using the finite element method. The tank geometry was created in ANSYS DesignModeler, and static structural analyses were performed using ANSYS Workbench. Three different materials, namely carbon fiber, stainless steel and glass fiber, were evaluated, and total deformation, equivalent elastic strain and equivalent stress values were compared. The results showed that carbon fiber stands out due to its high strength and lightweight structure, while stainless steel exhibited a more rigid behaviour with the lowest deformation and strain values. Glass fiber demonstrated a balanced performance between carbon fiber and stainless steel and was considered an alternative material in terms of cost-performance balance. The findings indicate that finite element analysis is an effective tool for evaluating material selection and structural design processes in high-pressure hydrogen tanks.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Küresel enerji talebindeki hızlı artış, fosil yakıt rezervlerinin azalması ve karbon emisyonlarının çevresel etkileri, sürdürülebilir enerji teknolojilerine olan ilgiyi önemli ölçüde artırmıştır [1]. Bu kapsamda hidrojen, yüksek enerji yoğunluğu, çevreci yapısı ve yenilenebilir enerji sistemleriyle birlikte kullanılabilme potansiyeli sayesinde geleceğin en önemli enerji taşıyıcılarından biri olarak değerlendirilmektedir [2]. Hidrojenin yanma sonucunda yalnızca su açığa çıkarması ve karbon bazlı emisyon oluşturmaması, özellikle ulaşım ve enerji depolama sistemlerinde

*Corresponding author, e-mail: ramazanozkan@mu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc. 1957798

önemli avantajlar sağlamaktadır [3]. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi kullanılarak üretilebilmesi, hidrojenin sürdürülebilir enerji dönüşümündeki rolünü daha da artırmaktadır [4].

Hidrojen enerjisinin yaygınlaşabilmesi için üretim, taşıma ve depolama süreçlerinin güvenli ve verimli şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir [5]. Hidrojen depolama yöntemleri arasında yüksek basınçlı gaz depolama sistemleri; yüksek enerji yoğunluğu, hızlı dolum imkânı ve uygulama kolaylığı nedeniyle öne çıkmaktadır [6]. Bu sistemler özellikle yakıt hücreli araçlar, taşınabilir enerji sistemleri ve şebeke destekli enerji depolama uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. Ancak hidrojenin düşük moleküler yapıya sahip olması, yüksek difüzyon kabiliyeti göstermesi ve yüksek basınç altında depolanması, tank tasarımında güvenlik ve yapısal dayanım kriterlerini kritik hale getirmektedir [8]. Bu nedenle hidrojen tanklarının yüksek basınç altında göstereceği mekanik davranışların ayrıntılı biçimde incelenmesi büyük önem taşımaktadır.

Yüksek basınçlı hidrojen tankları genellikle çok katmanlı yapılardan oluşmaktadır. Tankın iç kısmında hidrojen geçirgenliğini azaltan metalik veya polimerik bir astar bulunurken, dış katmanlarda karbon fiber veya cam elyafı gibi kompozit malzemeler kullanılarak mekanik dayanım artırılmaktadır [9]. Kullanılan malzemeler tankın mukavemeti, ağırlığı, güvenliği ve maliyeti üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Özellikle karbon fiber takviyeli kompozitler yüksek mukavemet/ağırlık oranı sayesinde hafiflik avantajı sağlarken, paslanmaz çelik yüksek rijitlik ve dayanım özellikleriyle öne çıkmaktadır. Cam elyafı ise daha düşük maliyetli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir [10]. Bu nedenle farklı malzemelerin yüksek basınç altındaki davranışlarının karşılaştırmalı olarak incelenmesi, optimum tank tasarımı açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

Literatürde hidrojen depolama tanklarının yapısal davranışlarını inceleyen çalışmalar incelendiğinde; Senthil Kumar ve diğ. [11], farklı malzemeler kullanılarak hidrojen tanklarının yapısal analizlerini gerçekleştirmiş ve kompozit yapıların yüksek mukavemet ve düşük ağırlık açısından önemli avantajlar sunduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde Yuan ve Liu [12], Tip-IV hidrojen tanklarının hızlı dolum ve boşaltım sırasında maruz kaldığı mekanik ve termal yükleri inceleyerek özellikle sıcaklık değişimlerinin gerilme yoğunlaşmalarını artırdığını ifade etmiştir. He ve diğ. [13] ise karbon fiber takviyeli çok katmanlı kompozit yapıların tank ağırlığını önemli ölçüde azaltırken yapısal dayanımı koruyabildiğini göstermiştir. Ayrıca lif yönlenmesinin gerilme dağılımı üzerinde doğrudan etkili olduğu vurgulanmıştır. Gomez ve Smith [14] tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise sıvı hidrojen tanklarının yapısal davranışları incelenmiş ve kriyojenik koşullar altında hafif kompozit yapıların havacılık uygulamaları açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, araştırmaların çoğunlukla kompozit yapıların hafifletilmesi, termal etkiler ve filament sarım optimizasyonu üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Bununla birlikte farklı malzemelerin aynı tank geometrisi ve aynı yükleme koşulları altında karşılaştırmalı olarak incelendiği çalışmaların sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Bu nedenle mevcut çalışmada karbon fiber, paslanmaz çelik ve cam elyafı malzemeleri aynı analiz koşulları altında değerlendirilmiş ve malzeme seçiminin yüksek basınçlı hidrojen tanklarının yapısal performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

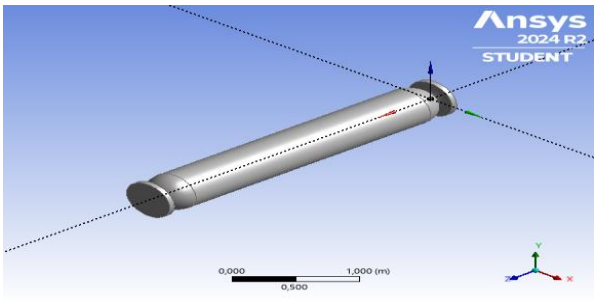
2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Yapısal tasarım (Structural design)

Bu çalışmada yüksek basınçlı kompozit hidrojen tankının yapısal davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Tank geometrisi, yüksek basınç altında güvenli çalışma koşullarını temsil edecek şekilde modellenmiş ve analizler ANSYS Workbench ortamında gerçekleştirilmiştir [15]. Tank yapısı silindirik ana gövde ve destek elemanlarından oluşmaktadır. Silindirik geometri, iç basıncın tank yüzeyine daha homojen dağılmasını sağladığı için yüksek basınçlı depolama sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Tankın dış çapı 50 cm, toplam uzunluğu ise 300 cm olarak modellenmiştir. Tank iç hacmi yaklaşık 300 litre olup, çalışma koşullarında yüksek basınçlı hidrojen depolayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Tank cidar kalınlığı 4 cm olarak belirlenmiş ve yüksek basınç altında yeterli yapısal dayanım sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Destek elemanları ise tankın stabilitesini artırmak amacıyla katı yapı şeklinde modellenmiştir. Tank

geometrisinin üç boyutlu modeli ve destek elemanlarının üç boyutlu görünümü sırasıyla Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Hidrojen tankının üç boyutlu tasarımı
(Three-dimensional design of the hydrogen tank)

2.2. Malzeme modelleri (material models)

Yüksek basınçlı hidrojen tankının yapısal performansını değerlendirmek amacıyla üç farklı malzeme modeli kullanılmıştır. Analizlerde karbon fiber, paslanmaz çelik ve cam elyafı malzemeleri tercih edilmiş ve tüm analizlerde tank geometrisi sabit tutulmuştur. Böylece yalnızca malzeme değişiminin yapısal davranış üzerindeki etkisi incelenmiştir.

İlk modelde karbon fiber malzemesi kullanılmıştır. Karbon fiber; düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve yüksek rijitlik özellikleri sayesinde özellikle basınçlı kap uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Karbon fiber malzeme analizlerde ortotropik malzeme modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Ortotropik malzemelerde mekanik özellikler lif doğrultusuna bağlı olarak değişmekte olup, malzeme farklı yönlerde farklı rijitlik ve dayanım davranışı göstermektedir. Tablo 1'de görüldüğü üzere karbon fiber malzemenin lif doğrultusundaki elastisite modülü, diğer doğrultulara göre önemli ölçüde daha yüksektir. Bu durum, yüklerin lif yönünde daha etkin taşınmasını sağlarken, liflere dik doğrultularda daha düşük rijitlik davranışının oluşmasına neden olmaktadır.

Tablo 1. Karbon Fiber Malzeme Özellikleri
(Carbon Fiber Material Properties) [15]

ÖZELLIK	DEĞER	BIRIM
Yoğunluk	1800,0	kg/m³
X Yönündeki Young Modülü	3,95 e+11	Pa
Y Yönündeki Young Modülü	6 e+09	Pa
Z Yönündeki Young Modülü	6 e+09	Pa
XY Poisson Oranı	0,20000	
YZ Poisson Oranı	0,40000	
XZ Poisson Oranı	0,20000	
XY Kayma Modülü	8 e+09	Pa
YZ Kayma Modülü	2,1429 e+09	Pa
XZ Kayma Modülü	8 e+09	Pa

İkinci modelde paslanmaz çelik kullanılmıştır. Paslanmaz çelik yüksek mekanik dayanım ve korozyon direnci nedeniyle basınçlı tank uygulamalarında önemli bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte yüksek yoğunluğu nedeniyle ağırlık dezavantajı oluşturmaktadır. Analizlerde kullanılan paslanmaz çelik malzeme özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Paslanmaz Çelik Malzeme Özellikleri
(Stainless Steel Material Properties) [15]

ÖZELLIK	DEĞER	BIRIM
Yoğunluk	7750,0	kg/m³
Young Modülü	1,93 e+11	Pa
Poisson Oranı	0,31000	
Hacim Modülü	1,693 e+11	Pa
Kayma Modülü	7,3664 e+10	Pa
İzotropik Sekant Isıl Genleşme Katsayısı	1,7 e-05	1/°C

Üçüncü modelde cam elyafı malzemesi kullanılmıştır. Cam elyafı, karbon fiber kadar yüksek mukavemet sunmamasına rağmen düşük maliyet ve yeterli mekanik dayanım özellikleri nedeniyle alternatif bir kompozit malzeme olarak tercih edilmektedir. Analizlerde kullanılan cam elyafı malzeme özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Cam Elyafı Malzeme Özellikleri
(Fiberglass Material Properties) [15]

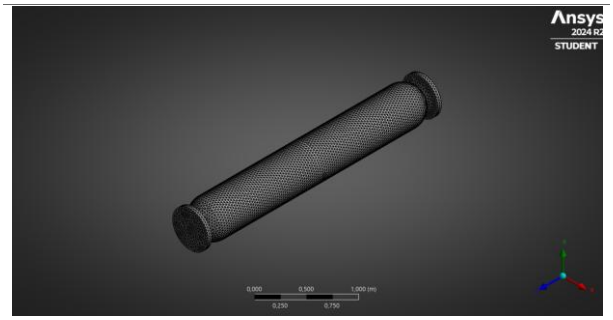
ÖZELLIK	DEĞER	BIRIM
Yoğunluk	2600,0	kg/m³
Young Modülü	7,3 e+10	Pa
Poisson Oranı	0,22000	
Hacim Modülü	4,3452 e+10	Pa
Kayma Modülü	2,9918 e+10	Pa
İzotropik Sekant Isıl Genleşme Katsayısı	5 e-06	1/°C

2.3. Mesh Yapısı (Mesh Structure)

Sonlu elemanlar analizlerinde doğru sonuçlar elde edebilmek için uygun mesh yapısının oluşturulması büyük önem taşımaktadır [16-17]. Bu nedenle analizler öncesinde mesh bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında üç farklı mesh yoğunluğu kullanılarak maksimum toplam deformasyon değerleri karşılaştırılmıştır. Farklı mesh seviyelerine ait eleman sayıları ve elde edilen sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Nihai mesh yapısı Şekil 2'de gösterilmektedir.

Tablo 4. Mesh Bağımsızlık Çalışması Sonuçları (Results of the Mesh Sensitivity Analysis)

Mesh Yapısı	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı	Maksimum Toplam Deformasyon (mm)
Mesh-1 (Kaba)	42687	78478	12,525
Mesh-2 (Orta)	91874	162485	13,625
Mesh-3 (İnce)	168545	294487	13,921

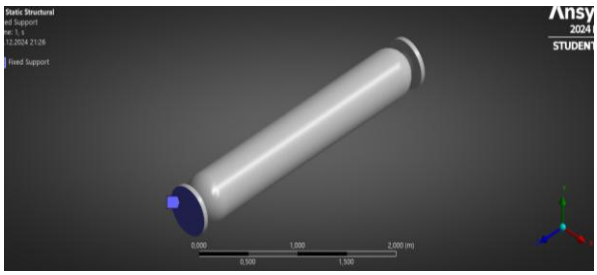


Şekil 2. Mesh yapısı (Mesh structure)

2.4. Statik Yapısal Analiz (Static Structural Analysis)

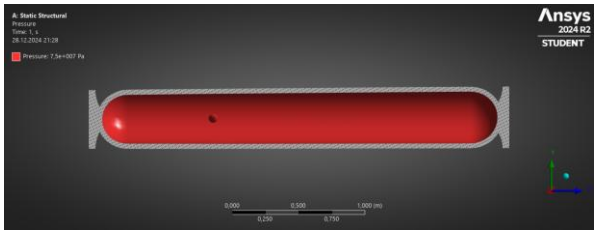
Yapısal analizler ANSYS Static Structural modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Statik yapısal analiz yöntemi, sabit yükler altında yapıların mekanik davranışlarını incelemek amacıyla kullanılmaktadır [17]. Analizlerde toplam deformasyon, eşdeğer elastik gerinim ve eşdeğer gerilme sonuçları değerlendirilmiştir.

Tankın destek bölgeleri sabit mesnet olarak tanımlanmıştır. Böylece destek noktalarının tüm doğrultulardaki hareketleri kısıtlanmış ve gerçek çalışma koşullarına uygun sınır şartları oluşturulmuştur. Sabit destek bölgeleri Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Sabit destek bölgeleri (Fixed support regions)

Tankın yapısal dayanımını incelemek amacıyla iç yüzeye yüksek basınç yükü uygulanmıştır. Bu ölçülerdeki hidrojen tanklarının nominal çalışma basıncı genellikle 500 bar seviyesinde olmasına rağmen, güvenlik sınırlarının değerlendirilebilmesi amacıyla analizlerde 750 bar basınç değeri kullanılmıştır. Hidrojen depolama sistemlerinde kullanılan uluslararası standartlar ve endüstriyel uygulamalarda, tankların yalnızca nominal çalışma basıncı altında değil, daha yüksek basınç seviyelerinde de güvenlik açısından değerlendirilmesi önerilmektedir. Bu nedenle çalışmada nominal çalışma basıncının yaklaşık 1,5 katına karşılık gelen 750 bar değeri seçilmiş ve tankın aşırı yükleme koşulları altındaki yapısal davranışı incelenmiştir. Böylece tasarımın güvenlik rezervi ve yüksek basınç altındaki mekanik dayanımı daha muhafazakâr bir yaklaşımla değerlendirilmiştir [18].



Şekil 4. İç basınç uygulama bölgesi (Internal pressure application region)

2.5. Sayısal Değerlendirme Parametreleri (Numerical Evaluation Parameters)

Analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde toplam deformasyon, eşdeğer elastik gerinim ve eşdeğer gerilme parametreleri kullanılmıştır. Toplam deformasyon, yapının yük altında maruz kaldığı toplam yer değiştirme miktarını göstermektedir. Eşdeğer elastik gerinim, malzemenin elastik bölgedeki deformasyon seviyesini ifade ederken, eşdeğer gerilme ise yapının yük altında ne kadar zorlandığını belirlemek amacıyla kullanılan temel kriterlerden biridir. Bu parametreler kullanılarak

farklı malzemelerin yüksek basınç altındaki yapısal performansları karşılaştırılmıştır.

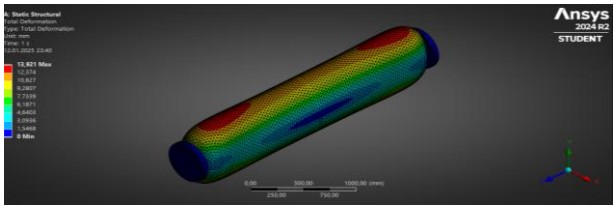
3. BULGULAR (RESULTS)

Bu çalışmada yüksek basınçlı kompozit hidrojen tankının yapısal davranışı ANSYS Workbench ortamında gerçekleştirilen statik yapısal analizler ile incelenmiştir. Analizlerde tank içerisine 750 bar (75 MPa) iç basınç uygulanmış ve farklı malzeme modellerinin mekanik davranışları karşılaştırılmıştır. Yapısal performans değerlendirmesinde toplam deformasyon, eşdeğer elastik gerinim ve eşdeğer gerilme parametreleri dikkate alınmıştır. Karbon ve cam fiber hem hafif hem de mukavim bir malzeme olup [19-20]; karbon fiber, cam fiber ve paslanmaz çelik malzemeleri kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen bulgular, malzeme seçiminin yüksek basınçlı hidrojen tanklarının güvenliği ve dayanımı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

Analiz sonuçları incelendiğinde, farklı malzemelerin elastik davranış, rijitlik ve yük taşıma kapasitesi açısından belirgin farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Özellikle düşük yoğunluğa sahip kompozit malzemelerin yüksek basınç altında daha fazla deformasyon gösterdiği, buna karşılık metalik yapıların daha rijit bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Bununla birlikte yalnızca deformasyon miktarı değil, malzemenin özgül dayanımı ve ağırlık avantajı da değerlendirme kriteri olarak ele alınmalıdır.

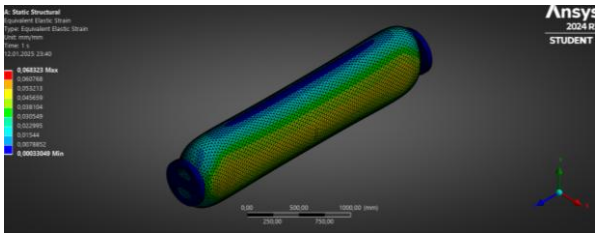
3.1. Karbon Fiber Modeli (Carbon Fiber Model)

Karbon fiber malzeme kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde maksimum toplam deformasyon değeri 13,921 mm olarak elde edilmiştir. Toplam deformasyon dağılımı incelendiğinde maksimum yer değiştirmelerin tankın orta bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Karbon fiberin yüksek elastik davranış göstermesi nedeniyle diğer modellere kıyasla daha yüksek deformasyon oluşmuştur. Bununla birlikte bu durum doğrudan yapısal yetersizlik anlamına gelmemektedir. Karbon fiber kompozitler yüksek özgül mukavemetleri sayesinde yüksek basınç altında önemli ölçüde enerji sönümleme kapasitesine sahiptir.



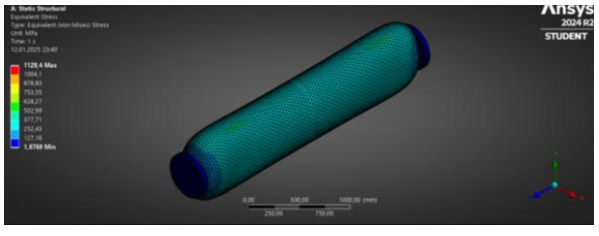
Şekil 5. Karbon fiber toplam deformasyon analizi (Total deformation analysis of the carbon fiber)

Karbon fiber modelinde elde edilen maksimum eşdeğer elastik gerinim değeri 0,068323 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, karbon fiberin elastik sınırlar içerisinde yüksek şekil değiştirme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Kompozit yapıların lif yönlenmesine bağlı olarak yükleri farklı doğrultularda taşıyabilmesi, yüksek gerinim seviyelerine rağmen yapısal bütünlüğün korunmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 6. Karbon fiber eşdeğer elastik gerinim analizi (Equivalent elastic strain analysis of the carbon fiber)

Karbon fiber modelinde maksimum eşdeğer gerilme değeri 1129,4 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer diğer malzemelere göre oldukça yüksek olmakla birlikte karbon fiberin yüksek dayanım kapasitesine bağlı olarak değerlendirildiğinde yapının yüksek basınç altında etkin bir yük taşıma davranışı gösterdiği söylenebilir. Literatürde karbon fiber takviyeli kompozit tankların yüksek basınçlı hidrojen depolama uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmesinin temel nedeni de yüksek mukavemet/ağırlık oranıdır.



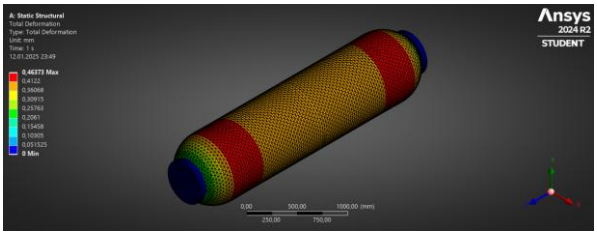
Şekil 7. Karbon fiber eşdeğer gerilme analizi (Equivalent stress analysis of the carbon fiber)

Karbon fiber modelinde gözlenen yüksek deformasyon değerleri, malzemenin esnek yapısından kaynaklanmaktadır. Bu durum bazı uygulamalarda darbe dayanımı açısından avantaj

sağlayabilirken, uzun süreli kullanım ve yorulma davranışı açısından ek tasarım optimizasyonlarını gerekli hale getirebilir. Özellikle katman dizilimi, lif yönlenmesi ve hibrit kompozit kullanımı gibi yöntemlerle deformasyon davranışının iyileştirilebileceği değerlendirilmektedir.

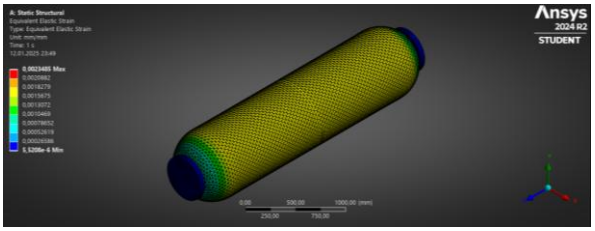
3.2. Paslanmaz Çelik Modeli (Stainless Steel Model)

Paslanmaz çelik kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde maksimum toplam deformasyon değeri 0,46373 mm olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, paslanmaz çeliğin yüksek rijitlik özelliğine sahip olduğunu ve yüksek basınç altında oldukça sınırlı deformasyon gösterdiğini ortaya koymaktadır.



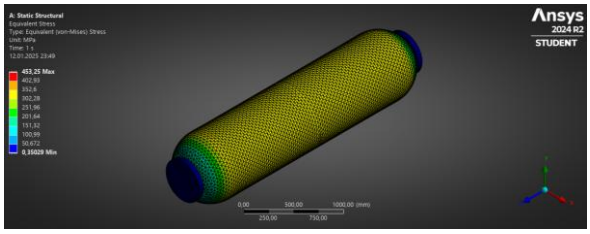
Şekil 8. Paslanmaz çelik toplam deformasyon analizi (Total deformation analysis of the stainless steel)

Paslanmaz çelik modelinde elde edilen maksimum eşdeğer elastik gerinim değeri 0,0023485 olarak belirlenmiştir. Gerinim değerlerinin düşük olması, yapının elastik deformasyon sınırları içerisinde daha kararlı bir davranış sergilediğini göstermektedir. Çelik malzemelerin yüksek elastisite modülüne sahip olması, yapısal rijitliği artırarak şekil değişimini önemli ölçüde sınırlandırmaktadır.



Şekil 9. Paslanmaz çelik eşdeğer elastik gerinim analizi (Equivalent elastic strain analysis of the stainless steel)

Paslanmaz çelik modelinde maksimum eşdeğer gerilme değeri 453,25 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer karbon fiber modeline göre daha düşük seviyede gerçekleşmiştir. Bunun temel nedeni paslanmaz çeliğin yüksek rijitliği sayesinde yükleri daha homojen dağıtabilmesidir.

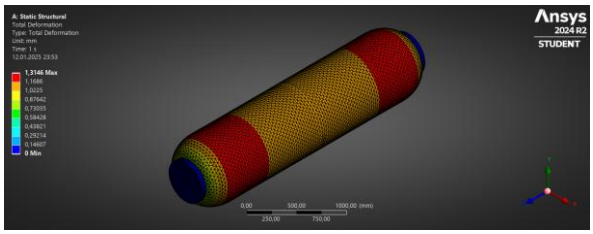


Şekil 10. Paslanmaz çelik eşdeğer gerilme analizi (Equivalent stress analysis of the stainless steel)

Elde edilen sonuçlar paslanmaz çeliğin yüksek basınç altında oldukça güvenli ve kararlı bir yapı sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte paslanmaz çeliğin yoğunluğunun yüksek olması, tankın toplam ağırlığını önemli ölçüde artırmaktadır. Özellikle mobil hidrojen depolama sistemlerinde ağırlık kritik bir parametre olduğundan, paslanmaz çelik yapılar enerji verimliliği açısından dezavantaj oluşturabilmektedir.

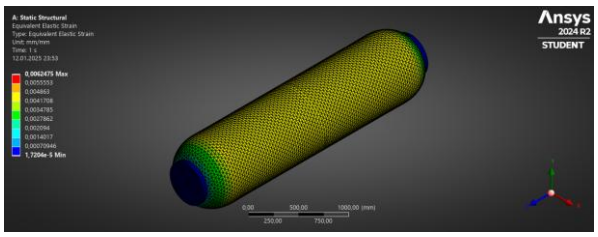
3.3. Cam Elyafı Modeli (Fiberglass Model)

Cam elyafı kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde maksimum toplam deformasyon değeri 1,3146 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer karbon fiber ve paslanmaz çelik arasında bir davranış sergilemektedir. Cam elyafı, kompozit yapıya sahip olması nedeniyle metalik malzemelere göre daha yüksek deformasyon göstermesine rağmen karbon fiber kadar esnek bir davranış oluşturmamıştır.



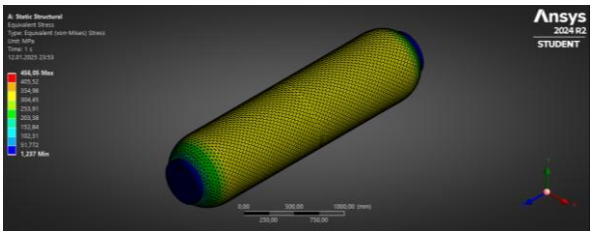
Şekil 11. Cam elyafı toplam deformasyon analizi (Total deformation analysis of the fiberglass)

Cam elyafı modelinde maksimum eşdeğer elastik gerinim değeri 0,0062475 olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, cam elyafının belirli bir elastik deformasyon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle orta seviyedeki basınçlı sistemlerde cam elyafı malzemelerin yeterli mekanik performans sağlayabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 12. Cam elyafı eşdeğer elastik gerinim analizi (Equivalent elastic strain analysis of the fiberglass)

Cam elyafı modelinde maksimum eşdeğer gerilme değeri 456,05 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer paslanmaz çelik ile oldukça benzer seviyede gerçekleşmiştir. Ancak cam elyafının yoğunluğunun daha düşük olması, ağırlık açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.



Şekil 13. Cam elyafı eşdeğer gerilme analizi (Equivalent stress analysis of the fiberglass)

Cam elyafı malzemesi maliyet-performans dengesi açısından değerlendirildiğinde önemli avantajlar sunmaktadır. Karbon fiber kadar yüksek maliyetli olmaması ve metalik yapılara göre daha hafif olması nedeniyle özellikle ekonomik hidrojen depolama sistemlerinde alternatif bir çözüm olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte yüksek basınçlı uygulamalarda uzun dönem yorulma davranışı ve hasar mekanizmalarının daha ayrıntılı incelenmesi gerekmektedir.

Farklı malzemeler kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçları karşılaştırıldığında, her malzemenin belirli avantaj ve dezavantajlara sahip olduğu görülmektedir. Analiz sonuçlarının genel karşılaştırması Tablo 3.1'de verilmiştir.

Karbon fiber modeli en yüksek deformasyon ve gerinim değerlerine sahip olmasına rağmen, yüksek özgül mukavemeti sayesinde yüksek basınç altında etkili bir performans göstermiştir. Özellikle ağırlığın kritik olduğu mobil hidrojen depolama sistemlerinde karbon fiber önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak yüksek deformasyon davranışı nedeniyle stabilite açısından dikkatli tasarım gerektirmektedir.

Paslanmaz çelik modeli ise en düşük deformasyon ve gerinim değerlerini göstermiştir. Bu durum paslanmaz çeliğin yüksek rijitlik ve dayanım özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Ancak yüksek yoğunluk nedeniyle sistem ağırlığını artırması, özellikle taşıma uygulamalarında dezavantaj oluşturmaktadır.

Cam elyafı modeli ise mekanik davranış açısından iki malzeme arasında dengeli bir performans göstermiştir. Özellikle maliyet ve ağırlık kriterleri birlikte değerlendirildiğinde cam elyafının ekonomik bir alternatif olabileceği görülmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, yüksek basınçlı hidrojen tanklarının tasarımında yalnızca dayanım kriterlerinin değil; ağırlık, maliyet, güvenlik ve uzun dönem kullanım davranışlarının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Mevcut çalışma, farklı malzemelerin aynı geometri ve aynı yükleme koşulları altında karşılaştırmalı olarak incelenmesi açısından literatüre katkı sağlamaktadır. Ayrıca elde edilen sonuçların gelecekte gerçekleştirilecek hibrit kompozit tank tasarımları ve optimizasyon çalışmalarına temel oluşturabileceği düşünülmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada yüksek basınçlı kompozit bir hidrojen tankının yapısal davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiş ve farklı malzemelerin tank performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Analizler ANSYS Workbench ortamında gerçekleştirilmiş olup karbon fiber, paslanmaz çelik ve cam elyafı malzemeleri için toplam deformasyon, eşdeğer elastik gerinim ve eşdeğer gerilme parametreleri incelenmiştir. Tank içerisine 750 bar basınç uygulanarak yüksek çalışma koşulları altında yapısal dayanım davranışı araştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, malzeme seçiminin yüksek basınçlı hidrojen tanklarının mekanik davranışı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir.

Tablo 5. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması (Comparison of Analysis Results)

Maksimum	Toplam Deformasyon (mm)	Eşdeğer Elastik Gerinim (mm/mm)	Eşdeğer Gerilme (MPa)
Karbon Fiber	13,921	0,068323	1129,4
Paslanmaz Çelik	0,46373	0,0023485	453,25
Cam Elyafı	1,3146	0,0062475	456,05

Karbon fiber modeli, yüksek deformasyon ve

gerinim değerleri göstermesine rağmen, yüksek özgül mukavemeti sayesinde yüksek basınç altında etkili bir yük taşıma performansı sergilemiştir. Özellikle düşük yoğunluğu sayesinde hafiflik avantajı sağlaması, karbon fiberin mobil hidrojen depolama sistemleri açısından önemli bir malzeme olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte yüksek deformasyon davranışı nedeniyle tasarım optimizasyonlarının dikkatli şekilde yapılması gerektiği değerlendirilmiştir. Paslanmaz çelik modeli ise en düşük toplam deformasyon ve eşdeğer elastik gerinim değerlerini göstermiştir. Bu durum, paslanmaz çeliğin yüksek rijitlik ve mekanik dayanım özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Yapısal stabilite açısından oldukça başarılı sonuçlar elde edilmesine rağmen, yüksek yoğunluk nedeniyle tank ağırlığının artması önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Özellikle taşıt uygulamalarında sistem ağırlığının artması enerji verimliliğini olumsuz etkileyebilmektedir. Cam elyafı modeli ise deformasyon ve gerilme davranışı açısından karbon fiber ve paslanmaz çelik arasında dengeli bir performans göstermiştir. Daha düşük maliyetli olması ve yeterli mekanik dayanım sunması nedeniyle cam elyafının ekonomik hidrojen depolama sistemleri için alternatif bir malzeme olabileceği belirlenmiştir. Ancak uzun dönem yorulma davranışı ve yüksek basınç altındaki hasar mekanizmalarının daha ayrıntılı araştırılması gerektiği düşünülmektedir.

Maksimum gerilme değerleri, analizlerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri ile birlikte değerlendirildiğinde, farklı malzemelerin yüksek basınç altındaki davranışlarının belirgin şekilde değiştiği görülmektedir. Karbon fiber malzeme yüksek özgül mukavemeti sayesinde yüksek gerilme seviyelerinde etkin bir yük taşıma kapasitesi sergilerken, paslanmaz çelik yüksek rijitliği sayesinde deformasyonların sınırlandırılmasına katkı sağlamıştır. Cam elyafı ise gerilme ve deformasyon davranışı açısından iki malzeme arasında dengeli bir performans göstermiştir. Bu sonuçlar, yüksek basınçlı hidrojen tankı tasarımında malzeme seçiminin yalnızca dayanım açısından değil, aynı zamanda rijitlik, ağırlık ve kullanım amacına bağlı performans kriterleri açısından da değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Analiz sonuçlarına göre, maksimum deformasyonların tankın silindirik gövde bölgesinde, özellikle destek etkisinin daha sınırlı olduğu orta kısımlarda yoğunlaştığı görülmüştür. Bu durum, iç basınç etkisi altında silindirik tank yapısının radyal yönde genleşme eğiliminden kaynaklanmaktadır. Eşdeğer gerilme dağılımları incelendiğinde ise gerilme yoğunlaşmalarının özellikle destek bölgeleri, bağlantı noktaları ve geometrik geçişlerin bulunduğu alanlarda arttığı belirlenmiştir. Bu bölgeler, yük aktarımının yoğunlaştığı kritik alanlar olduğundan yüksek basınçlı tank tasarımında yapısal bütünlük açısından dikkatle değerlendirilmesi gereken bölgeler olarak öne çıkmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, yüksek basınçlı hidrojen tanklarının tasarımında yalnızca mekanik dayanım kriterlerinin değil; ağırlık, maliyet, güvenlik ve üretilebilirlik gibi parametrelerin de birlikte değerlendirilmesi gerektiği görülmektedir. Çalışma sonuçları, karbon fiber malzemelerin yüksek performanslı uygulamalar için önemli avantajlar sunduğunu, paslanmaz çeliğin yüksek yapısal kararlılık sağladığını ve cam elyafının maliyet-performans dengesi açısından uygun bir alternatif oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Elde edilen bulgular, günümüzde yaygın olarak kullanılan Tip-III ve Tip-IV hidrojen tanklarının tasarım yaklaşımları ile uyumlu sonuçlar ortaya koymuştur. Kompozit malzemeler hafiflik avantajı sağlarken, metalik yapılar daha yüksek rijitlik sergilemiştir. Bu durum, endüstriyel hidrojen depolama sistemlerinde malzeme seçiminin performans, güvenlik ve ağırlık kriterleri birlikte değerlendirilerek yapılması gerektiğini göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda, hibrit kompozit malzeme kullanımı, farklı katman dizilimleri, yorulma analizleri ve termal etkilerin incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca hidrojen ortamına maruz kalan malzemelerde meydana gelebilecek hidrojen gevrekleşmesi etkilerinin değerlendirilmesi, yüksek basınç altında uzun dönemli yapısal güvenliğin belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Bununla birlikte dolum-boşaltım çevrimleri sırasında oluşan basınç ve sıcaklık değişimlerinin tank yapısı üzerindeki etkilerinin incelenmesi, gerçek çalışma koşullarının daha doğru temsil edilmesine katkı sağlayacaktır. Deneysel çalışmalar ile sayısal analiz sonuçlarının doğrulanması ve çoklu fiziksel etkileşimleri içeren analizlerin gerçekleştirilmesi, hidrojen tanklarının güvenilirliği ve endüstriyel uygulanabilirliği açısından önemli katkılar sağlayacaktır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***Ramazan ÖZKAN*:** Bulguların bilimsel olarak değerlendirilmesi ve yorumlanması, literatür taraması, makale yazımı ve metnin bilimsel açıdan gözden geçirilmesi.

Scientific evaluation and interpretation of the findings, literature review, writing the manuscript, and critical revision of the text for scientific content.

***İbrahim Deniz YANCI*:** Modelin geliştirilmesi, analiz işlemleri, literatür taraması ve makale taslağının hazırlanması.

Development of the model, analysis procedures, literature review, and preparation of the manuscript draft.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] ARABACI, H., & ÖZKAN, N. (2025). Yenilenebilir Enerjinin Sosyal Çevre ve Ekonomik Kalkınma Üzerindeki Etkisi. Balkan & Near Eastern Journal of Social Sciences (BNEJSS), 11(4). https://www.ibaness.org/bnejss/2025_11_04/08_Arabaci_and_Ozkan.pdf

[2] Daş, E., & Öner, E. T. (2025). Hidrojen: Sürdürülebilir enerji için çok yönlü çözüm. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(1), 536-550. https://doi.org/10.17780/ksujes.1564900

[3] Mutlubaş, H., & Özdemir, Z. Ö. (2023). Hidrojenin Kullanım Alanları ve Hidrojen Ekonomisi. Yekarum, 8(1), 20-31. https://izlik.org/JA24KN78GP

[4] Tunçbilek, H. S. (2025). Hidrojen Enerji Sistemleri. Journal of West European Social Sciences, 2(1), 166-181. https://doi.org/105281/zenodo.15122919

[5] ORAL, M. (2020). HYDROGEN ENERGY IN THE FUTURE OF SUSTAINABLE ENERGY POLICIES. International Journal of Eurasia Social Sciences/Uluslararasi Avrasya Sosyal Bilimler Dergisi, 11(42). https://hdl.handle.net/20.500.14619/11620

[6] Koşar, C. (2021). Hidrojen Depolama Yöntemleri. Open Journal of Nano, 6(1), 1-10. https://izlik.org/JA56ZD63NY

[7] Demir, A. (2022). Hibrid, Tam Elektrikli ve Yakit Hücreli Araçlar Trendi ve Emniyet Yükümlülüklerinin Değerlendirilmesi. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 21(41), 136-155. https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1096211

[8] İlbeyoğlu, S., Gürbüz, H., & Bayat, M. (2023). Hidrojen PEM Yakıt Hücresinin Performansını Etkileyen Faktörler ve Genel Bir Değerlendirme. In İçinde International Conference on Pioneer and Innovative Studies. https://doi.org/10.59287/icpis.804

[9] Jere, N., Faik, A., & Nachtane, M. (2026). From design to application: how manufacturing processes impact composite hydrogen storage tank performance?. Polymer Composites, 47(6), 4900-4928. https://doi.org/10.1002/pc.70510

[10] Molkov, V., Kashkarov, S., & Makarov, D. (2023). Breakthrough safety technology of explosion free in fire self-venting (TPRD-less) tanks: The concept and validation of the microleaks-no-burst technology for carbon-carbon and carbon-glass double-composite wall hydrogen storage systems. International Journal of Hydrogen Energy, 48(86), 33774-33785. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.148

[11] Senthil Kumar, S., Bibin, C., & Ramachandran, M. (2020, March). Design and analysis of hydrogen storage tank with different materials by ansys. In IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 810, No. 1, p. 012016). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1757-899X%2F810%2F1%2F012016

[12] Yuan, K., & Liu, Z. (2024). A structural mechanics analysis on a Type IV hydrogen storage tank during refueling and discharging. Engineering Failure Analysis, 165, 108822. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108822

[13] He, C., Yu, R., Sun, H., & Chen, Z. (2016). Lightweight multilayer composite structure for hydrogen storage tank. International Journal of Hydrogen Energy, 41(35), 15812-15816.

https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2016IJHE...4115812H/doi:10.1016/j.ijhydene.2016.04.184

[14] Gomez, A., & Smith, H. (2019). Liquid hydrogen fuel tanks for commercial aviation: Structural sizing and stress analysis. Aerospace Science and Technology, 95, 105438. https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105438.

[15] Ansys (2025), Ansys Inc., Canonsburg. PA.

[16] Yapıcı H., Genç MS, Özışık G. (2008). Transient temperature and thermal stress distributions in a hollow disk subjected to a moving uniform heat source, Journal of Thermal Stresses 31 (5), 476-493, https://doi.org/10.1080/01495730801912652.

[17] Çiftci C., Erdoğan A., Genç MS. (2023). Investigation of the mechanical behavior of a new generation wind turbine blade technology, Energies 16 (4), 1961, https://doi.org/10.3390/en16041961.

[18] Choi, Y., Kim, J., Park, S., Park, H., & Chang, D. (2022). Design and analysis of liquid hydrogen fuel tank for heavy duty truck. International Journal of Hydrogen Energy, 47(32), 14687-14702. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.210

[19] Apalak Z.G., Apalak MK., MS Genç M.S. (2006). Progressive damage modeling of an adhesively bonded unidirectional composite single-lap joint in tension at the mesoscale level, Journal of Thermoplastic Composite Materials 19 (6), 671-702, https://doi.org/10.1177/0892705706067487.

[20] Apalak Z.G., Apalak MK., MS Genç M.S. (2007). Progressive damage modeling of an adhesively bonded composite single lap joint under flexural loads at the mesoscale level, Journal of Reinforced Plastics and Composites 26 (9), 903-953, https://doi.org/10.1177/0731684407079413.