



**BASINÇLI HİDROJEN SİLİNDİRİNİN DOLUM SÜRECİNDE
BAŞLANGIÇ BASINCI VE GİRİŞ SICAKLIĞININ SON SICAKLIĞA VE
DEPOLANAN HİDROJEN KÜTLESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Mert MERCAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mert MERCAN

04/07/2023

BASINÇLI HİDROJEN SİLİNDİRİNİN DOLUM SÜRECİNDE BAŞLANGIÇ BASINCI
VE GİRİŞ SICAKLIĞININ SON SICAKLIĞA VE DEPOLANAN HİDROJEN
KÜTLESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Mert MERCAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2023

ÖZET

Yapılan bu çalışma tip 3 yüksek basınçlı (350 bar) hidrojen tankına ait hidrojen dolum prosesinde sıcaklık dağılımlarını HAD analizi ile incelenmiştir. Uluslararası standartlarda izin verilen sıcaklık değerleri dikkate alınarak analizler ele alınmaktadır. Ayrıca yapılmış olan çalışma ile hidrojen dolum prosesinde tank başlangıç basıncı ve debinin, tankın ulaştığı son sıcaklığa ve dolum süresine etkisi incelenmiştir. Hesaplamalarda kullanılmak üzere 5 farklı hidrojen debisi ve 4 farklı başlangıç basıncı değerinin birbiri ile kombinasyonlarından 20 farklı durum elde edilmiştir. Elde edilen her durum için izin verilen sıcaklığa uygunluğu değerlendirilmiş olup, uygun olamayan durumlarda dolum yapılacak hidrojene ön soğutma uygulanarak analizler tekrarlanmıştır ve sonuçlar incelenmiştir. Hidrojen giriş sıcaklık değerleri her durum için izin verilen aralığa getirilmiştir. Bu çalışmanın ardından ön soğutmalı ve ön soğutmasız dolum sonuçlarından tank içerisinde depolanan hidrojen kütlesi incelenmiş, ön soğutma ile depolanan kütle arasındaki artış ilişkisi gösterilmiştir. Yapılan bu analizlerde k-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır. Yapılan analiz sayısının çok olması ve analiz modelinin simetrik çözüme uygun olması nedeni ile modelleme 2-boyutlu yapılmıştır. Model kurulumundan sonra elde edilen sonuçlar, standartlarda izin verilen sıcaklık değerleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler ışığında dolum işleminin izin verilen sıcaklık aralığında yapılması hedeflenmektedir. Çalışmanın sonuçları, hidrojen dolum prosesindeki sıcaklık dağılımlarının önemli bir faktör olduğunu göstermektedir. Hidrojen tankının izin verilen sıcaklık değerlerini aşması, güvenlik risklerini artırabilir ve tankın termal performansını olumsuz etkileyebilir. Ancak, hidrojen giriş sıcaklığının düşürülmesiyle bu risklerin önüne geçilebilir ve tankın güvenliği sağlanabilir. Bu tez, hidrojen dolum işlemlerinde termal yönetimin önemini vurgulayarak, hidrojen depolama sistemlerinin güvenli ve etkin bir şekilde kullanılmasına katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

Bilim Kodu : 91408
Anahtar Kelimeler : Güvenli hidrojen dolum sıcaklığı, hidrojen depolama tankı, hidrojen dolum prosesi
Sayfa Adedi : 73
Danışman : Dr. Muhittin BİLGİLİ

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF INITIAL PRESSURE AND INLET
TEMPERATURE IN THE FILLING PROCESS OF THE COMPRESSED HYDROGEN
CYLINDER ON THE FINAL TEMPERATURE AND STORED HYDROGEN MASS

(M. Sc. Thesis)

Mert MERCAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2023

ABSTRACT

In this study, the temperature distributions in the hydrogen filling process of the type 3 high pressure hydrogen tank (350 bar) were examined by CFD analysis. Analyses are handled by taking into account the temperature values allowed in international standards. In addition, the effect of the tank initial pressure and flow rate on the final temperature reached by the tank and the filling time in the hydrogen filling process was investigated with the study. To be used in the calculations, 20 different situations were obtained by combining 5 different hydrogen flow rates and 4 different initial pressure values with each other. Compliance with the allowable temperature was evaluated for each situation obtained, and in unsuitable cases, pre-cooling was applied to the hydrogen to be filled, and the analyses were repeated and the results were examined. Hydrogen inlet temperature values are brought to the allowable range for each case. After this study, the hydrogen mass stored in the tank was examined from the filling results with and without pre-cooling, and the increase relationship between the pre-cooling and the stored mass was shown. The k-epsilon turbulence model was used in these analyses. Since the number of analyses was high and the analysis model was suitable for the symmetrical solution, the modeling was done in 2 dimensions. The results obtained after the model setup were compared with the temperature values allowed in the standards. In the light of the data obtained, it is aimed to carry out the filling process in the allowable temperature range. The results of the study show that the temperature distributions in the hydrogen filling process are an important factor. Exceeding the allowable temperature of the hydrogen tank can increase safety risks and adversely affect the thermal performance of the tank. However, these risks can be avoided and the safety of the tank can be ensured by lowering the hydrogen inlet temperature. This thesis aims to contribute to the safe and effective use of hydrogen storage systems by emphasizing the importance of thermal management in hydrogen filling processes.

Science Code : 91408

Key Words : Safety temperature of filling process, hydrogen storage tank, hydrogen filling process

Page Number : 73

Supervisor : Dr. Muhittin BİLGİLİ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca bana desteklerini esirgemeyen birçok kiőıye teşekkür etmek istiyorum. İlk olarak, danıőmanım Dr. Muhittin BİLGİLİ bu çalışmada gosterdiği yol gosterme, rehberlik ve destek için derin bir minnettarlık duyuyorum. Yönlendirmeleri ve değerli önerileri sayesinde bu tez çalışması başarıyla tamamlandı. Ayrıca, bu tez çalışmasında değerli görüşleri ve yardımlarıyla bana destek olan meslektaşlarıma teşekkür etmek istiyorum. Tartıőmalarımız ve iç birliğimiz sayesinde çalışmanın kalitesi arttı. Son olarak, sevgili eőim Büőra BAYKAN MERCAN'a, aileme ve sevdiklerime sonsuz destekleri ve anlayıőları için teşekkür etmek istiyorum. Beni her zaman cesaretlendirdiler ve motive ettiler. Onların sevgisi ve desteği olmadan bu çalışmayı başarmam mümkün olmazdı.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. MODEL VE DOĞRULAMA	13
2.1. Geometri	14
2.2. Termodinamik Analiz.....	21
2.3. Sayısal Analiz Modeli	23
2.4. Başlangıç ve Sınır Koşulları	24
2.5. Model Doğrulama Çalışması	27
4. ANALİZ SONUÇLARININ İNCELENMESİ.....	33
3.1. 10 g/s Sabit Debi ve Farklı Başlangıç Basınçları İçin Elde Edilen Sıcaklık Sonuçları.....	33
3.2. 15 g/s Sabit Debi ve Farklı Başlangıç Basınçları İçin Elde Edilen Sıcaklık Sonuçları.....	39
3.3. 20 g/s Sabit Debi ve Farklı Başlangıç Basınçları İçin Elde Edilen Sıcaklık Sonuçları.....	43
3.4. 25 g/s Sabit Debi ve Farklı Başlangıç Basınçları İçin Elde Edilen Sıcaklık Sonuçları.....	47
3.5. 40 g/s Sabit Debi ve Farklı Başlangıç Basınçları İçin Elde Edilen Sıcaklık Sonuçları.....	51
3.6. Tüm Durumlar için Depolanan Hidrojen Kütlesinin İncelenmesi.....	56

	Sayfa
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	73

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Tank iç basıncı ve dolun debilerine göre kombinasyonlar.....	14
Çizelge 3.2. Tank ölçüleri.....	18
Çizelge 3.3. Malzeme özellikleri	21
Çizelge 3.4. Başlangıç ve sınır şartları	28
Çizelge 3.5. Farklı ağ yapıları için sonuç karşılaştırılması.....	30
Çizelge 3.6. Farklı zaman adımları için sonuç karşılaştırılması	32
Çizelge 4.1. 10 g/s debi ve 293 K sabit sıcaklık için elde edilen sonuçlar	33
Çizelge 4.2. 10 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolun sonuçları.....	35
Çizelge 4.3. 15 g/s debi ve 293 K sabit sıcaklık için elde edilen sonuçlar	39
Çizelge 4.4. 15 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolun sonuçları.....	41
Çizelge 4.5. 20 g/s debi ve 293 K sabit sıcaklık için elde edilen sonuçlar	43
Çizelge 4.6. 20 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolun sonuçları.....	45
Çizelge 4.7. 25 g/s debi ve 293 K sabit sıcaklık için elde edilen sonuçlar	47
Çizelge 4.8. 25 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolun sonuçları.....	49
Çizelge 4.9. 40 g/s ve debi ve 293 K sabit sıcaklık için elde edilen sonuçlar	51
Çizelge 4.10. 40 g/s debi için optimize edilmiş sonuçlar	53
Çizelge 4.11. Farklı basınçlarda hidrojen özellikleri	58
Çizelge 4.12. 10 g/s debi 85 °C ulaşılma süreleri	59
Çizelge 4.13. 10 g/s debi 35 MPa'ya ulaşılma süreleri.....	59
Çizelge 4.14. 10 g/s debi- ön soğutmalı ve ön soğutmasız durumlarda depolanan hidrojen kütlesi	60
Çizelge 4.15. 15 g/s Debi 85 °C ulaşılma süreleri	61
Çizelge 4.16. 15 g/s debi MPa'ya ulaşılma süreleri.....	61
Çizelge 4.17. 15 g/s debi- ön soğutmalı ve ön soğutmasız durumlarda depolanan hidrojen kütlesi	61
Çizelge 4.18. 20 g/s debi 85 °C ulaşılma süreleri	62

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.19. 20 g/s debi MPa'ya ulaşılma süreleri.....	62
Çizelge 4.20. 20 g/s debi- ön soğutmalı ve ön soğutmasız durumlarda depolanan hidrojen kütlesi	62
Çizelge 4.21. 25 g/s debi 85 °C ulaşılma süreleri	63
Çizelge 4.22. 25 g/s debi MPa'ya ulaşılma süreleri.....	64
Çizelge 4.23. 25 g/s debi- ön soğutmalı ve ön soğutmasız durumlarda depolanan hidrojen kütlesi	64
Çizelge 4.24. 40 g/s debi 85 °C ulaşılma süreleri	65
Çizelge 4.25. 40 g/s debi MPa'ya ulaşılma süreleri.....	65
Çizelge 4.26. 40 g/s debi- ön soğutmalı ve ön soğutmasız durumlarda depolanan hidrojen kütlesi	65

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Tank geometrisi detay	15
Şekil 3.2. Tank geometrisi genel görünüm.....	15
Şekil 3.3. Tank katmanları detaylı gösterim.....	16
Şekil 3.4. Tank katmanları et kalınlığı ölçüleri	17
Şekil 3.5. Hesaplamalarda kullanılan tank ölçüleri	17
Şekil 3.6. Tank iç yarıçap ölçüsü.....	18
Şekil 3.7. Ağ yapısı genel görünüm	19
Şekil 3.8. Ağ yapısı genel görünüm 2	20
Şekil 3.9. Ağ yapısı genel görünüm 3	20
Şekil 3.10 Termodinamik Model	21
Şekil 3.11. Hidrojen giriş değerleri.....	25
Şekil 3.12. Karbon fiber-cam yünü katman kontak.....	26
Şekil 3.13. Karbon fiber-alüminyum katman kontak	26
Şekil 3.14. Hidrojen-alüminyum katman kontak.....	27
Şekil 3.15. Akış süresi ile sıcaklık değişimlerinin sonucu	28
Şekil 3.16. Sık ağ yapısı	29
Şekil 3.17. Kaba ağ yapısı	30
Şekil 3.18. Eleman sayısından bağımsızlık testi.....	31
Şekil 3.19. Zaman adımımdan bağımsızlık testi.....	32
Şekil 4.1. 10 g/s debi için 293 K hidrojen ile dolun sonuçları	35
Şekil 4.2. 10 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolun sonuçları	36
Şekil 4.3. 10 g/s debi için 293 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolun sonuçları sıcaklık dağılımı	36
Şekil 4.4. 10 g/s debi için 273 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolun sonuçları sıcaklık dağılımı	37

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. 10 g/s debi için 293 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	37
Şekil 4.6. 10 g/s debi için 273 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	37
Şekil 4.7. 10 g/s debi için 293 K hidrojen ile 7 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	38
Şekil 4.8. 10 g/s debi için 283 K hidrojen ile 7 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	38
Şekil 4.9. 15 g/s debi için 293 K hidrojen ile dolum sonuçları	40
Şekil 4.10. 15 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolum sonuçları.....	41
Şekil 4.11. 15 g/s debi için 293 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	41
Şekil 4.12. 15 g/s debi için 273 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	42
Şekil 4.13. 15 g/s debi için 293 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	42
Şekil 4.14. 15 g/s debi için 283 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	42
Şekil 4.15. 20 g/s debi için 293 K hidrojen ile dolum sonuçları	44
Şekil 4.16. 20 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolum sonuçları.....	45
Şekil 4.17. 20 g/s debi için 293 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	45
Şekil 4.18. 20 g/s debi için 273 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	46
Şekil 4.19. 20 g/s debi için 293 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	46
Şekil 4.20. 20 g/s debi için 283 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	46
Şekil 4.21. 25 g/s debi için 293 K hidrojen ile dolum sonuçları	48
Şekil 4.22. 25 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolum sonuçları.....	49
Şekil 4.23. 25 g/s debi için 293 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	50

Şekil	Sayfa
Şekil 4.24. 25 g/s debi için 273 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	50
Şekil 4.25. 25 g/s debi için 293 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	50
Şekil 4.26. 25 g/s debi için 283 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	51
Şekil 4.27. 40 g/s debi için 293 K hidrojen ile dolum sonuçları	52
Şekil 4.28. 40 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolum sonuçları.....	53
Şekil 4.29. 40 g/s debi için 293 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	54
Şekil 4.30. 40 g/s debi için 263 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	54
Şekil 4.31. 40 g/s debi için 293 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	54
Şekil 4.32. 40 g/s debi için 273 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	55
Şekil 4.33. 40 g/s debi için 293 K hidrojen ile 7 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	55
Şekil 4.34. 40 g/s debi için 283 K hidrojen ile 7 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı	55
Şekil 4.35. 2 MPa-293 K koşullarında hidrojen özkütlesi.....	57
Şekil 4.36. 5 MPa-293 K koşullarında hidrojen özkütlesi.....	57
Şekil 4.37. 7 MPa-293 K koşullarında hidrojen özkütlesi.....	58
Şekil 4.38. 9 MPa-293 K koşullarında hidrojen özkütlesi.....	58

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
E	Enerji
g	Gram
g	Yerçekimi İvmesi
K	Kelvin
k	Türbülans Kinetik Enerjisi
kg	Kilogram
L	Litre
m²	Metrekare
m³	Metreküp
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
n	Mol Kütlesi
°C	Santigrat
P	Basınç
R	Gaz sabiti
sn	Saniye
T	Sıcaklık
V	Hacim
ε	Türbülans Enerji Yayılımı
ρ	Özkütle
Kısaltmalar	Açıklamalar
CFRP	Karbon Elyaf Takviyeli Plastik
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
ISO 15969	Yüzey kimyasal analizi Standardı
SAE J2579	Hidrojenli Araçlardaki Yakıt Sistemleri Standardı

Kısaltmalar**Açıklamalar****SOC**

Hidrojen Tankının Nihai Şarj Durumu

TIR J2601

Dolum Protokolü

1. GİRİŞ

Hidrojen yakıt pili teknolojisi, yüksek enerji dönüşüm verimliliği, düşük emisyon ve yenilenebilir üretim yöntemleri nedeniyle geleneksel fosil yakıtlara umut verici bir alternatif olarak kabul edilmektedir [1]. Bu nedenle hidrojenin önümüzdeki yıllarda fosil yakıtların yerini alması beklenmektedir ve bu nedenle son yıllarda tüm dünyadaki araştırmacıların odak noktası haline gelmiştir [2-5]. Bununla birlikte, hidrojen kullanımıyla ilgili temel zorluklar da bulunmaktadır ve bunlardan birisi depolanmasıdır. Hidrojen araçlarının yaygınlaşması için en önemli faktör hidrojenin güvenli depolanmasıdır [6-9]. Hidrojenin sahip olduğu düşük öz kütlesi sebebi ile kayda değer bir kütlede depolanması için depolama basıncının yüksek olması gerekmektedir. Ayrıca hidrojen depolama teknolojisinin çeşitli uygulamaların ihtiyaçlarını karşılamak için güvenilir, emniyetli ve verimli olması gerekir. Sıkıştırılmış hidrojen gazı, sıvı hidrojen, metal hidrürler, kimyasal hidrürler ve karbon nanotüpler dahil olmak üzere çeşitli hidrojen depolama türleri vardır [4,10,11]. Sıkıştırılmış hidrojen gazı en yaygın depolama yöntemidir ve hidrojenin tanklarda yüksek basınçta depolanmasını içerir. Sıvı hidrojen depolama, hidrojenin son derece düşük sıcaklıklarda depolanmasını içerirken, metal hidrürler hidrojeni katı haldeki bir malzeme üzerine adsorbe ederek depolar. Kimyasal hidrürler ve karbon nanotüpler de hidrojeni adsorpsiyon yoluyla depolar, ancak verimlilik ve maliyetle ilgili zorluklar nedeniyle henüz yaygın olarak kullanılmamaktadır. Her hidrojen depolama türünün avantajları ve dezavantajları vardır ve uygun depolama yöntemi özel uygulama ve sistem gereksinimlerine bağlıdır. Bu teknolojinin önemli bir bileşeni, güvenli ve verimli hidrojen tank sistemleri gerektiren hidrojen yakıtının depolanması ve taşınmasıdır. Yüksek basınçlı depolama tankları olan Tip 3 hidrojen tankları, hidrojen yakıtının araçlarda depolanması ve taşınması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tanklar yüksek basınçta hidrojen yakıtı depolayabilir, bu da onları uzun menzilli hidrojenle çalışan araçlar için ideal hale getirir. Ayrıca bu tanklar karbon fiber ile güçlendirildiği ve üretim yöntemlerinden dolayı kaynak bulundurmadığından uzun süreli kullanım, korozyona uğramama, hafiflik ve yüksek mukavemet sağlamaktadır [12].

Tip 3 hidrojen tankları için dolun işlemi, hidrojen depolama ve taşıma sisteminin güvenliğini ve verimliliğini sağlamak için hassas kontrol ve izleme gerektiren karmaşık ve kritik bir işlemdir. Yapılan dolun süreci sonrasında tank içerisinde oluşan maksimum hidrojen sıcaklığı TIR J2601 [13], European regulation [14], global technical regulation [15], SAE J2579 [16] ve ISO 15869 [17] göre sınırlandırılmış olup sınır değeri 85°C (358 K)

olarak belirtilmiştir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda, tank katmanlarında kullanılan CFRP (Karbon Elyaf Takviyeli Plastik) bozulmaya uğramakta ve mekanik özellikleri bozulmaktadır. Ulaşılan son sıcaklığı etkileyen birden fazla faktör bulunmaktadır. Tankın başlangıç basıncı ve hidrojenin kütle akış hızı, dolum sürecini ve son sıcaklığı önemli ölçüde etkileyen iki kritik parametredir. Tankın başlangıç basıncı, tankın başlangıçta doldurulduğu basınçtır; hidrojenin kütle akış hızı ise birim zamanda tanka akan hidrojen miktarını ifade eder.

Bu tezin amacı, hidrojenin başlangıç basıncının ve kütle akış hızının genel olarak araçlarda kullanılan 140 L Tip 3 hidrojen tankı doldurma süreci üzerindeki etkisini ve bu etkilerin sürecin güvenliği ve verimliliği üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bu çalışmanın özel hedefleri şunlardır:

- Başlangıç basıncı ile hidrojenin kütle akış hızı arasındaki ilişkiyi ve bunların Tip 3 hidrojen tankı dolum süreci üzerindeki etkisini analiz etmek,
- Başlangıç basıncı ve kütle akış hızındaki değişimlerin dolum süresi ve tank içerisindeki sıcaklık dağılımına etkisini incelemektir.
- Yapılan hesaplamalar 5 farklı hidrojen debisi ve 4 farklı başlangıç basıncının kombinasyonları ile tekrarlanmıştır. Hidrojen veya tank katmanlarında oluşan maksimum sıcaklık değeri TIR J2601 ve diğer standartlarda izin verilen 85°C (358 K) değerine göre kontrol edilmiştir. İzin verilen sıcaklığı aşan durumlar tespit edilerek dolum yapılan hidrojenin sıcaklığı düşürülmüştür ve her durum için enerji verimliliğini korumak adına optimum hidrojen giriş sıcaklıkları hesaplanmıştır elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde gösterilmiştir.
- Sıcaklık kontrolü yapılmasının yanı sıra sıcaklığı düşürülmüş hidrojen ile dolum yapılmış durumların dolum süreleri ve tank içerisinde depolanan hidrojen kütlesi de incelenmiştir.
- Çalışmanın devamında görüleceği gibi analizlerde kullanılan debiler için belirlenmiş durumlarda hidrojenin son sıcaklığının izin verilen sıcaklığı aşmasından dolayı depolanan hidrojenin kütlesi incelenirken depolama tankları 35 MPa basınca kadar doldurulamamıştır. Doldurulan basınç 35 MPa'nın altında kalmış olup diğer bir kriter olan TIR J2601 ve diğer standartlarda izin verilen 85°C (358 K) değeri kullanılarak dolum işlemi yapılmıştır. Analizde ulaşılan maksimum sıcaklık bu değere ulaştığı an dolum işlemi durdurulmuş depolanan kütle incelenmiştir. Ardından izin verilen durumu

aşan durumlar için ön soğutmalı hidrojen kullanılarak ulaşılan son sıcaklık izin verilen sınırlarda tutulmuş ve ön soğutmalı hidrojen kullanmanın depolanan hidrojen kütlesine etkisi de incelenmiştir.

- Dolum işlemi sonunda tank içerisindeki hidrojen gazının ve tank katmanlarının sıcaklıklarını standartlara uygunluğunu kontrol edilmiş ve uygun olmayan durumlar optimize edilerek uygun duruma getirilmiştir.

Ön soğutma tank içerisinde bulunan hidrojen ve katmanların sıcaklıklarını izin verilen sınırlarda tutmak için iyi bir yöntem olsa da hidrojeni istenen düşük sıcaklıklarda depolamak enerji maliyetini artırmaktadır [18]. Maliyet artışını minimumda tutmak için giriş için dolum sonrası oluşan sıcaklığın izin verilen sıcaklıklarda olması adına kullanılacak hidrojenin maksimum sıcaklık değeri verilen tüm kombinasyonlar için bulunmuştur. Ayrıca yapılan bu çalışmalar, Tip 3 hidrojen tankı dolum sürecine ilişkin değerli bilgiler sağlayacak, güvenli ve verimli hidrojen depolama ve taşıma sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır. Bu çalışmanın bulguları, hidrojen yakıt hücresi teknolojisinin yaygın olarak benimsenmesi için kritik öneme sahip olan dolum sürecinin güvenliğini ve verimliliğini artırmaya yardımcı olacaktır. Ayrıca bu araştırmanın sonuçları, gelecekteki hidrojen depolama ve taşıma sistemlerinin tasarım ve geliştirilmesinde kullanılarak daha temiz ve sürdürülebilir bir enerji geleceğine geçişi sağlanmasına katkıda bulunabilir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Hidrojen depolama tankı dolum prosesinde dolum hızı, depolanan hidrojen basıncı gibi parametreler geçmişten günümüze kadar geliştirilmek istenmiştir ve bu konuda birçok çalışma yapılmıştır. Bu kısımda, yapılan bu tez kapsamında incelenen çalışmalardan bahsedilmiştir. Bu bölümün amacı, konuyla ilgili önceki araştırmaların ve literatürdeki bulguların derlenmesi ve analizi yoluyla, konunun mevcut durumunun ortaya konulmasıdır.

Dichen ve Merida tarafından yapılmış olan çalışmada [19], yakıt ikmali sırasında bir hidrojen silindirindeki sıcaklık dağılımını incelemek için sayısal simülasyon kullanımına odaklanmaktadır. Yazarlar, yakıt ikmali sırasında silindirdeki hidrojenin geçici sıcaklık davranışını ile ilgili hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modeli geliştirmek için bir sonlu hacimler yöntemi kullanmışlardır. Model, ısı transfer mekanizmasını, basınç düşüşünü ve hidrojenin silindire akış hızını dikkate almaktadır. Yazarlar, silindir içindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkiyi gözlemlemek için farklı dolum debileri ve başlangıç koşulları ile sayısal simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, silindir içindeki sıcaklık artışının artan akış hızı ile arttığını, ön soğutma uygulanmış hidrojen ile dolumu bir silindirin soğutulmamış hidrojen ile dolum yapılan bir silindire kıyasla daha düşük bir sıcaklık artışına sahip olduğunu göstermiştir. Genel olarak, çalışmanın sonuçları, güvenli ve verimli bir çalışma sağlamak için yakıt ikmali sırasında bir hidrojen silindiri içindeki sıcaklık dağılımını dikkate almanın önemini vurgulamaktadır. Çalışmada geliştirilen HAD modeli, yakıt ikmali sürecini optimize etmek ve sıcaklıkla ilgili riskleri en aza indirmek için gelecekteki çalışmalar ve pratik uygulamalar için yararlı olabilir.

Liu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [20] ise yakıt ikmalinin hidrojen depolama tankı içindeki sıcaklık artışı üzerindeki etkilerini anlamayı amaçlamaktadır. Çalışma deneyler yoluyla yürütülmüş ve yakıt ikmali işlemi sırasında bir hidrojen silindirindeki sıcaklık artışını belirlemek için veriler analiz edilmiştir. Yazarlar, yakıt ikmali işlemi başladığında hidrojen silindirinin sıcaklığının hızla arttığını ve daha sonra yavaşça sabit bir durum sıcaklığına yükseldiğini bulmuşlardır. Sıcaklık artış oranının silindire hidrojen dolum debisiyle doğru orantılı olduğu bulunmuştur. Yazarlar ayrıca maksimum sıcaklığın hidrojenin başlangıç sıcaklığından ve tank başlangıç basıncından etkilendiğini bulmuşlardır. Çalışmanın sonuçları, yakıt ikmali sırasında bir hidrojen silindiri içindeki sıcaklık artışını kontrol etmenin önemini vurgulamaktadır. Bulgular, sıcaklık artışını en aza indiren ve

hidrojen yakıt ikmal süreçlerinin verimliliğini ve güvenliğini artıran yakıt ikmal sistemlerini tasarlamak ve optimize etmek için kullanılabilir.

Melideo ve arkadaşları, hidrojen tanklarının ön soğutma ile hızlı dolumunun sayısal simülasyonuna [21] odaklanmaktadır. Yazarlar, hızlı dolum işlemi sırasında hidrojen tankının davranışını analiz etmek için bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modelinin performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma ayrıca ön soğutmanın tankta depolanan hidrojenin nihai sıcaklığı üzerindeki etkisini de değerlendirmektedir. Yazarlar ilk olarak hızlı dolum sürecini tanımlamak için kullanılan kütle, momentum ve enerji denklemlerini içeren matematiksel modeli tanıtmaktadır. Ardından, HAD modeli, ön soğutma, başlangıç sıcaklığı ve akış hızı dahil olmak üzere farklı koşullar altında bir hidrojen tankının hızlı dolumunu simüle etmek için kullanmışlardır. Sonuçlar, modelin doğruluğunu değerlendirmek için deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, HAD modelinin ön soğutma ile hızlı doldurma işlemi sırasında hidrojen tankındaki sıcaklık dağılımını doğru bir şekilde tahmin ettiğini göstermektedir. Model ayrıca başlangıç sıcaklığı ve kütle akış hızının tankta depolanan hidrojenin nihai sıcaklığı üzerindeki etkisini de dikkate almaktadır. Sonuç olarak yazarlar, bu çalışmada geliştirilen HAD modelinin, ön soğutmanın ve diğer değişkenlerin etkilerini dikkate alarak hidrojen tanklarının hızlı dolum sürecini optimize etmek için kullanılabilirliğini öne sürmektedir. Bu, yakıt hücreli araçlar için daha verimli ve güvenli hidrojen yakıt ikmal sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

Qianfeng ve arkadaşları basınçlı bir hidrojen silindirisinin geometrisinin ve sabit olmayan kütle akış hızının yakıt ikmal sırasında sıcaklığını nasıl etkilediğinin analizine [22] odaklanmaktadır. Yazarlar, yakıt ikmal işlemi sırasında bir hidrojen silindiri içindeki sıcaklık dağılımını analiz etmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanmaktadır. Silindir çapı, başlangıç sıcaklığı, giriş basıncı ve kütle akış hızı gibi çeşitli faktörlerin silindir içindeki sıcaklık artışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, silindir çapı ve giriş basıncının sıcaklık dağılımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Silindir içindeki sıcaklık artışının daha büyük silindir çapları ve daha yüksek giriş basınçları için daha düşük olduğu bulunmuştur. Sabit olmayan kütle akış hızının da sıcaklık dağılımı üzerinde belirgin bir etkisi vardır ve kütle akış hızı hızla arttığında sıcaklıkta ani bir artış görülür. Yazarlar, silindirin geometrisinin ve yakıt dolumu sırasında sabit kütle akış hızının, hidrojen silindiri tasarımında izin verilen sıcaklık sınırını aşmamak

için dikkate alınması gereken önemli faktörler olduğu sonucuna varmıştır. Bu çalışmanın bulguları, hidrojen yakıt ikmali süreçlerinin optimizasyonu ve yakıt hücreli araçlar için hidrojen depolama sistemlerinin tasarımı için değerli bilgiler sağlamaktadır.

Yang ise, yakıt hücreli araçlar için bir hidrojen tankının yakıt ikmali sürecinin termodinamik bir analizini [23] sunmaktadır. Çalışmada, termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarını kullanarak bir hidrojen tankını doldurma işlemi sırasında meydana gelen enerji ve entropi değişimlerini incelenmektedir. Analiz sonuçları, yakıt ikmali sürecinin verimliliği hakkında değerli bilgiler sağlamakta ve iyileştirmelerin yapılabileceği alanları vurgulamaktadır. Çalışma, yakıt dolumu sırasında hidrojen tankı içindeki sıcaklık değişimlerini ve hidrojenin başlangıç sıcaklığı ve basıncının tüm süreç üzerindeki etkisini incelemektedir. Yazar ayrıca yakıt ikmali işlemi sırasında oluşan ısının hidrojenin sıcaklığı ve basıncı üzerindeki etkisini de tartışmaktadır. Analiz sonuçları, modelin doğruluğunu onaylamak için deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Genel olarak makale, hidrojen yakıt ikmali sürecinin termodinamiğinin ve çeşitli faktörlerin süreç üzerindeki etkisinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamaktadır.

Zhao ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada [24], bir hidrojen aracı silindirindeki sıcaklık artışını incelemektedir. Yazarlar, doldurma işlemi sırasında hidrojenin termal davranışını incelemek için sayısal simülasyon kullanmışlardır. Amaç, sıcaklık artışına neden olan faktörleri ve bunun hidrojen depolama sisteminin performansı üzerindeki etkisini incelemektedir. Simülasyon, ortamdaki, hidrojen silindiri duvarlarından ve dolum işlemi sırasında üretilen ısıdan kaynaklanan ısı transferi nedeniyle silindirdeki sıcaklık artışını modellemektedir. Yazarlar ayrıca başlangıç sıcaklığı, akış hızı ve basınç gibi çeşitli parametrelerin sıcaklık artışı üzerindeki etkilerini de analiz etmektedir. Sonuçlar, başlangıç sıcaklığı, akış hızı ve basıncın hidrojen araç silindiri içindeki sıcaklık artışı üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Yazarlar ayrıca sıcaklık artışının silindirin alt kısmında daha belirgin olduğunu ve dolum işlemi sırasında üretilen ısının genel sıcaklık artışına önemli ölçüde etkisi olduğunu tespit etmiştir. Genel olarak bu çalışma, yakıt hücreli araçlar için hidrojen depolama sistemlerinin tasarımını optimize etmeye ve performanslarını ve güvenliklerini iyileştirmeye yardımcı olabilecek dolum işlemi sırasında hidrojen depolama sistemlerinin sıcaklık davranışına ilişkin değerli bilgiler sağlamaktadır.

Li, hızlı dolun işleminde dolgunun bir hidrojen depolama tankı içindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışmadır [25]. Hızlı doldurma işlemi, yakıt hücreli araçlarda yaygın olarak kullanılan hidrojen depolama tankının hızlı bir şekilde doldurulmasını ifade etmektedir. Çalışma, bir hidrojen depolama tankının hızlı doldurma işlemini modellemek ve dolgunun sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini araştırmak için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonunu kullanmaktadır. Dolgu, hidrojen depolama tankının yapısını güçlendirmek ve yüksek basınçlı dolun sırasında çökmesini önlemek için kullanılan malzeme olarak tanımlanmaktadır. Sonuçlar, dolgunun hızlı dolun işlemi sırasında hidrojen depolama tankı içindeki sıcaklık dağılımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Dolgunun varlığı, dolgunsuz duruma kıyasla ortalama sıcaklıkta bir artışa ve maksimum sıcaklıkta bir düşüşe yol açmaktadır. Sonuçlar ayrıca dolgu malzemesinin, kalınlığının ve düzenlemesinin tanktaki sıcaklık dağılımını etkileyebileceğini göstermektedir. Çalışma, hızlı doldurma sırasında dolgunun hidrojen depolama tankı sıcaklığı üzerindeki etkisine ilişkin önemli bilgiler sağlar ve yakıt hücreli araçlar için hidrojen depolama sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu için bilgiler sunar.

Kuroki ve arkadaşları, yakıt pilli araçlar için hidrojen yakıt ikmali için optimum bir yöntem geliştirmeyi amaçlayan bir çalışmanın [26] sonuçlarını tartışmaktadır. Yazarlar, hidrojen basıncı, sıcaklığı ve akış hızı gibi faktörlerin yanı sıra yakıt hücreli aracın depolama tankının özelliklerini de dikkate alarak hidrojen yakıt ikmali sürecini modellemek için dinamik simülasyon kullanmaktadır. Çalışmanın sonuçları, yakıt hücreli aracın tankını yeniden doldurmak için gereken süre ile tankta depolanabilecek hidrojen miktarı arasında bir denge olduğunu göstermektedir. Yazarlar, yakıt ikmali öncesinde hidrojenin önceden soğutulmasının ve hidrojen akış hızının kontrol edilmesinin yakıt ikmali verimliliğini artırabileceğini ve tankın yeniden doldurulması için gereken süreyi azaltabileceğini bulmuşlardır. Yazarlar ayrıca, dinamik simülasyon modelinin yakıt hücreli araçlar için hidrojen yakıt ikmali yöntemlerinin geliştirilmesi ve optimize edilmesi için yararlı olabileceği ve bu yöntemlerin hidrojenin ulaşım için bir yakıt olarak yaygın bir şekilde benimsenmesi için önemli etkileri olabileceği sonucuna varmışlardır. Genel olarak, bu makale yakıt hücreli araçlar için hidrojen yakıt ikmali ile ilgili zorluklar ve fırsatlar hakkında değerli bilgiler sağlamakta ve bu sürecin hem teknik hem de pratik yönlerini dikkate almanın önemini vurgulamaktadır.

Cebolla ve arkadaşları ise, hidrojen araçlarına yakıt ikmali sırasında giriş gazı sıcaklığının ön soğutulmasının ve kütle akış hızının değiştirilmesinin nihai şarj durumu (SOC) üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamaktadır [27]. Yazarlar, giriş sıcaklığı ve akış hızının tankın sıcaklığı ve basınç dağılımı üzerindeki etkisini dikkate alarak, dolun işlemi sırasında bir hidrojen depolama tankının termodinamik davranışını analiz etmek için sayısal simülasyonlar kullanmışlardır. Çalışmanın sonuçları, giriş gazının ön soğutulmasının tank içindeki sıcaklık artışını önemli ölçüde azalttığını ve daha yüksek bir nihai SOC'ye yol açtığını göstermiştir. Yazarlar ayrıca yakıt ikmali sırasında kütle akış hızının artırılmasının daha hızlı bir dolun süresine yol açtığını, ancak aynı zamanda tank içindeki sıcaklık artışında bir artışa neden olabileceğini bulmuşlardır. Yazarlar, simülasyon sonuçlarına dayanarak, hızlı bir dolun süresi sağlarken nihai SOC'yi en üst düzeye çıkaran optimum giriş sıcaklığını ve kütle akış hızını bulmanın mümkün olduğu sonucuna varmışlardır.

Heitsch ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [28] yazarlar, aracın güvenliğini, performansını ve enerji verimliliğini etkilediği için hidrojen yakıt hücreli araçların çok önemli bir yönü olan hidrojen tanklarının hızlı doldurulması üzerine sayısal araştırmalar yürütmüşlerdir. Yazarlar, hidrojen tanklarının hızlı dolununu incelemek için, dolun işlemi sırasında tanklar içindeki basınç ve sıcaklık dağılımları da dahil olmak üzere hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonlarını kullanmışlardır. Sonuçlar, tank içindeki basınç ve sıcaklık dağılımlarının akış hızı, başlangıç basıncı ve tank duvarından hidrojen gazına ısı transferi gibi çeşitli faktörlerden etkilendiğini göstermiştir. Yazarlar ayrıca ön soğutmanın hidrojen tanklarının hızlı dolununu üzerindeki etkilerini analiz etmiş ve ön soğutmanın tank içindeki sıcaklık artışını azaltabileceğini, dolun verimliliğini artırabileceğini ve hidrojen yakıt hücreli aracın güvenliğini artırabileceğini bulmuşlardır. Genel olarak, bu makale hidrojen tanklarının hızlı dolununa ilişkin önemli bilgiler sunmaktadır ve hidrojen yakıt hücreli araçlar alanında çalışan araştırmacılar ve mühendisler için değerli bir referans olarak hizmet edebilir.

Suryan, Kim ve Setoguchi tarafından yapılan çalışmada [29], üç boyutlu sayısal hesaplamalar kullanarak bir hidrojen tankının hızlı dolun sürecini incelemeyi amaçlamaktadır. Makale, hidrojen tankı içindeki basınç ve sıcaklık dağılımı da dahil olmak üzere hızlı dolun sürecini simüle etmek için kullanılan fiziksel ve matematiksel modellerin derinlemesine bir analizini sunmaktadır. Yazarlar, doldurma işlemi sırasında başlangıç basıncı, sıcaklık ve kütle akış hızı gibi farklı koşulları dikkate almaktadır. Simülasyonların

sonuçları, hidrojen tankı içindeki sıcaklık dağılımının, başlangıç basıncı ve sıcaklığı ile kütle akış hızı gibi başlangıç koşullarından etkilendiğini göstermektedir. Makalede ayrıca bu koşulların hidrojen tankı içindeki basınç dağılımı üzerindeki etkileri de tartışılmaktadır. Yazarlar, yaptıkları sayısal hesaplamaların hidrojen tanklarının hızlı dolum sürecine ilişkin değerli bilgiler sağladığı ve dolum sürecinin verimliliğini ve güvenliğini artırmaya yardımcı olabileceği sonucuna varmaktadır.

Daha yüksek sıcaklık limitine sahip tank malzemeleri yaygın olarak kullanılmadan önce oluşabilecek bu güvenlik tehlikesinden kaçınmak için araştırmacılar, dolum süresini azaltırken güvenli dolum için hızlı dolum sürecini yoğun bir şekilde incelemişlerdir. Yaygın olarak kullanılan bir yaklaşım sayısal simülasyondur. Xiao ve arkadaşları [30], çeşitli yakıt ikmali parametrelerinden hareketle, dolum sonunda ulaşılan hidrojen sıcaklığını parametrelili bir modelle hesaplamışlardır. Daha yüksek giriş sıcaklığı, ortam sıcaklığı, nihai basınç ve daha düşük başlangıç basıncından daha yüksek nihai gaz sıcaklığı ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Cebolla ve diğerleri [18] deneyler yoluyla ön soğutmanın etkilerini incelemiştir. Hızlı dolum sırasında giriş sıcaklığı ve tank içerisinde bulunan hidrojenin sıcaklığının gelişimi açısından Kuroki ve diğerleri [26] ile benzer sonuçlar bildirmişlerdir. Simonovski ve diğerleri [31] bir gaz tankını 3D ve 2D modellerle modellemiştir. Tank içerisinde bulunan yüksek sıcaklıklı gazdan gelen ısı akısının eşit olarak dağıldığı varsayılmıştır. Çalışmaları sonucunda hızlı dolum sırasında en çok gaz tankı eksenine yakın bölgelerin ısındığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmalara ek olarak. Mohamed ve Paraschivoiu [32] ise yüksek basınç odasından adiyabatik hidrojen salınımında gerçek gaz etkilerini araştırmıştır. Bulunan sonuçlar gerçek gaz modeli seçimi konusunda oldukça yardımcıdır.

Ramasamy ve arkadaşları [33] tarafından yapılan çalışmada, yüksek gaz sıcaklığının, gaz tankında kesin olarak bir sıcak bölge oluşturamayacağına ulaşılar. En boy oranı 3'ten büyük olan depolama tanklarında, en yüksek gaz sıcaklığı gaz girişinin karşı tarafında gözlemlenirken, bu bölgelerdeki duvar sıcaklıkları, konveksiyon ile ısı transfer katsayısının düşük olması nedeniyle gazın daha soğuk olduğu bölgelere göre önemli ölçüde daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Yapılan diğer çalışmalar ise Sitra ve arkadaşları [12] ile aynı alandadır bunlar Maus ve arkadaşları [34] ve Liss ve arkadaşları [35] tarafından yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda depolama tankının yüksek sıcaklıklara ulaşmasını ve yüksek basınçlara çıkmasını önlemek amacıyla hidrojen dolum istasyonunda uygulanan bir algoritmayı ve izin verilen çalışma aralığını tanımlamıştır.

Yapılan literatür araştırmaları incelendiğinde farklı debiler ile yapılan analizler bulunmaktadır fakat farklı başlangıç basınçları ile farklı debilerin kombinasyonlarını içeren dolum prosesi simülasyonlarına rastlanmamıştır. Ayrıca literatürde depolanan hidrojen kütle miktarı ile ön soğutmalı dolum ilişkisinin birçok farklı durum için incelendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle çalışmaya hem farklı debiler hem de farklı başlangıç basınçlarında analizler yapılarak literatürdeki eksiklikleri gidermek doğrultusunda yön verilmiştir.

3. MODEL VE DOĞRULAMA

Analizlerde kullanılan model, geometri ve ağ yapısı gibi bilgiler bu bölümde detaylı bir şekilde verilmiştir. Yapılan çalışmalar 140 L hacme sahip bir hidrojen depolama tankı için gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın yapılacağı modele karar verildikten sonra ANSYS Design Modular yardımı ile depolama tankına ait 2 boyutlu geometri hazırlanmıştır. Oluşturulan geometrinin ANSYS Mesh modülü ile ağ yapısı oluşturulmuş olup yine aynı modülde kontaklar tanımlanmıştır. Yapılan bu işlemlerin ardından oluşturulan ağ yapısı ile Çizelge 3,4'te verilen sınır şartları kullanılarak analiz ANSYS Fluent ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar için bir doğrulama çalışması yapılmıştır. Öncelikle literatür incelenmiş olup doğrulama için Quinfeng Li ve arkadaşlarının [22] yaptığı çalışma seçilmiştir. Bu çalışmanın seçilmesinin nedeni üzerinde çalışılmak istenen boyutlarda bir tip 3 depolama tankı için bu makale tarafından detaylı bir doğrulama çalışması yapılmış olmasıdır. Quinfeng Li ve arkadaşları [22] tarafından yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar, Liu ve arkadaşları tarafından yapılan teori hesaplamaları [20], Lei ve arkadaşları tarafından yapılan fitting formülü [24] ile karşılaştırılmıştır. Bu tez kapsamında elde edilen doğrulama çalışmasında ise sonuçlar yukarıda belirtilen [20,22,24] tüm çalışmalar ile kıyaslanmıştır. Yapılmış olan analiz doğrulama çalışması, ağ yapısından ve zaman adımından bağımsızlık çalışmaları Çizelge 3.4'te verilen başlangıç ve sınır şartlarına göre yapılmıştır. Doğrulama için elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 3.14'te grafik olarak gösterilmiştir. Karşılaştırma sonuçları incelendiğinde elde edilen sonuçlar [20,22,24] ile benzerlik gösterdiğinden çalışmalara bu model ile devam edilmiştir. Detaylı doğrulama açıklamaları bölüm 3.5 Model Doğrulama'da yapılmıştır. Kullanılan ağ yapısı ve zaman adımı değerleri Quinfeng Li [22] ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır ve analizlerde kullanılmıştır. Ayrıca elde edilen doğrulama sonuçlarından bağımsız olarak oluşturulan modelin ağ yapısından ve zaman adımından bağımsızlığı da hesaplamalara eklenmiştir. Yapılan doğrulama çalışmalarından sonra farklı başlangıç tank iç basıncı ve dolun debilerine göre kombinasyonlar oluşturulmuş ve bu kombinasyon durumları Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Bu çizelgede görüldüğü gibi çalışmada 2, 5, 7 ve 9 MPa başlangıç basıncına sahip tankların her biri için 10, 15, 20, 25 ve 40 g/s debilerde analizler yapılmıştır. Çalışmanın temel amacı tank içerisindeki hidrojenin ve tüm katmanların ulaştığı son sıcaklık değerinin TIR J2601'de [5] izin verilen 85°C (358 K) değerine göre kontrol edilmesidir. Elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde incelenmiş olup tankın ulaştığı son sıcaklık değerinin izin verilen sınırları geçtiği durumlarda hidrojen giriş sıcaklığı ön soğutmaya tabii tutularak düşürülmüştür ve analizler

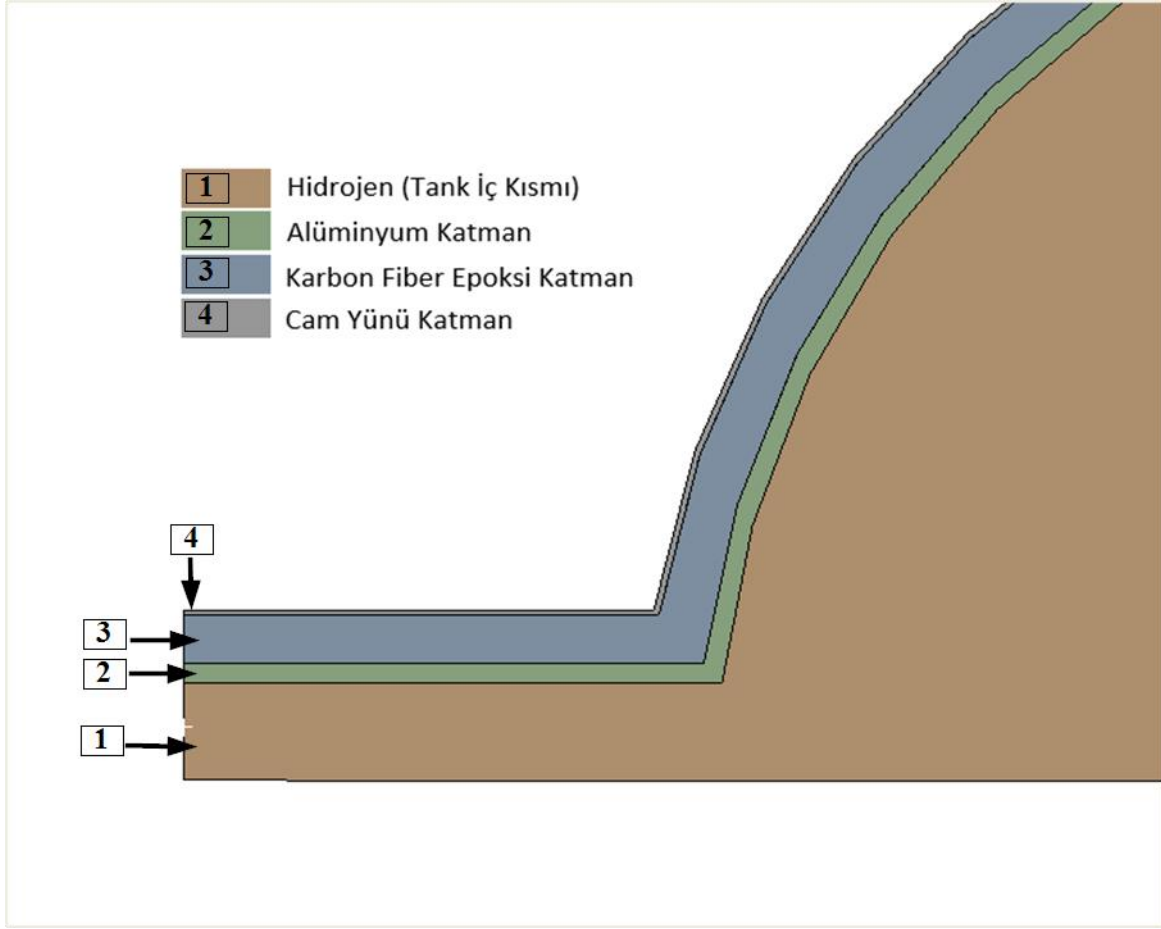
tekrarlanmış sıcaklıklar tüm durumlar için izin verilen sınırlar içerisinde tutulmuştur ve bu durumlar için depolanan hidrojen kütlesi de incelenmiştir.

Çizelge 3.1. Tank iç basıncı ve dolun debilerine göre kombinasyonlar

Hidrojen Debisi [g/s]	Tank Başlangıç Basıncı [MPa]	Tank Final Basıncı [MPa]	İzin Verilen Maksimum Sıcaklık [K]	Hidrojen Dolun Sıcaklığı [K]
10	2-5-7-9	35	358	293
15	2-5-7-9	35	358	293
20	2-5-7-9	35	358	293
25	2-5-7-9	35	358	293
40	2-5-7-9	35	358	293

2.1. Geometri

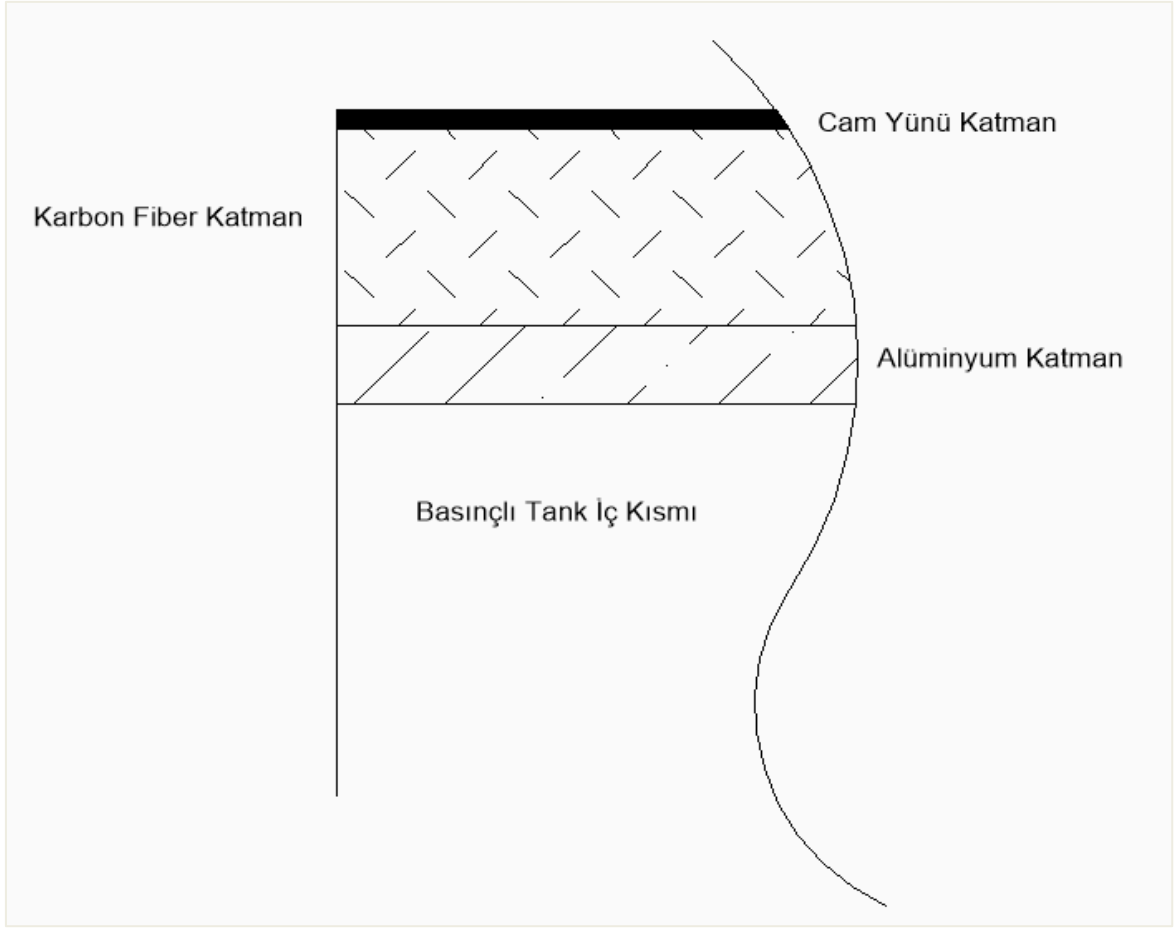
Bu çalışmada, Tip 3, 140 L hacme sahip bir hidrojen depolama tankının dolun prosesi incelenmiştir. Yapılan hesaplamalarda kullanılan depolama tankı geometrisi genel görünümü Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Katmanlara ait detaylı gösterim ise Şekil 3.3’te mevcuttur. Şekil 3.4’te hidrojenin nozul aracılığı ile giriş yönü ve katmanlara ait et kalınlıkları verilmiştir. Gösterilen detay ölçülerin ardından Şekil 3.5’te görüleceği gibi tanka ait diğer ölçüler isimlendirilmiş olup Çizelge 3.2’de detaylı olarak verilmiştir. Şekil 3.6’da ise tankın iç yarıçap ölçüsünün detaylı bir gösterimi mevcuttur. Tank için oluşturulan ağ yapısının genel bir görüntüsü Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Mesh gösteriminin yakından verilmesinin nedeni ağ yapısı sık olduğundan genel görüntüde ağ yapısı anlaşılmamaktadır. Yapılmış olan tüm analizler Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da verilen ağ yapısı ile yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan Tip 3 hidrojen tankı 3 katmandan oluşmaktadır. Bu katmanlarda birincisi hidrojen ile direkt temasta bulunup sızdırmazlığı sağlayan alüminyum katmandır ve et kalınlığı 4 mm’dir, ikinci katman tankın yüksek iç basınca karşı dayanımını sağlayan karbon-fiber katmanın et kalınlığı ise 10 mm’dir. Son katman olan cam yünü ise ısı kaybını ve kişilere gelebilecek zararları önlemek amacıyla kullanılmış olup et kalınlığı 1 mm’dir. Tank dolunu için kullanılan nozul girişinin iç çapı ise 40 mm’dir. Ayrıca analizde kullanılan malzemelerin mekanik ve termal özellikleri Çizelge 3.3’te verilmiştir [22].



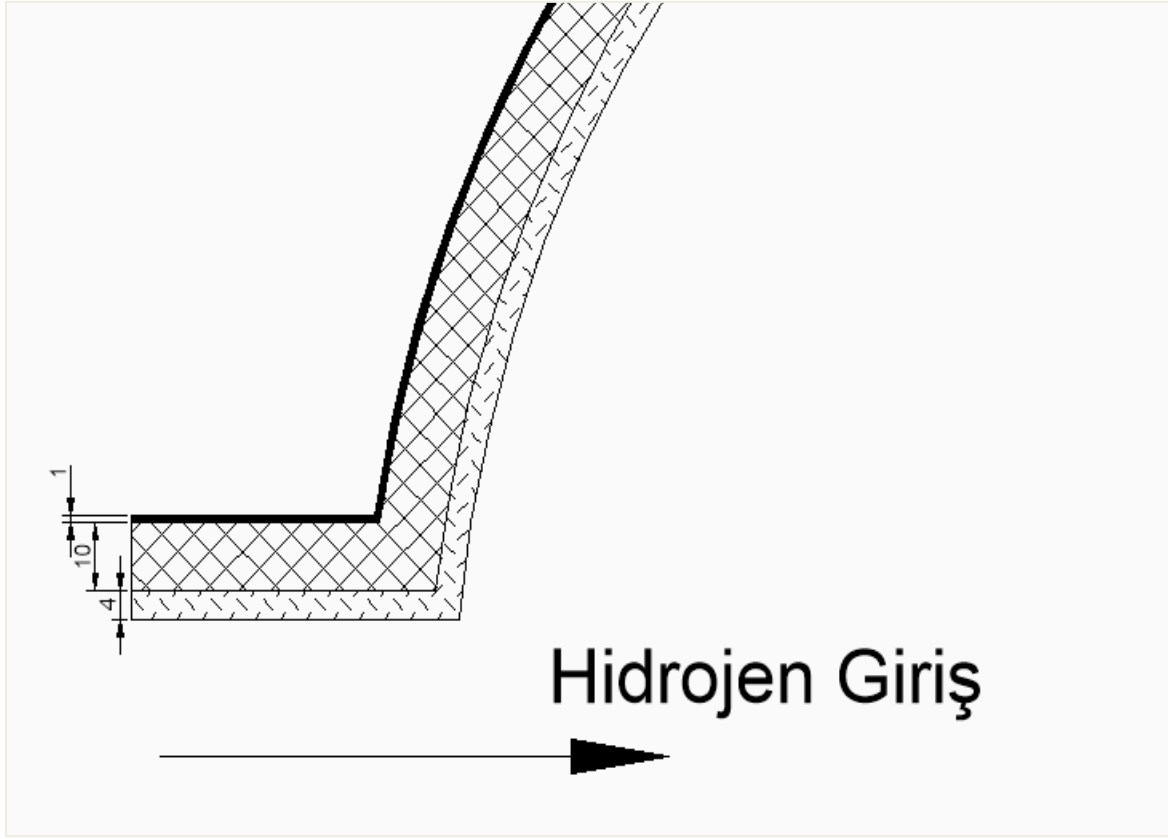
Şekil 3.1. Tank geometrisi detay



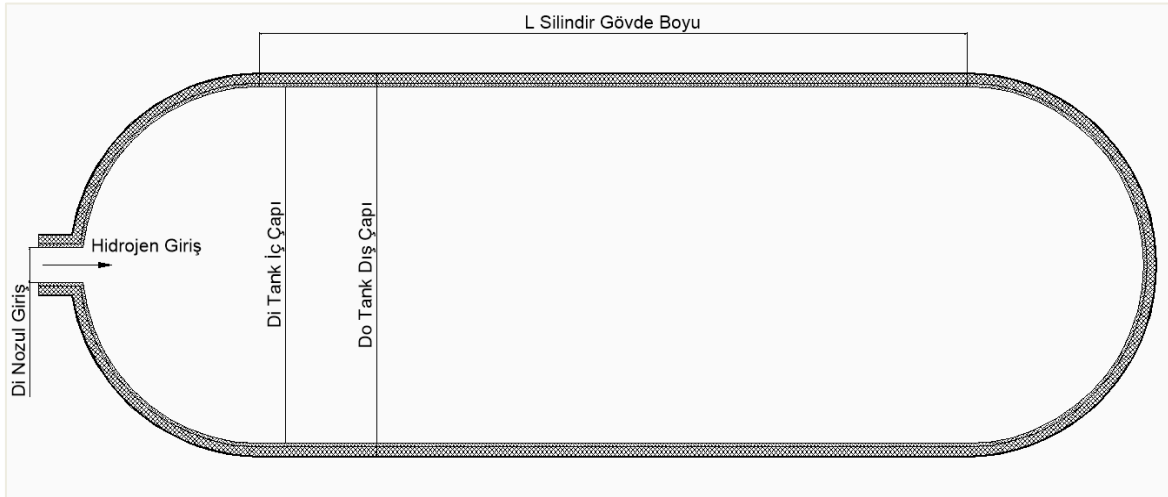
Şekil 3.2. Tank geometrisi genel görünüm



Şekil 3.3. Tank katmanları detaylı gösterim



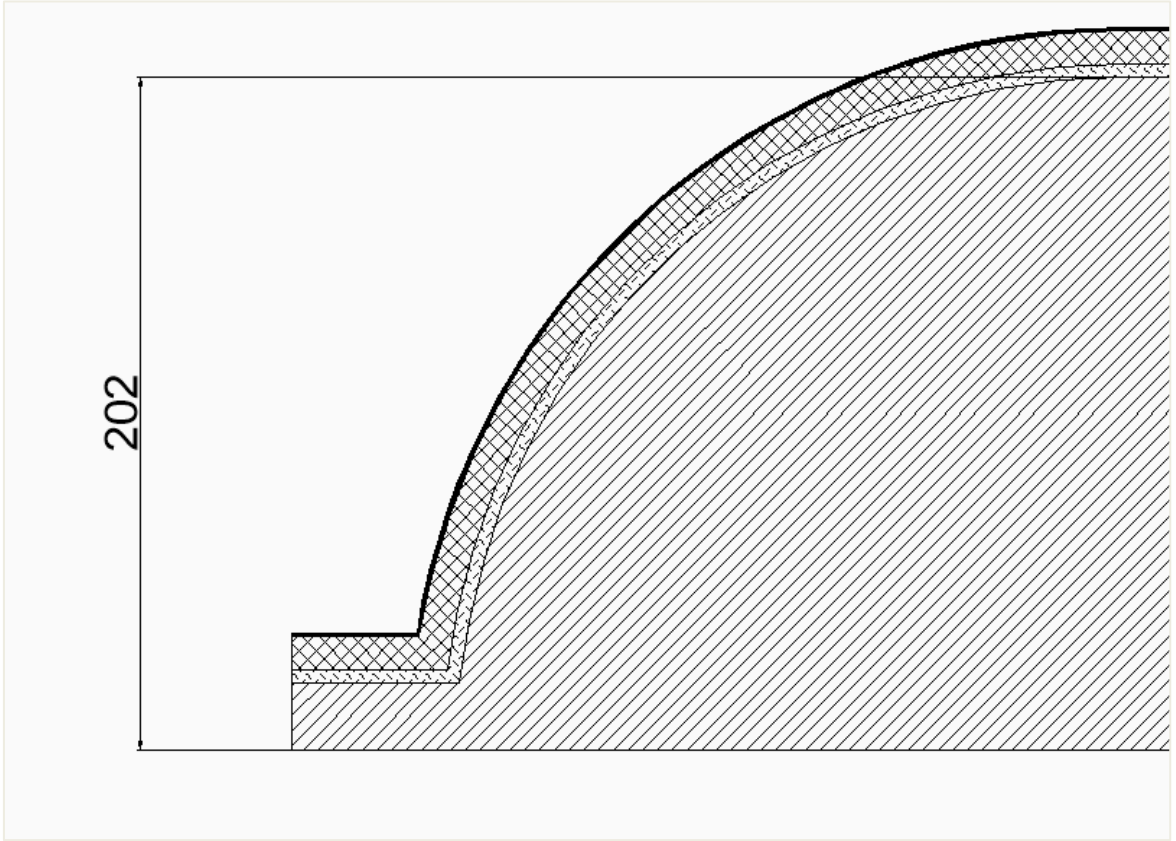
Şekil 3.4. Tank katmanları et kalınlığı ölçüleri (mm)



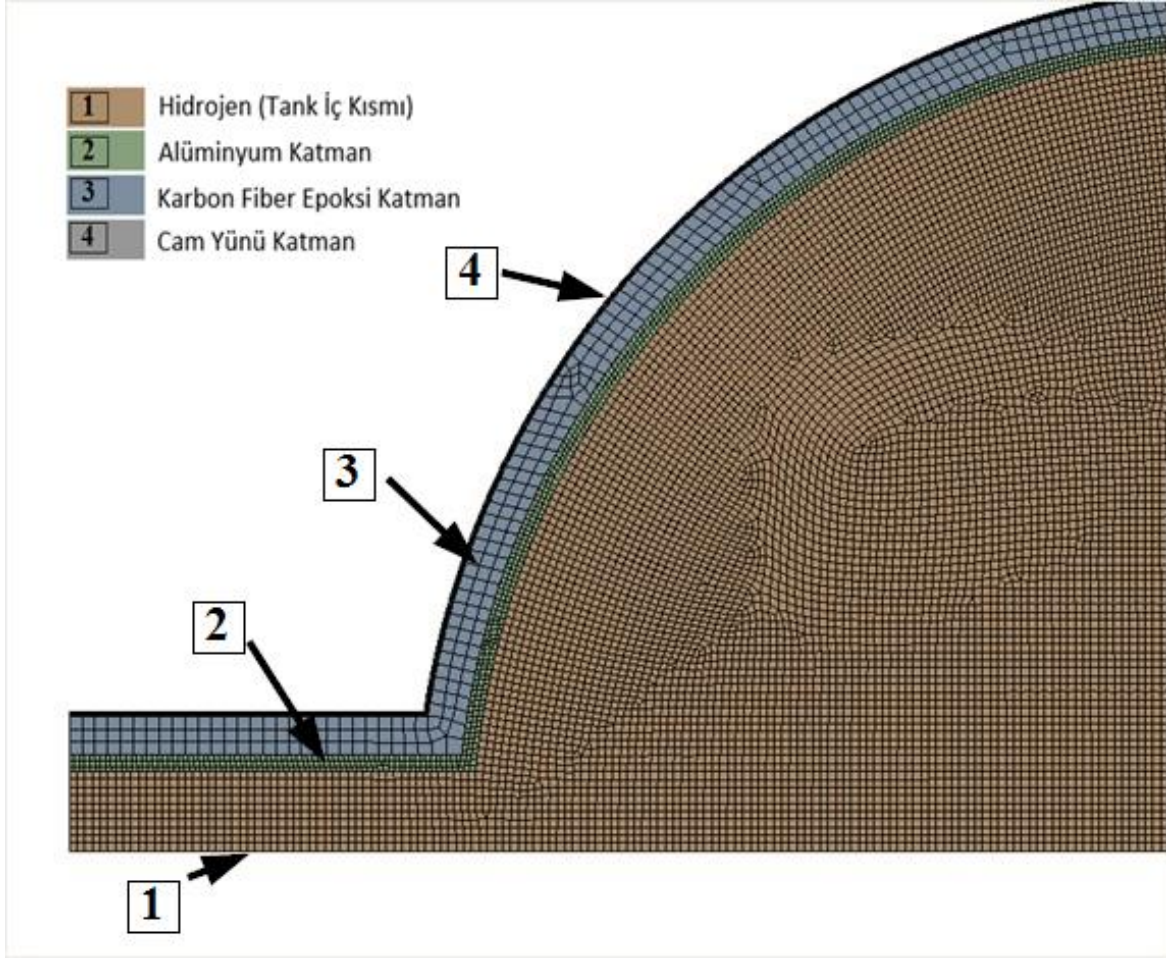
Şekil 3.5. Hesaplamalarda kullanılan tank ölçüleri

Çizelge 3.2. Tank ölçüleri

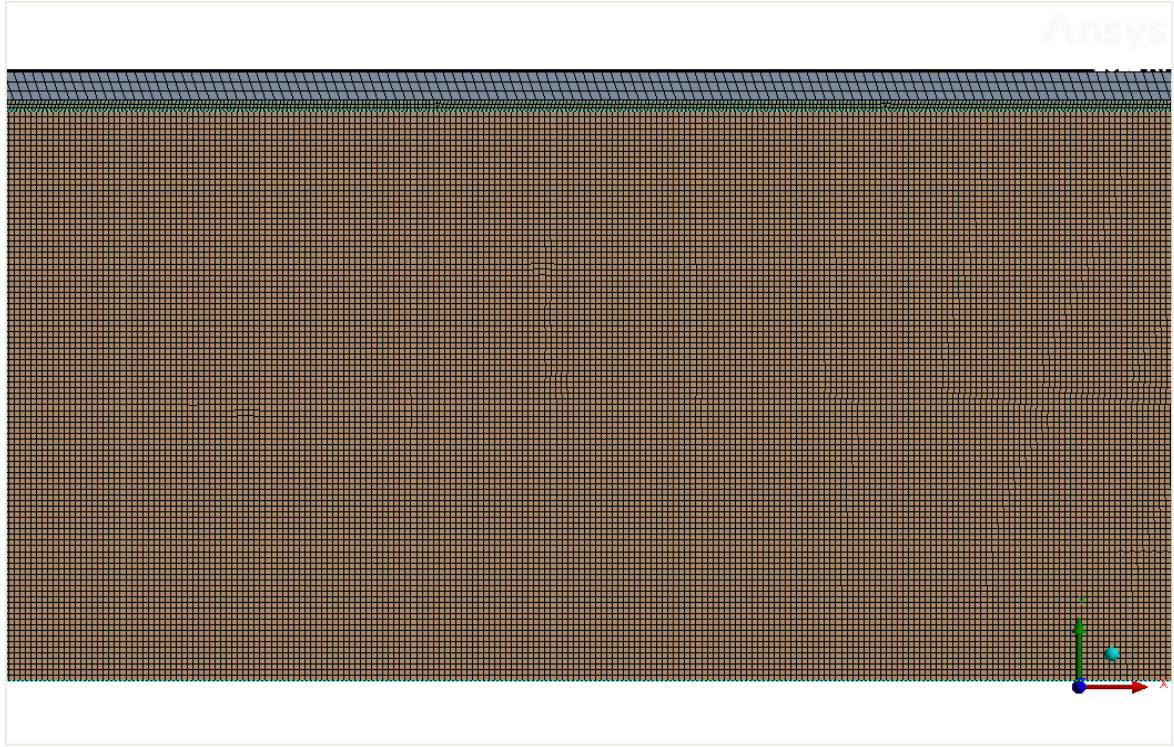
Açıklama	Değer	Birim
Di Tank İç Çapı	404	mm
Do Tank Dış Çapı	434	mm
Di Nozul Giriş İç Çapı	40	mm
Silindirik Gövde Boyu	808	mm
Alüminyum Katman Et Kalınlığı	4	mm
Karbon Fiber Katman Et Kalınlığı	10	mm
Cam Yünü Katman Et Kalınlığı	1	mm



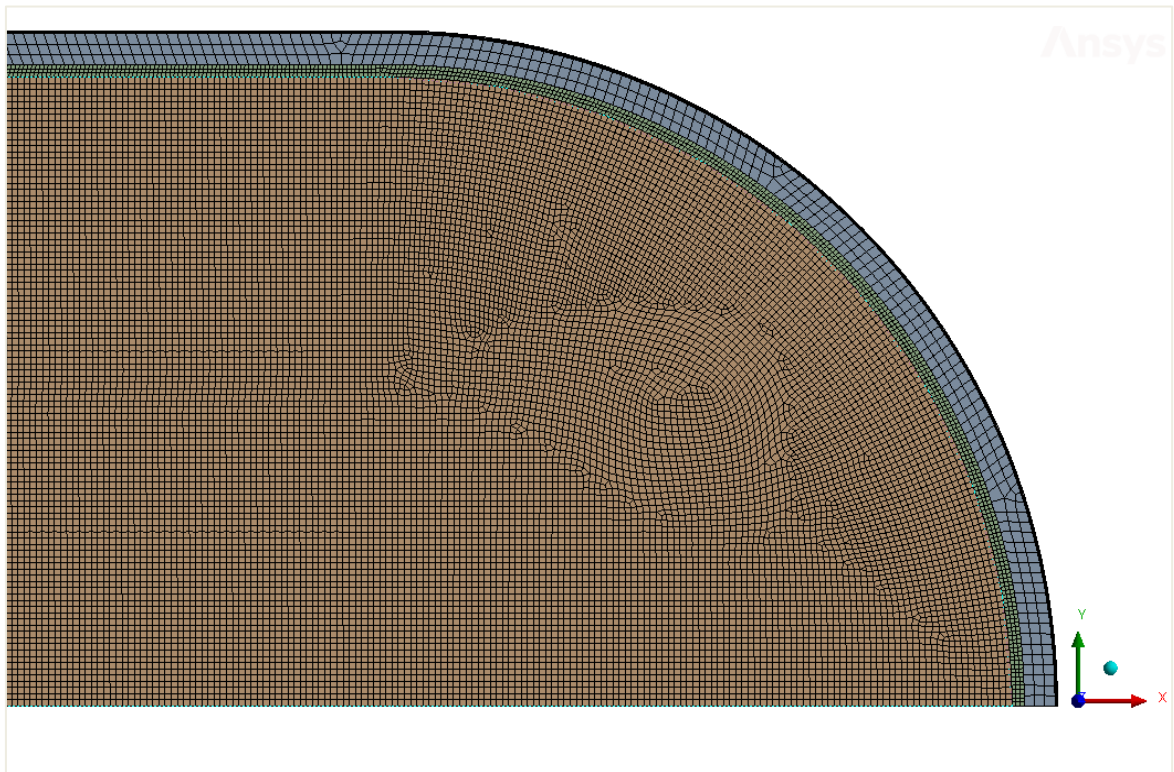
Şekil 3.6. Tank iç yarıçap ölçüsü



Şekil 3.7. Ağ yapısı genel görünüm



Şekil 3.8. Ağ yapısı genel görünüm 2



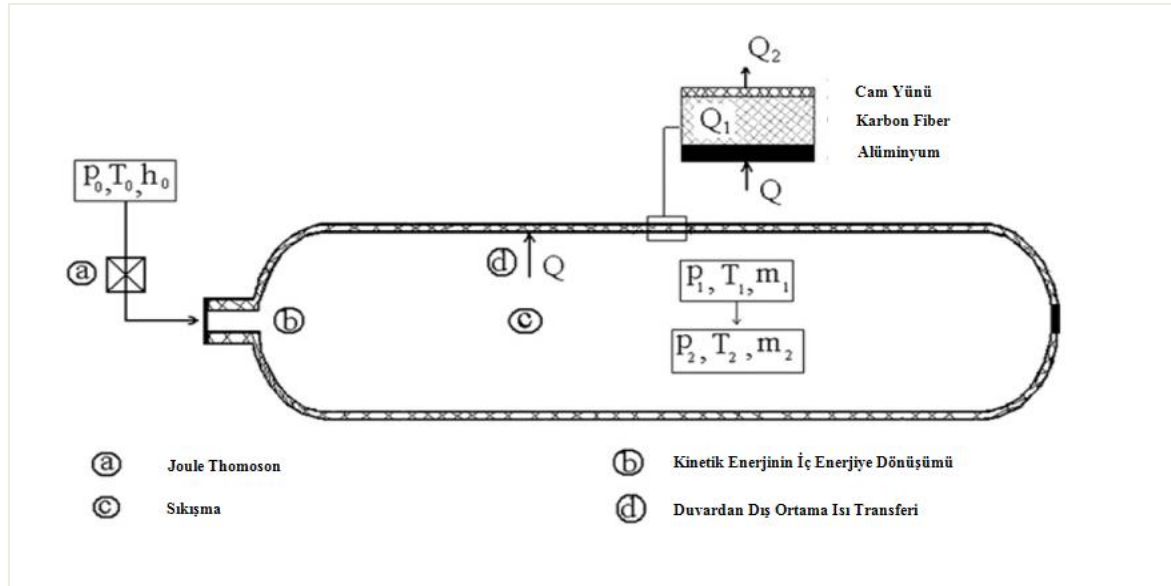
Şekil 3.9. Ağ yapısı genel görünüm 3

Çizelge 3.3. Malzeme özellikleri

Katman	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ısı (J/kgK)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)
Alüminyum	2700	902	238
Karbon Fiber Epoksi	1513	920	3,72
Cam Yünü	2050	878,4	0,133

2.2. Termodinamik Analiz

Şekil 3.10'da kompozit silindirde doldurma işleminin teorik modeli gösterilmektedir. Bu modelde, tank ve silindir arasındaki boru hattındaki ısı transferi ihmal edilmiştir. Basınç ve sıcaklığın hidrojen depolama silindirinde üniform olduğu varsayılmıştır. Dolum başlamadan önce silindir içerisine gönderilen hidrojenin başlangıç sıcaklığı, kütlesi, basıncı ve entalpisi T_0 , P_0 , m_0 ve h_0 olarak gösterilmiştir. Ayrıca dolumdan önce silindirdeki sıcaklık, basınç ve kütle T_1 , P_1 ve m_1 'dir ve dolumdan sonra tank içerisindeki hidrojenin T_2 , P_2 ve m_2 'dir. Böylece, enerji ve kütle korunumu denklemleri aşağıdaki gibi tanımlanabilir [20]:



Şekil 3.10 Termodinamik Model

$$Q - W = m_2 u_2 - m_1 u_1 - m_0 h_0 \quad (3.1)$$

Çalışmanın devamında görülebileceği gibi yapılan HAD hesaplamalarında tank duvarı ile ortam arasında gerçekleşen ısı transferi hesaba katılmıştır fakat yapılan termodinamik

analizde tank dış duvarından ortama gerçekleşen ısı transferi hesaba katılmamıştır. Bu nedenle denklem:

$$h = u + pV \quad (3.2)$$

$$u = h - pV \quad (3.3)$$

Dönüşümü yapılarak;

$$0 = m_2(h_2 - p_2V_2) - m_1(h_1 - p_1V_1) - h_0(m_2 - m_1) \quad (3.4)$$

$$0 = m_2(h_2 - h_0) - m_1(h_1 - h_0) - V(P_2 - P_1) \quad (3.5)$$

halini almaktadır. Elde edilen denkleme Çizelge 3.4'te verilen sınır şartlarında gösterilen değerler yerine konulduğunda:

$$0 = m_2c_v(T_2 - T_0) - m_1c_v(T_1 - T_0) - V(P_2 - P_1) \quad (3.6)$$

$$T_1 = T_0, T_0 = 293 \text{ K} \quad (3.7)$$

$$T_2 = \frac{V*(P_2-P_1)}{m_2c_v} + 293 \quad (3.8)$$

olarak yazılabilir. Buradaki elde edilen T_2 sonucundan görüldüğü gibi 293 K üzerine pozitif bir değer eklenmektedir ve sıcaklık dolmuş işlemi esnasında arttığı görülmektedir.

Hidrojen hızlı dolusunda sıcaklık artışı gerçekleşmektedir ve bu artış yukarıdaki termodinamik denklemlerle açıklanabilir. Doldurma sırasında, üç ana termodinamik olay nedeniyle gaz sıcaklığında önemli bir artış meydana gelmektedir. İlki, dağıtıcıdan gelen ve vanadan geçen hidrojenin, Joule-Thomson etkisi ile gaz sıcaklığında artışa neden olmasıdır. İkinci ise, daha yüksek basınçlı depolama tankında üretilen hidrojenin kinetik enerjisinin, silindire dolmuş sürecinde iç enerjiye dönüşmesidir. Bu, sıcaklık artışına neden olan tüm faktörler arasında en önemlisidir. Doldurma sırasında sıcaklık artışına neden olan üçüncü neden ise, yakıt istasyonundan daha yüksek basınçlı gazın verilmesiyle silindir içindeki

gazın sıkıştırılmasıdır. Sıkıştırma tüm silindir içerisinde gerçekleşir. Silindir ile ortam arasındaki sıcaklık farkı da silindirdeki ısının bir kısmının ortama geçmesine neden olabilir.

2.3. Sayısal Analiz Modeli

Tüm simülasyonlarda standart k-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır [22]. Kullanılmış olan bu modelde akıştaki türbülansı tanımlamak için kinetik enerjisi (k) ve türbülans enerji yayılımı (ϵ) değerleri kullanılmaktadır. k-epsilon türbülans modeli, akışkanlar dinamiği alanında sıkça kullanılan bir matematiksel modeldir. Bu model, türbülanslı akışların modellenmesinde kullanılır ve bu akışların özelliklerini belirlemek için diferansiyel denklemler kullanır. Bu modelde, türbülanslı akışın hareketli ve kararsız doğası hesaba katılır ve bu sayede akışın karakteristik özellikleri daha doğru bir şekilde tanımlanır. Modelde kullanılan k ve epsilon değişkenleri, akışkanın hızı ve kinetik enerjisi gibi faktörleri hesaplamak için kullanılır. Bu model, türbülanslı akışın özelliklerini hesaplamak için etkili bir araçtır ve gerçek fizik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Analizde kullanılan kütle korunumu, momentum korunumu ve enerjinin korunumu denklemleri şu şekildedir:

Kütle Korunum Denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.9)$$

Momentum Korunum Denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\underline{\tau}) + \rho g \quad (3.10)$$

Enerji Korunum Denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot \{k_{eff} \nabla T + [\underline{\tau} \cdot \vec{v}]\} \quad (3.11)$$

Kullanılan bu denklem setinde $\underline{\tau}$ tensörü = $\mu \left[\nabla \vec{v} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right]$ ile ifade edilmektedir.

Ayrıca k-epsilon türbülans modelinde kullanılan transport denklemleri ise şu şekildedir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \omega \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3.13)$$

Bu formüllerin çözümünde analizde kullanılan değerler ve kullanılan diğer katsayılar [23] aşağıda gösterilmiştir:

$$C_{1\varepsilon} = 1,52, \quad C_{2\varepsilon} = 1,92, \quad C_{1\mu} = 1,52, \quad C_{1\mu} = 0,09 \quad \sigma_k = 1,0 \quad \sigma_\varepsilon = 1,3$$

Analiz sonuçlarına ulaşmak için ANSYS Fluent 2022 programı kullanılmıştır. Çözüm süresini kısaltmak adına silindirin yapısı için iki boyutlu eksenel simetrik girdaplı bir HAD modeli kullanılmıştır. Ayrıca dolun debisi 0,009 kg/s'den büyük olmasından dolayı yer çekimi etkisi ihmal edilmiştir [19,24]. Yapılan analizlerde zaman adımı 0,05 s olarak ayarlanmış olup, kullanılan bu zamanın adımı için bağımsızlık çalışmaları yapılmıştır, her zaman adımı için 20 iterasyon kullanılmıştır [22]. Yapılan analiz sıkıştırılabilir bir akış durumu olduğundan sonuçları daha hassas elde etmek için bir gerçek gaz denklem modeli olan Redlich-Kwong Denklem seti [36,37] kullanılmıştır. Kullanılan denklemler aşağıda gösterilmiştir.

$$P = \frac{R*T}{V_m - b} - \frac{a}{\sqrt{T} * V_m * (V_m + b)} \quad (3.14)$$

Bu denklemdeki a ve b değerleri aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanabilir.

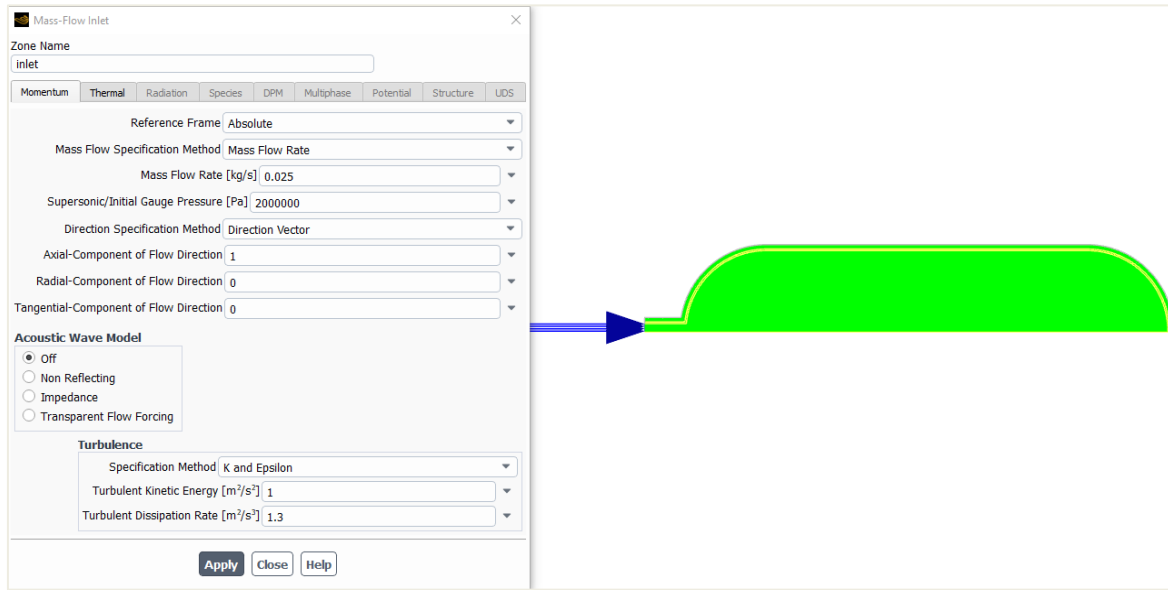
$$a = 0,42748 * \frac{R^2 * T_c^{2,5}}{P_c} \quad (3.15)$$

$$b = 0,08664 * \frac{R * T_c}{P_c} \quad (3.16)$$

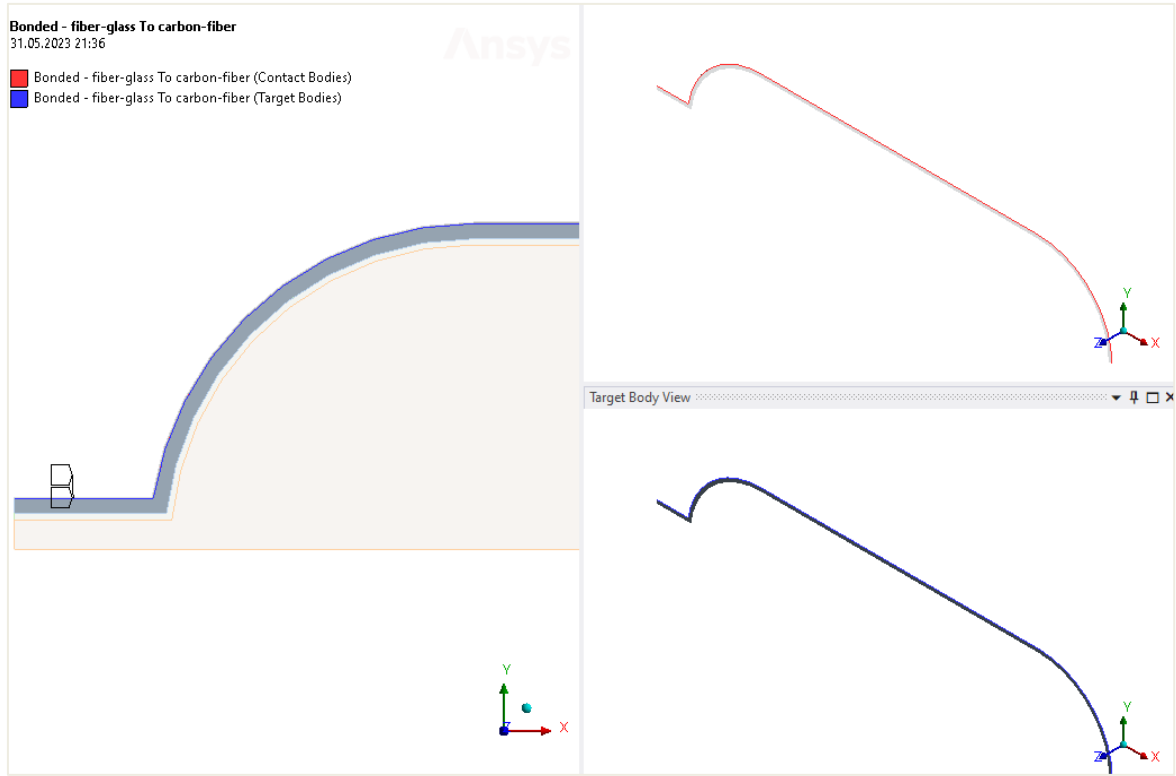
2.4. Başlangıç ve Sınır Koşulları

Çalışmaya başlamadan önce analiz modeli hazırlanmış olup oluşturulan modelin doğruluğu üzerinde çalışılmıştır. Bu doğrulama için analizde kullanılan basınç ve başlangıç şartlarına ait veriler Çizelge 3.4'te gösterilmiştir. Hidrojen, kütle girişi olarak ANSYS programında

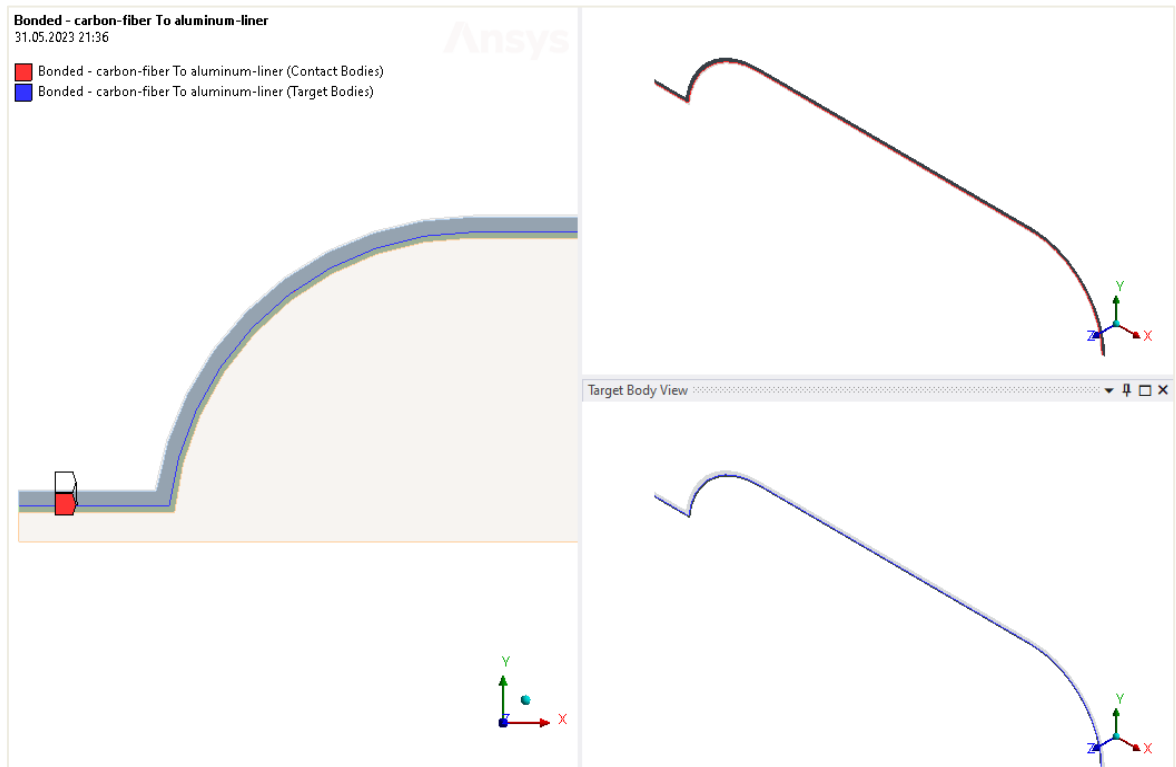
tanımlanmıştır. Hidrojen giriş tanımlamasına ait ekran görüntüsü Şekil 3.10’de verilmiştir, aynı şekilde mavi okla gösterilen kenar hidrojen girişinin tanımlandığı konumdur. Yapılan analizde birbirine temasta bulunan yüzeyler için ısı geçişinin sağlanması için kontaklar tanımlanmıştır. Şekil 3.11’de Karbon Fiber ile Cam yünü Katman arasındaki kontak, Şekil 3.12’te karbon fiber ile alüminyum katman arasındaki kontak, Şekil 3.13’te ise hidrojen ile alüminyum katman arasında tanımlanan kontaklara ait program görselleri verilmiştir. Tanımlanan bu kontakların amacı farklı malzemelerden oluşan katmanlar arasındaki ısı iletimini sağlamaktır. Yapılan tüm tanımlamaların ardından model için farklı başlangıç tank iç basıncı ve dolun debilerine göre kombinasyonlar oluşturulmuş ve bu kombinasyon durumları da Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Tank dolun prosesi final basıncı her durum için 35 MPa olarak ayarlanmıştır. Ayrıca Şekil 3.10’de görüldüğü gibi k ve epsilon değerleri 1,0 ve 1,3 olarak tanımlanmıştır [23].



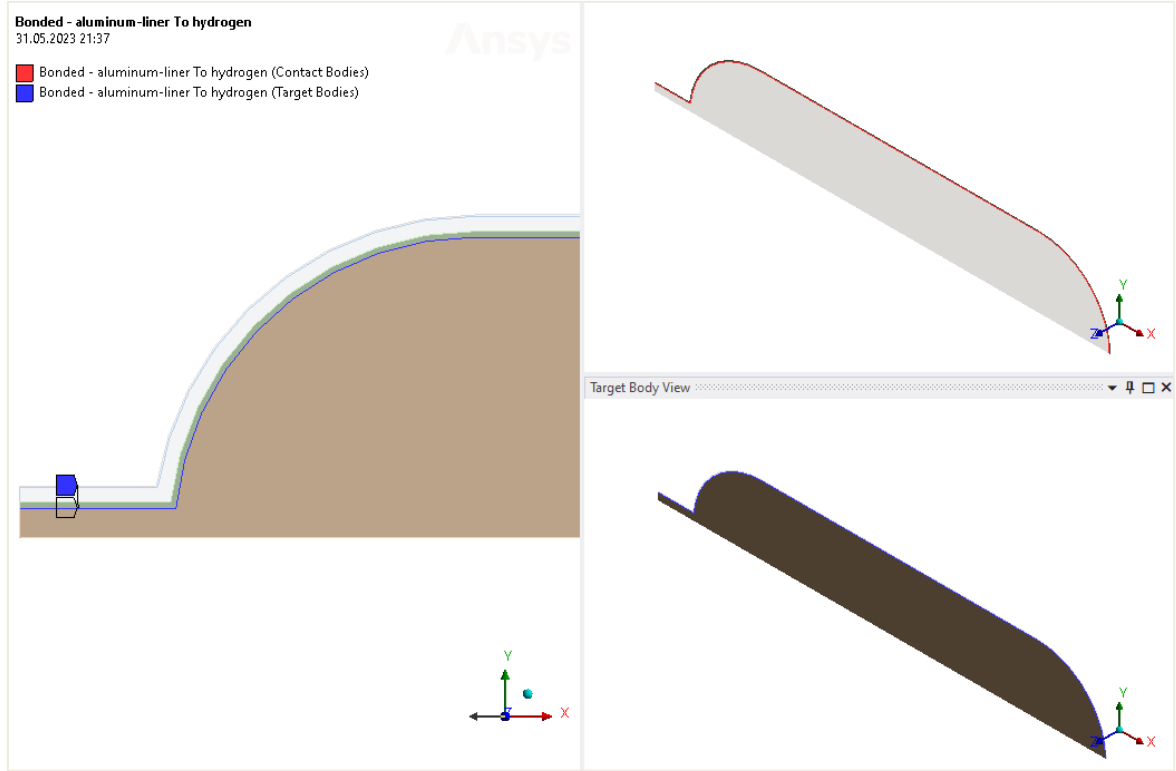
Şekil 3.11. Hidrojen giriş değerleri



Şekil 3.12. Karbon fiber-cam yünü katman kontak



Şekil 3.13. Karbon fiber-alüminyum katman kontak



Şekil 3.14. Hidrojen-alüminyum katman kontak

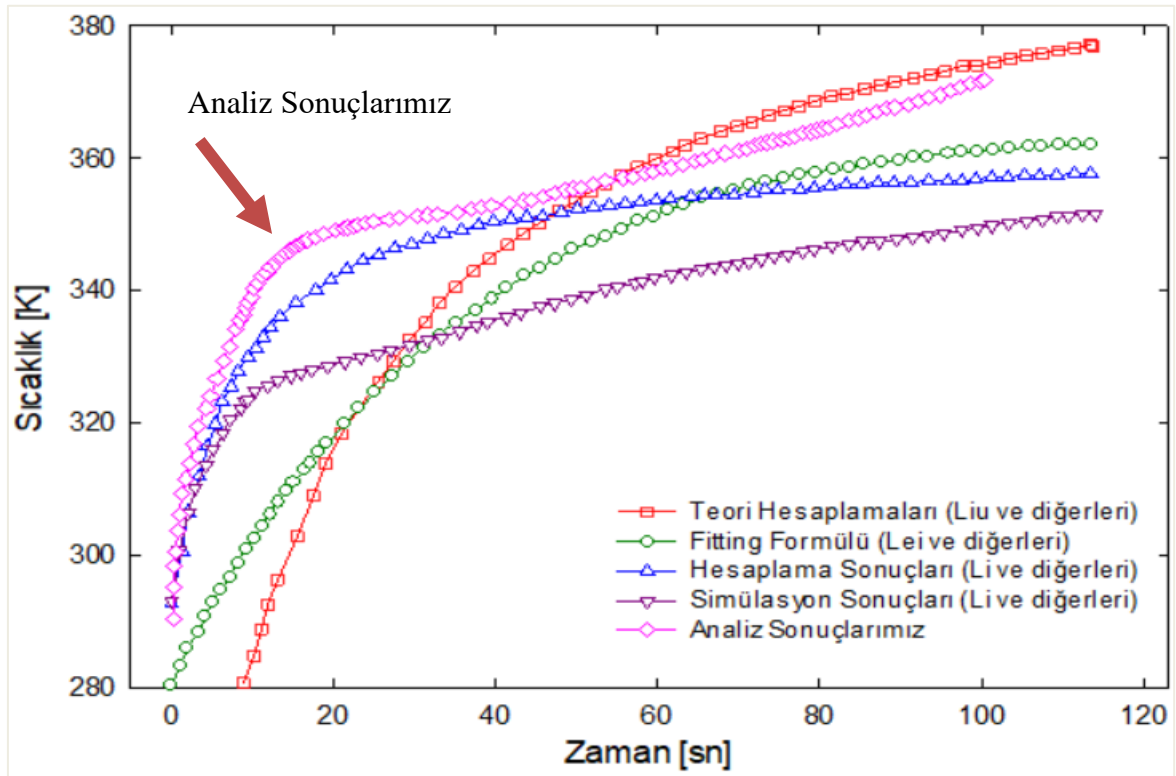
2.5. Model Doğrulama Çalışması

Hidrojen depolama tankı dolmuş sürecine ait model kurulumundan sonra modelin doğruluğu için analiz çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar, doğruluğu deneysel metotlarla kanıtlanmış çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [20,22,24]. Model doğrulama için yapılan analiz, Çizelge 3.4'te gösterilen sınır ve başlangıç koşullarına göre gerçekleştirilmiştir. Farklı araştırmacılar tarafından elde edilen 35 MPa hidrojen depolama tankı dolmuş süreçlerinde meydana gelen sıcaklığın zamana göre değişim grafiği ile kendi çalışmamızda bulunan sıcaklık-zaman eğrisi de Şekil 3.14'te bulunan bu grafiğe eklenmiştir ve ok ile gösterilmiştir. Şekil 3.14'ten de görüleceği üzere çalışmamız için elde edilen sonuçlar [20,22,24] ile büyük benzerlik göstermektedir. Elde edilen bu benzerlikten sonra model doğruluğu gösterilmiş olup doğrulama sonrasında literatürdeki mevcut çalışmaların geliştirilmesi gerektiği düşünülmüştür. Bu hedefler doğrultusunda Çizelge 3.1'de verilen dolmuş debileri ve başlangıç basınçlarının farklı kombinasyonları ile analizler gerçekleştirilmiştir. Son sıcaklık gözlemlenerek, standartlar tarafından [13] 85°C (358 K) olarak belirlenmiş değere göre incelenmiştir ve bu sıcaklığın aşılması durumunda hidrojenin giriş sıcaklığı son sıcaklığa göre optimize edilmiştir. Analizler sonucunda izin verilen sıcaklığın standardın üzerinde

olduğu durumlarda gerekli optimizasyonlar yapılmıştır. Bu değişiklikler sonucunda analizler tekrarlanmış ve sonuçlar incelenmiştir. Yapılan sıcaklık çalışmalarının ardından her durum için depolama işlemi sonundan tank içerisindeki hidrojen kütlesi incelenmiştir.

Çizelge 3.4. Başlangıç ve sınır şartları

Parametreler	Değer	Birim
Hidrojen Giriş Debisi	25	g/s
Hidrojen Tankı Final Basınç	35	MPa
Tank Başlangıç Sıcaklığı	293	K
Hidrojen Giriş Sıcaklığı	293	K
Tank Başlangıç Basıncı (P_0)	2	MPa
Duvar ile Dış Ortam Arasındaki Isı Transfer Katsayısı	10	W/m ² K

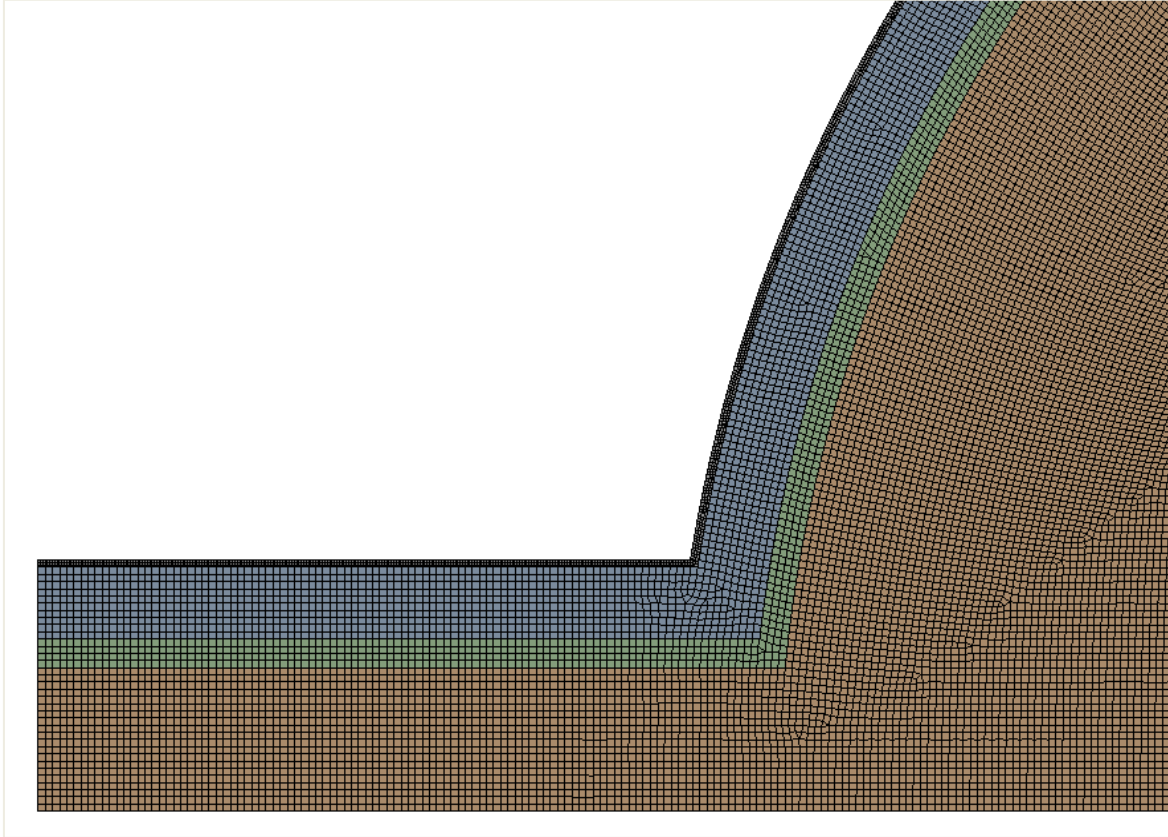


Şekil 3.15. Akış süresi ile sıcaklık değişimlerinin sonucu (Kendi analiz sonuçlarımız, Liu ve diğerlerinin teori hesaplama sonuçları [20], Lei ve arkadaşlarının formülü [24], Qianfeng Li ve arkadaşlarının hesaplaması [22], Qianfeng Li ve arkadaşlarının simülasyonu [22])

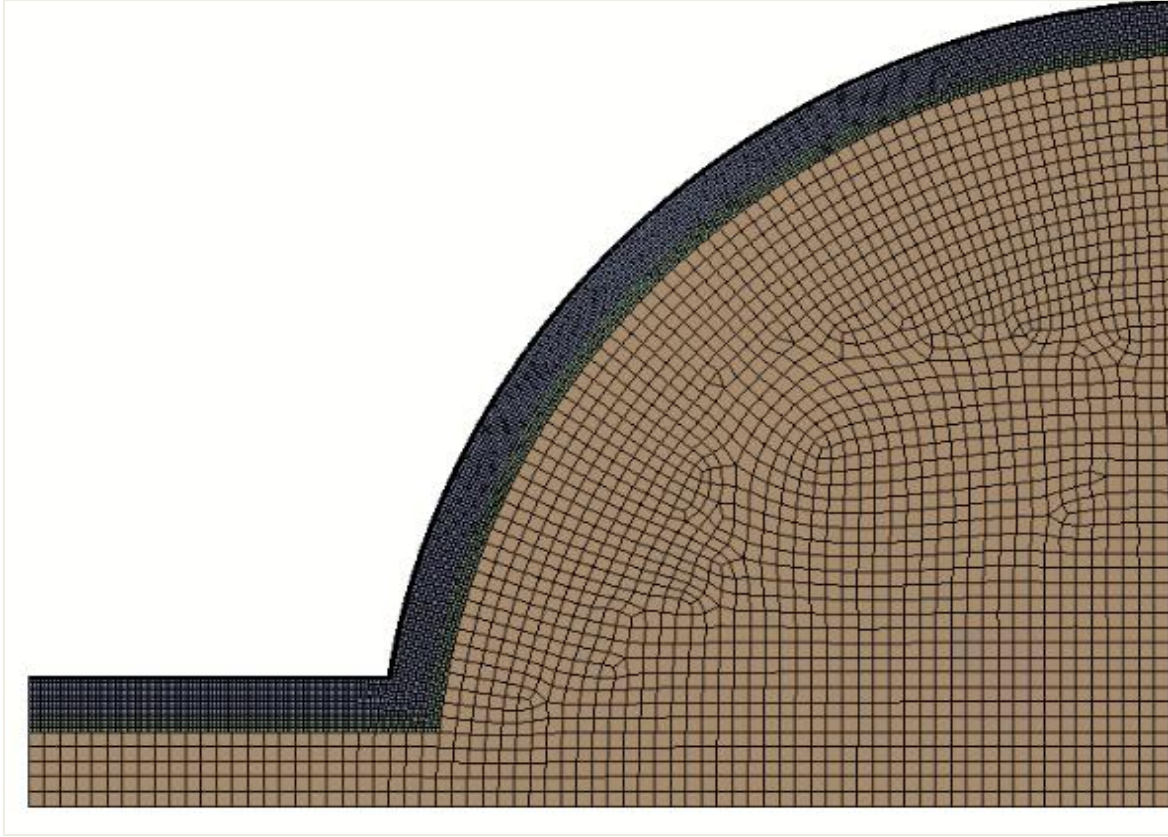
Şekil 3.14 incelendiğinde, elde edilen sonuçlar dolum sürecinin başlangıcında (10 saniyeye kadar) Liu ve arkadaşlarının [22] simülasyon sonucuna yakındır. Öte yandan, sonuçlar Lei ve arkadaşları [24] tarafından geliştirilen formülden elde edilen sonuçlar ve Liu ve

arkadaşları [20] tarafından geliştirilen teori hesaplamasına çok yakındır. Bunlara dayanarak HAD modeli bu literatürler ile doğrulanmış ve sayısal çalışmalara devam edilmiştir.

Yapılan simülasyonda kullanılan ağ yapısı ayarları Qianfeng Li ve arkadaşlarının [22] yaptığı çalışmadan alınmıştır. Hesaplamalarda kullanılan ağ yapısı detayları Şekil 3.7 detaylı bir şekilde gösterilmiş ve ardından ağ yapısı kalitesi artırılmış, hücre boyutları küçültülmüştür ve sık ağ yapısı Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Yapılan bu işlemde sonra simülasyon yeni ağ yapısı ile tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca ağ yapısında yapılan iyileştirmeye ek olarak, ağ boyutu artırılmış ve sayısı azaltılmış olup elde edilen sonuçlar ve kullanılan kaba ağ yapısı Şekil 3.16'de verilmiştir.



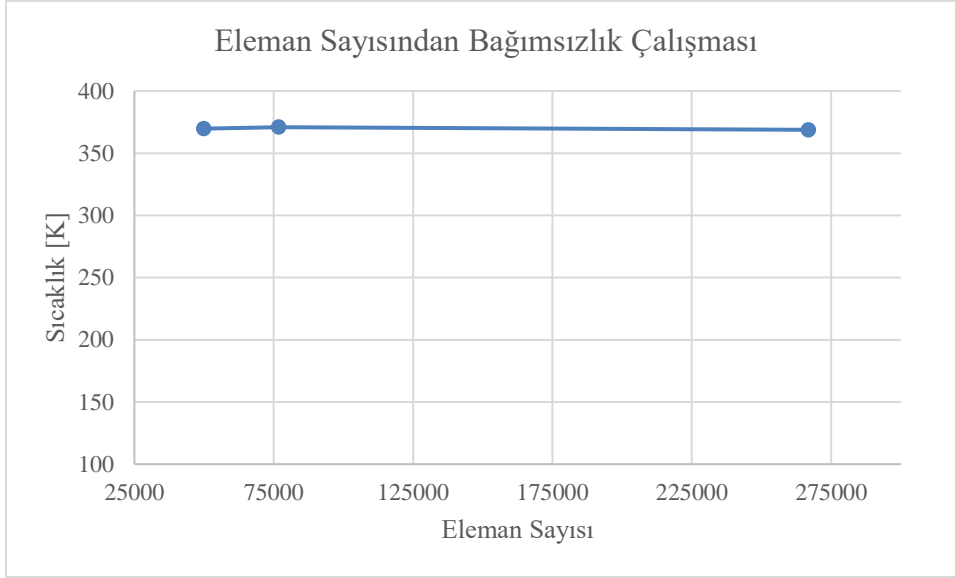
Şekil 3.16. Sık ağ yapısı (1 mm)



Şekil 3.17. Kaba ağ yapısı (4 mm)

Çizelge 3.5. Farklı ağ yapıları için sonuç karşılaştırılması

Ağ Yapısında kullanılan ağ boyutu	Eleman Sayısı	Final Sıcaklık (K)
Kaba ağ yapısı (4 mm)	49987	369,73
Qianfeng Li ve arkadaşlarının ağ yapısı (2 mm)	76819	370,90
Sık ağ yapısı (1 mm)	266888	368,80



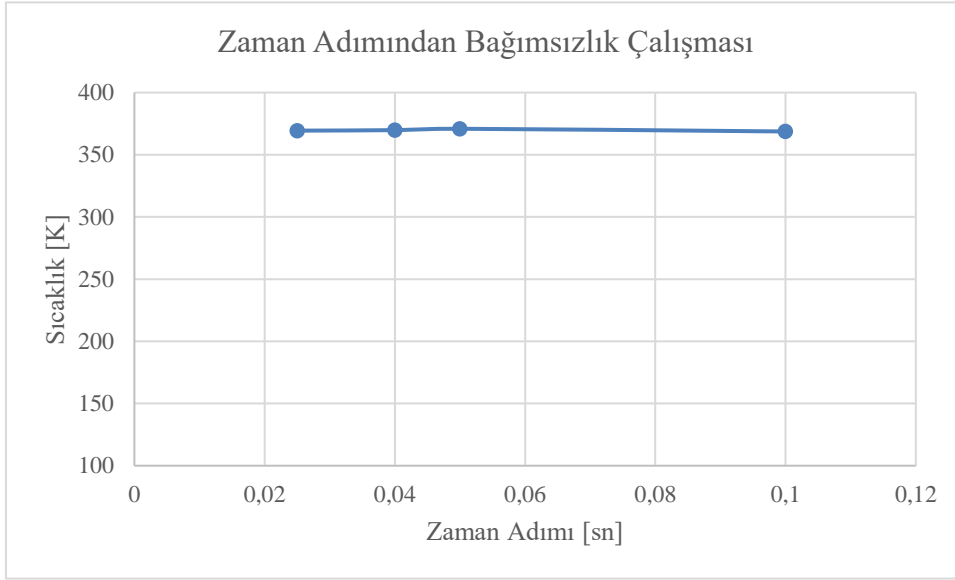
Şekil 3.18. Eleman sayısından bağımsızlık testi

Sonuçlar incelendiğinde kaba ağ yapısında 49987 adet eleman elde edilmiştir ve bu ağ yapısı ile yapılan analizde son sıcaklık ise 369,73 K olarak bulunmuştur. Yapılan diğer çalışma olan sık ağ yapısında ise 266888 adet eleman oluşturulmuştur ve bu ağ yapısı ile son sıcaklık 368,80 olarak elde edilmiştir. Model doğrula ve tüm analizlerde kullanılmış olan Qianfeng Li ve arkadaşlarının ağ yapısında ise 76819 adet eleman elde edilerek son sıcaklık 370,90 K olarak hesaplanmıştır. İyileştirilmiş ağ yapısı ve Qianfeng Li ve arkadaşlarının ağ yapısı arasında final sıcaklık için %0,6 değerinde bir fark görülmüştür. Elde edilen bu farkın çok düşük olmasından dolayı çözüm süresi ve depolama alanını verimli kullanabilmek adına Qianfeng Li ve arkadaşlarının ağ yapısı çözümlerde [22] kullanılmasına karar verilmiştir.

Modelin ağ yapısından bağımsızlığının tespitinin ardından zamanı bağlı problemlerde bir diğer önemli faktör olan zaman adımı üzerinde de çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada 0,025 sn, 0,04 sn, 0,05 sn ve 0,1 saniye olmak üzere 4 farklı zaman adımı ve Çizelge 3.4'te verilen başlangıç ve sınır şartları kullanılarak analizler yapılmış olup karşılaştırmalı sonuçlar aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi zaman adımı doğrulaması için yapılan ilk çalışmada bir zaman adımı 0,025 saniye olarak kullanılmıştır. Bu analizden elde edilen son sıcaklık değeri 369,4 K'dir. Yapılan ikinci çalışmada ise zaman adımı 0,04 saniye olarak kullanmış ve son sıcaklık değeri 369,8 K ve son olarak üçüncü çalışmada ise zaman adımı 0,10 saniye olarak tanımlanmış ve son sıcaklık 368,7 K olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.6. Farklı zaman adımları için sonuç karşılaştırılması

Zaman Adımı (sn)	Final Sıcaklık (K)
0,05 (Qianfeng Li ve arkadaşlarının zaman adımı)	370,9
0,025 saniye zaman adımı (ilk çalışma)	369,4
0,04 saniye zaman adımı (ikinci çalışma)	369,8
0,10 saniye zaman adımı (üçüncü çalışma)	368,7



Şekil 3.19. Zaman adımından bağımsızlık testi

Sonuçlar incelendiğinde iyileştirilmiş zaman adımı ve Qianfeng Li ve arkadaşlarının [22] zaman adımı değerleri kullanılarak yapılan analizler arasında final sıcaklık için %0,3 oranında azaldığı görülmüştür. Qianfeng Li [22] ve arkadaşlarının kullandığı ağ yapısı boyutları ve zaman adımı değerlerinin bağımsızlığı test edilip çalışmalara bu değerler ile devam edilmiştir.

4. ANALİZ SONUÇLARININ İNCELENMESİ

Problem iki farklı ana parametre değiştirilerek sayısal olarak analiz edilmiştir. Öncelikle başlangıç basıncı ve debinin, dolun süresi ve son sıcaklığa etkisi incelenmiştir. Sabit debide farklı başlangıç basınçları için değişimler incelenmiştir. Çözümler 5 farklı debi (10, 15, 20, 25 ve 40 g/s) ve 4 farklı başlangıç basıncı (2, 5, 7 ve 9 MPa) ve tank son basıncı 35 MPa ile yapılmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar incelenmiş ve izin verilen sıcaklık değeri ile karşılaştırılmıştır. İzin verilen sıcaklık değeri üzerinde kalan durumlar incelenip, hidrojen giriş sıcaklığı düşürülerek uygun duruma getirilmiştir. Ön soğutma uygulanarak daha düşük sıcaklıkta hidrojen ile dolun yapılan ve ön soğutmasız durumların tamamında tank içerisindeki hidrojenin başlangıç sıcaklığı 293 K olarak analizlerde kullanılmıştır. Bu debi değerleri ve iç basınç değerleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar her debi için farklı başlıklar altında gösterilmiştir. Elde edilen sıcaklık sonuçlarının ardından her durum için dolun sonunda depolanan hidrojen kütlesi miktarı incelenmiştir. Ön soğutmanın depolanan hidrojen kütlesine etkisi araştırılmıştır.

3.1. 10 g/s Sabit Debi ve Farklı Başlangıç Basınçları İçin Elde Edilen Sıcaklık Sonuçları

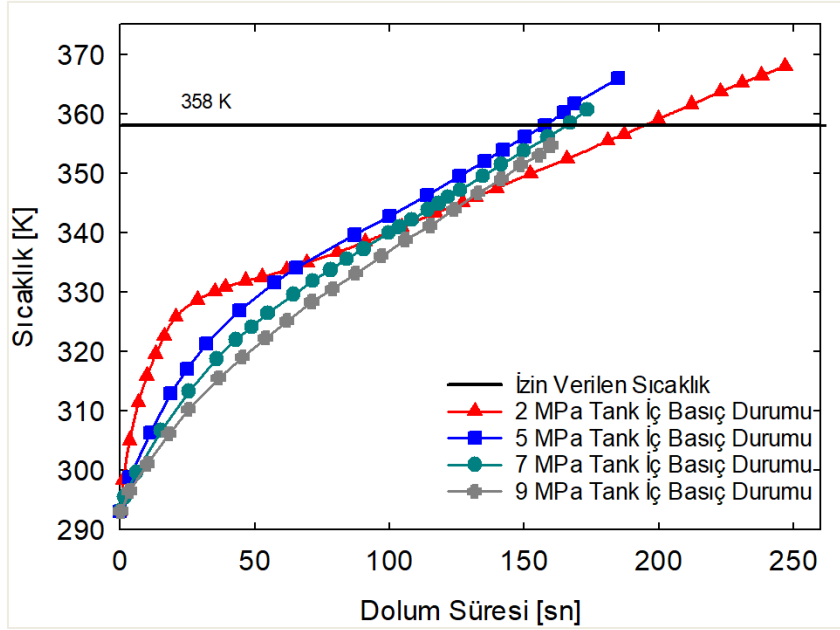
Elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 3.14'te gösterildiği gibi literatür ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların doğrulanmasından sonra, sayısal model Çizelge 3.1'de verilen farklı parametre kombinasyonları için analiz edilmiştir. Öncelikle analizler 293 K sabit sıcaklık, 10 g/s debi ve farklı başlangıç basınçları için yapılmıştır. Bu durumlar için dolun süresi, debi, tank final basıncı, izin verilen sıcaklık, hidrojen dolun sıcaklığı, dolun süresi ve son sıcaklık değerleri Çizelge 4.1'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. 10 g/s debi ve 293 K sabit sıcaklık için elde edilen sonuçlar

Durum	Debi [g/s]	Tank Başlangıç Basıncı [MPa]	Tank Final Basıncı [MPa]	İzin verilen Final Sıcaklık [K]	H2 Dolun Sıcaklığı [K]	Dolun Süresi (sn)	Final Sıcaklık [K]
1	10	2	35	358	293	246,60	367,85*
2	10	5	35	358	293	184,75	366,15*
3	10	7	35	358	293	172,65	360,41*
4	10	9	35	358	293	160,40	354,44

*İzin verilen sıcaklığın aşıldığı durumlar

Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi tüm durumlar için hidrojen giriş sıcaklığı ve tank başlangıç sıcaklığı 293 K olarak kabul edilmiştir ve dolun işlemin sonundaki basınç 35 MPa olarak ayarlanmıştır. Durum 1’de depolama tankı 2 MPa başlangıç basıncına sahiptir ve 10 g/s sabit debi ile dolun işlemin 246,6 saniye sürmüştür ulaşılan son sıcaklık değeri ise 367,85 K’dir. Durum 2’de 5 MPa iç basınca sahip tankın dolun süresi 184,75 saniye olup ulaştığı son sıcaklık ise 366,15 K’dir. Durum 3 ve 4’te ise tank başlangıç basınçları sırasıyla 7 ve 9 MPa’dır. Durum 3 için dolun süresi 172,65 saniye, ulaşılan son sıcaklık değeri ise 360,41 K olarak hesaplanmıştır. Son olarak Durum 4 için ise dolun süresi 160,4, ulaşılan maksimum son sıcaklık ise 355,44 K olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlarda görüldüğü gibi Durum 1, 2 ve 3’te depolama işlemin sonrası ulaşılan maksimum basınç 35 MPa izin verilen değere karşın ulaştıkları son sıcaklık 85 °C’nin üzerindedir ve standartlara [13-17] uygun değildir. Sıcaklık aşım durumları incelenerek bu sıcaklıkların izin verilen değerin altında tutulması amaçlanmıştır. Çalışmanın başında da belirtildiği gibi dolun sıcaklığı ulaşılan maksimum sıcaklıkta bir etkindir. Yapılan ön çalışmalar sonrasında hidrojen dolun sıcaklıkları aşağıdaki Çizelge 4.2’de gösterildiği gibi optimum değere düşürülmüştür. Çizelgede detaylı olarak belirtildiği gibi tank başlangıç basıncının arttığı durumlarda dolun işlemin daha kısa sürede tamamlanmıştır ve bu nedenle sıcaklık artışı diğer durumlara göre daha az olmuştur. Bu durum göz önünde bulundurularak hidrojen giriş sıcaklığı için ön soğutma uygulanmıştır. Hidrojenin soğutulması için gerekli olan enerjiyi minimum seviyede tutmak için her durumda birden fazla analiz yapılarak hidrojen giriş sıcaklığının optimum değerinin bulunması amaçlanmıştır. Yapılan ön çalışmalar sonrası bulunan sıcaklık değerleri ile analizler tekrarlanmış ve sonuçlar Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Ayrıca sonuçlar Şekil 4.1’te görüldüğü gibi grafik formatında da gösterilmiştir. Bu grafikte sınır sıcaklık olan 358 K yatay bir çizgi olarak gösterilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi Durum 1, 2 ve 3 sıcaklık sınırını aşmaktadır.

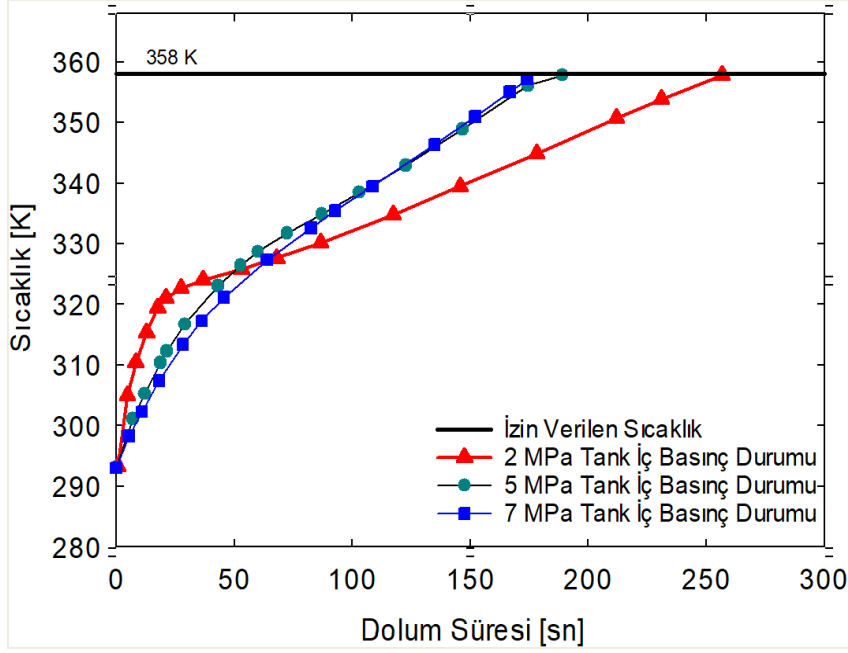


Şekil 4.1. 10 g/s debi için 293 K hidrojen ile dolun sonuçları

Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere tank içerisindeki hidrojen final sıcaklığına bağı olarak hidrojen giriş sıcaklık değerleri düşürülmüş ve güvenli sıcaklık değeri 85°C sıcaklık sınırının [13] altında güvenli bölgede kalmıştır. Sıcaklıkları izin verilen sınırdan tutmak için Durum 1 için sıcaklık 293 K’den 273 K’e düşürülerek Durum 5 olarak, Durum 2 için sıcaklık 293 K’den 273 K’e düşürülerek Durum 6 olarak, Durum 3 için sıcaklık 293 K’den 283 K’e düşürülerek Durum 7 olarak tekrar analiz edilmiştir. Sonuçlarda görüldüğü gibi Durum 5 için ulaşılan maksimum sıcaklık 357,97 K, Durum 6 için 357,98 K ve Durum 7 için ise 357,40 K olarak bulunmuştur ve tüm sıcaklıkların izin verilen sınırdan olduğu görülmektedir. Ön soğutma işlemi uygulanan Durum 5, 6 ve 7’te dolun sürelerinde artış gözlenmiştir ve maksimum sıcaklık izin verilen sınırlar içerisinde yer almaktadır. Oluşan bu artış dolun sonunda tank içerisinde depolanan kütlenin artmasını ve kullanımının uzamasını sağlayacaktır. Ayrıca sonuçlar Şekil 4.2’de görüldüğü gibi grafik formatında da gösterilmiştir.

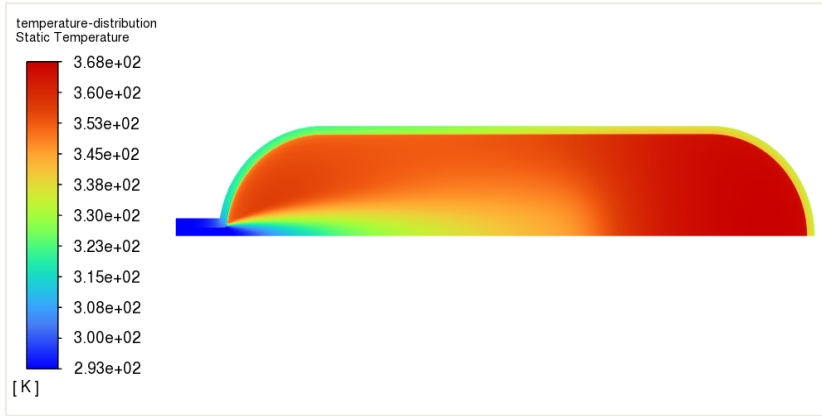
Çizelge 4.2. 10 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolun sonuçları

Durum	Debi [g/s]	Tank Başlangıç Basıncı [MPa]	Tank Final Basıncı [MPa]	İzin verilen Final Sıcaklık [K]	H2 Dolun Sıcaklığı [K]	Dolun Süresi (sn)	Final Sıcaklık [K]
5	10	2	35	358	273	256,00	357,97
6	10	5	35	358	273	189,00	357,98
7	10	7	35	358	283	174,15	357,40
8	10	9	35	358	293	160,40	354,44

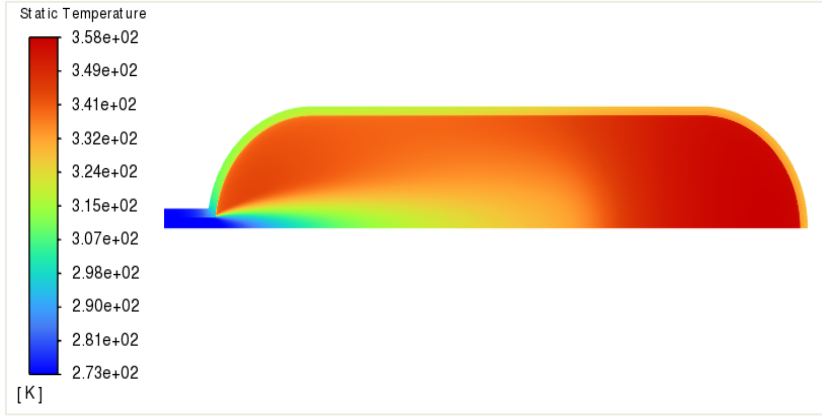


Şekil 4.2. 10 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolum sonuçları

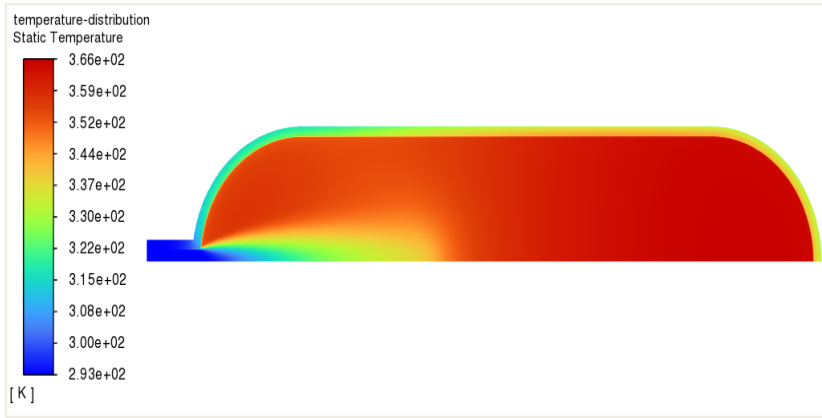
Sonuçlar Şekil 4.2 grafikte görüldüğü üzere 2, 5 ve 7 MPa başlangıç basınç değeri için ulaşılan son sıcaklık değeri izin verilen sınırlar içerisinde kalmıştır.



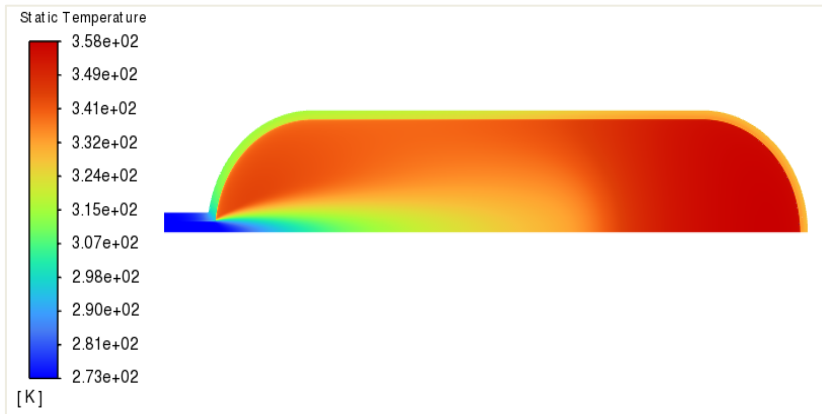
Şekil 4.3. 10 g/s debi için 293 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı



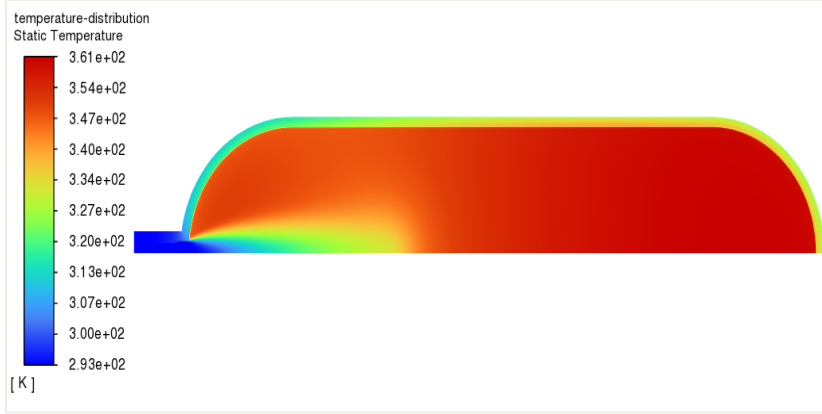
Şekil 4.4. 10 g/s debi için 273 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolun sonuçları sıcaklık dağılımı



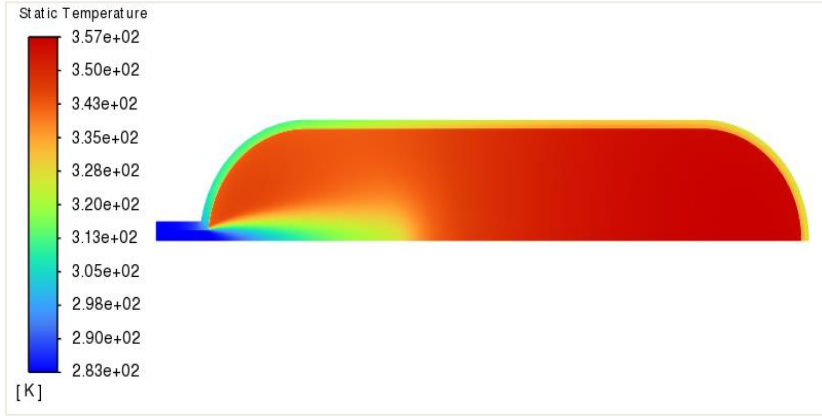
Şekil 4.5. 10 g/s debi için 293 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolun sonuçları sıcaklık dağılımı



Şekil 4.6. 10 g/s debi için 273 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolun sonuçları sıcaklık dağılımı



Şekil 4.7. 10 g/s debi için 293 K hidrojen ile 7 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolun sonuçları sıcaklık dağılımı



Şekil 4.8. 10 g/s debi için 283 K hidrojen ile 7 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolun sonuçları sıcaklık dağılımı

Analiz 10 g/s akış hızı ve 2, 5, 7 ve 9 MPa iç basınçlar için gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.1'de görülebileceği gibi, elde edilen nihai sıcaklıklar sadece 9 MPa başlangıç basıncına sahip Durum 4 için izin verilen sınırlar içerisindedir. Hesaplamalar 2, 5 ve 7 MPa başlangıç basınç değerlerine sahip durumlar (Durum 5, Durum 6, Durum 7) için Çizelge 4.2'de gösterilen yeni giriş sıcaklığı değerleri ile tekrarlanmıştır. Şekil 4.2'deki sonuçlar incelendiğinde, 10 g/s akış hızı ve 2, 5 ve 7 MPa başlangıç basınç değerleri için sonuçların izin verilen sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı akış hızı ve başlangıç basıncı için tank katmanı ve hidrojen için sıcaklık dağılımları ön soğutmalı ve ön soğutmasız olarak detaylı bir şekilde gösterilmiştir (Şekil 4.3 - Şekil 4.8). Bu şekillerden görüleceği üzere ulaşılan son sıcaklık değerleri izin verilen sıcaklık değerinin altında kalmıştır.

3.2. 15 g/s Sabit Debi ve Farklı Başlangıç Basınçları İçin Elde Edilen Sıcaklık Sonuçları

10 g/s için yapılan analizler bir sonraki adımda 15 g/s için tekrarlanmıştır. Öncelikle analizler 293 K sabit sıcaklık, 15 g/s debi ve farklı başlangıç basınçları için yapılmıştır. Bu durumlar için dolun süresi, debi, tank final basıncı, izin verilen sıcaklık, hidrojen dolun sıcaklığı, dolun süresi ve son sıcaklık Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Ayrıca sonuçlar Şekil 4.9'te görüldüğü gibi grafik formatında da gösterilmiştir.

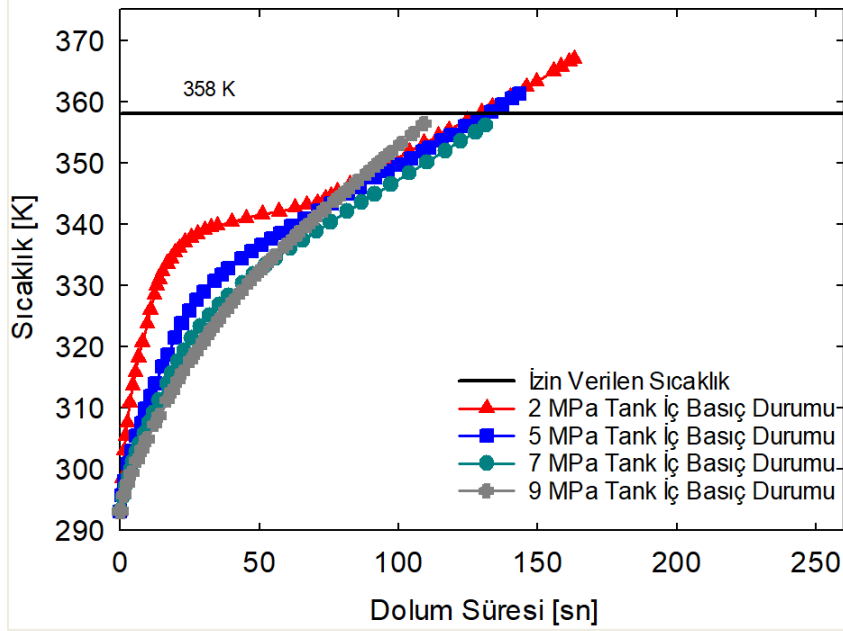
Çizelge 4.3. 15 g/s debi ve 293 K sabit sıcaklık için elde edilen sonuçlar

Durum	Debi [g/s]	Tank Başlangıç Basıncı [MPa]	Tank Final Basıncı [MPa]	İzin verilen Final Sıcaklık [K]	H2 Dolun Sıcaklığı [K]	Dolun Süresi (sn)	Final Sıcaklık [K]
9	15	2	35	358	293	163,10	366,95*
10	15	5	35	358	293	143,45	361,30*
11	15	7	35	358	293	131,30	356,12
12	15	9	35	358	293	109,10	356,39

*İzin verilen sıcaklığın aşıldığı durumlar

Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi tüm durumlar için hidrojen giriş sıcaklığı 293 K olarak tanımlanmıştır ve dolun işlemi sonundaki basınç 35 MPa olarak ayarlanmıştır. 10 g/s debi ile yapılan sonuçlardan farklı olarak 9 MPa başlangıç basıncı durumuna ek olarak 7 MPa iç basınca sahip durum için yapılan dolun işleminde de son sıcaklık izin verilen aralıktadır. Durum 9'de depolama tankı 2 MPa başlangıç basıncına sahiptir ve 15 g/s sabit debi ile dolun işlemi 163,10 saniye sürmüştür ve ulaşılan son sıcaklık 366,95 K'dir. Durum 10'de 5 MPa iç basınca sahip tankın dolun süresi 143,44 saniye olup ulaştığı son sıcaklık ise 361,30 K'dir. Durum 11 ve 12'te ise tank başlangıç basınçları sırasıyla 7 ve 9 MPa'dır. Durum 11 için dolun süresi 131,31 saniye, ulaşılan son sıcaklık değeri ise 356,12 K olarak hesaplanmıştır. Son olarak Durum 12 için ise dolun süresi 109,11, ulaşılan maksimum son sıcaklık ise 356,39 K olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlarda görüldüğü gibi Durum 9 ve 10'da depolama işlemi sonrası ulaşılan maksimum basınç 35 MPa izin verilen değer olmasına karşın ulaştıkları son sıcaklık standartlara [13-17] uygun değildir. Sıcaklık aşım durumları incelenerek bu sıcaklıkların izin verilen değerlerin altında tutulması amaçlanmıştır. Yapılan ön çalışmalar sonrasında hidrojen dolun sıcaklıkları aşağıdaki Çizelge 4.4'te gösterildiği gibi optimum değere düşürülmüştür. Giriş sıcaklığı için verilen değerlerin bulunması için her durumda birden fazla analiz yapılmış olup optimum değerler bulunmuştur. Ayrıca sonuçlar Şekil 4.10'da görüldüğü gibi grafik formatında da

gösterilmiştir. Bu grafikte sınır sıcaklık olan 358 K yatay bir çizgi olarak gösterilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi Durum 9 ve 10 sıcaklık sınırını aşmaktadır.

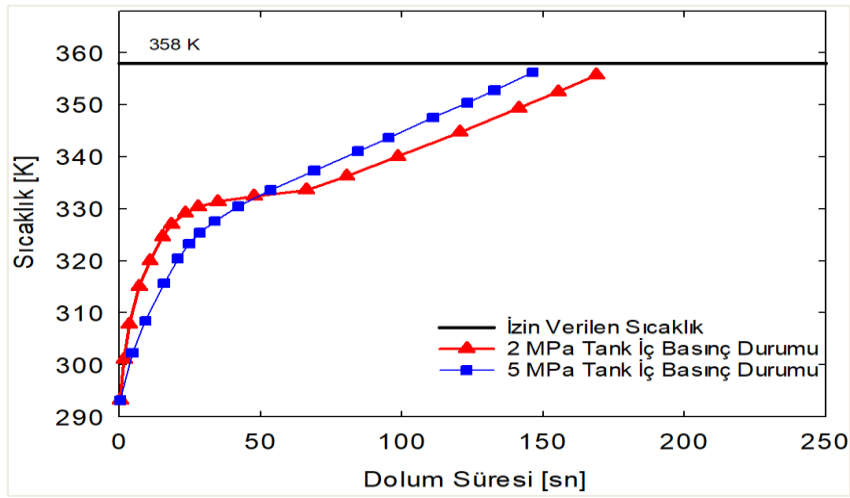


Şekil 4.9. 15 g/s debi için 293 K hidrojen ile dolum sonuçları

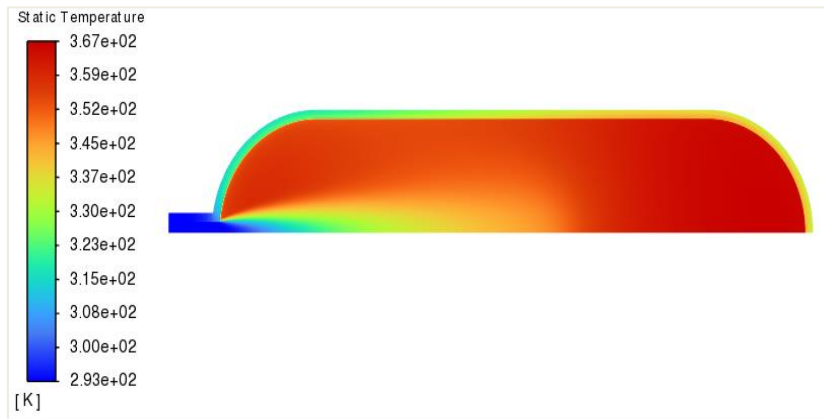
Çizelge 4.4'te görüldüğü üzere tank içerisindeki hidrojen final sıcaklığına bağlı olarak hidrojen giriş sıcaklık değerleri düşürülmüş ve güvenli sıcaklık değeri 85°C sıcaklık sınırının [13] altında güvenli bölgede kalmıştır. Sıcaklığı izin verilen sınırdaki tutmak için hidrojen giriş sıcaklıkları Durum 9 için sıcaklık 293 K'den 273 K'e düşürülerek Durum 13 olarak, Durum 10 için sıcaklık 293 K'den 283 K'e düşürülerek Durum 14 olarak, olarak tekrar analiz edilmiştir. Sonuçlarda görüldüğü gibi Durum 13 için ulaşılan maksimum sıcaklık 355,81 K, Durum 14 için 356,44 K olarak bulunmuştur ve tüm sıcaklıkların izin verilen sınırdaki olduğu görülmektedir. Ön soğutma işlemi uygulanan Durum 13 ve 14'te Durum 9 ve 10'a göre dolum sürelerinde artış gözlenmiştir. Oluşan bu artış dolum sonunda tank içerisinde depolanan kütlenin artmasını ve kullanımın uzamasını sağlayacaktır. Ayrıca sonuçlar Şekil 4.10'da görüldüğü gibi grafik formatında da gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. 15 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolum sonuçları

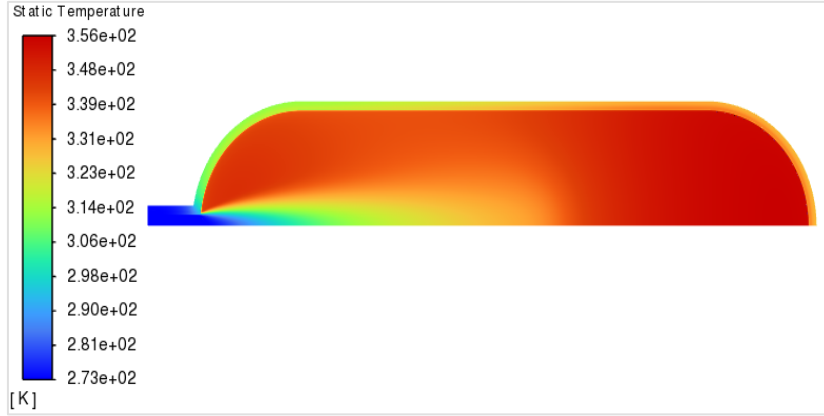
Durum	Debi [g/s]	Tank Başlangıç Basıncı [MPa]	Tank Final Basıncı [MPa]	İzin verilen Final Sıcaklık [K]	H2 Dolum Sıcaklığı [K]	Dolum Süresi (sn)	Final Sıcaklık [K]
13	15	2	35	358	273	168,75	355,81
14	15	5	35	358	283	146,20	356,44
15	15	7	35	358	293	131,30	356,12
16	15	9	35	358	293	109,10	356,39



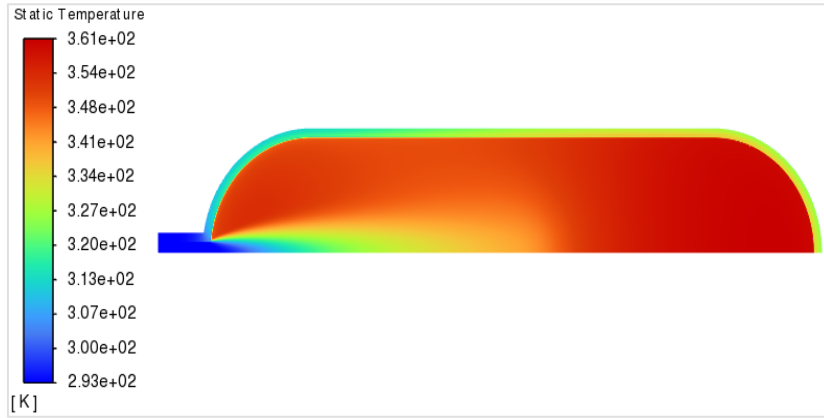
Şekil 4.10. 15 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolum sonuçları



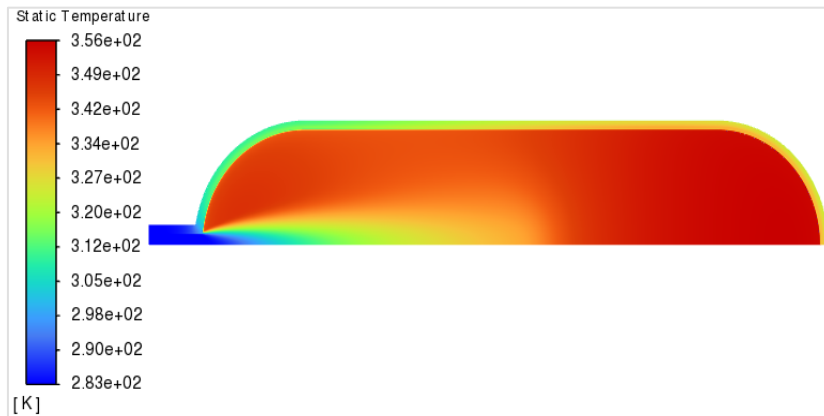
Şekil 4.11. 15 g/s debi için 293 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı



Şekil 4.12. 15 g/s debi için 273 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı



Şekil 4.13. 15 g/s debi için 293 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı



Şekil 4.14. 15 g/s debi için 283 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı

Analiz 15 g/s akış hızı ve 2, 5, 7 ve 9 MPa iç basınçlar için tekrarlanmıştır. Çizelge 4.3'te görülebileceği gibi, elde edilen nihai sıcaklıklar 7 MPa ve 9 MPa başlangıç basıncına sahip Durum 11 ve 12 için izin verilen sınırlar dahilindedir. Hesaplamalar 2 ve 5 MPa başlangıç basınç değerlerine sahip durumlar (Durum 9, Durum 10) için Çizelge 4.4'te gösterilen yeni giriş sıcaklığı değerleri ile tekrarlanmıştır. Çizelge 4.4 ve Şekil 4.10 incelendiğinde, belirlenen yeni giriş sıcaklıkları ile 15 g/s akış hızı ve 2 ve 5 MPa başlangıç basınç değerleri için sonuçların izin verilen sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı akış hızı ve başlangıç basıncı için tank katmanı ve hidrojen için sıcaklık dağılımları ön soğutmalı ve ön soğutmasız olarak detaylı bir şekilde gösterilmiştir (Şekil 4.11-Şekil 4.14)

3.3. 20 g/s Sabit Debi ve Farklı Başlangıç Basınçları İçin Elde Edilen Sıcaklık Sonuçları

10 ve 15 g/s için yapılan analizler bir sonraki adımda 20 g/s için yapılmıştır. Elde edilen dolun süresi ve son sıcaklık değerleri Çizelge 4.5'te gösterilmiştir. Ayrıca sonuçlar Şekil 4.15'te görüldüğü gibi grafik formatında da gösterilmiştir.

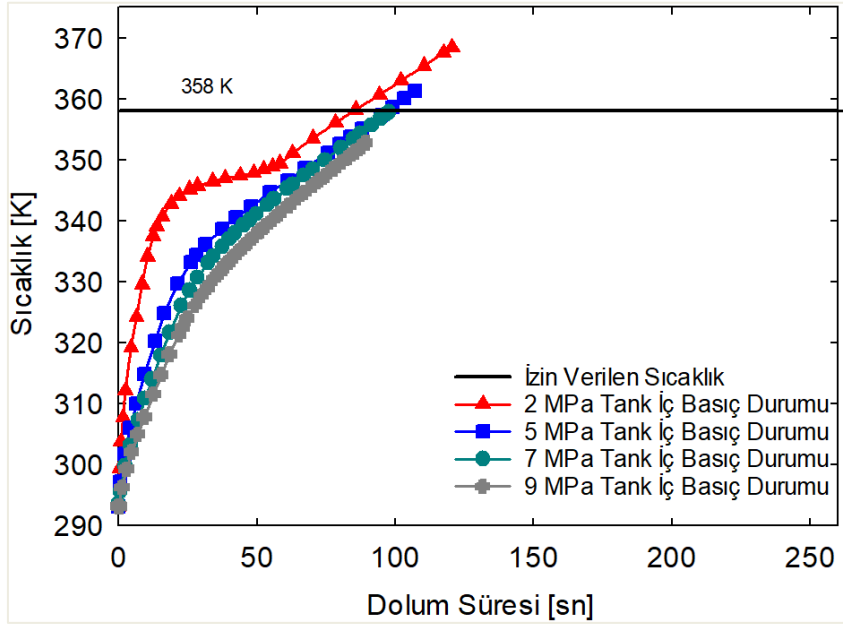
Çizelge 4.5. 20 g/s debi ve 293 K sabit sıcaklık için elde edilen sonuçlar

Durum	Debi [g/s]	Tank Başlangıç Basıncı [MPa]	Tank Final Basıncı [MPa]	İzin verilen Final Sıcaklık [K]	H2 Dolun Sıcaklığı [K]	Dolun Süresi (sn)	Final Sıcaklık [K]
17	20	2	35	358	293	120,60	368,47*
18	20	5	35	358	293	107,05	361,30*
19	20	7	35	358	293	97,75	357,86
20	20	9	35	358	293	89,30	352,79

*İzin verilen sıcaklığın aşıldığı durumlar

Çizelge 4.5'te görüldüğü gibi tüm durumlar için hidrojen giriş sıcaklığı 293 K olarak tanımlanmıştır ve dolun işlemi sonundaki basınç 35 MPa olarak ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar 15 g/s debi ile bazı benzerlikler göstermektedir. 15 g/s ve 20 g/s debilerin her ikisinde de 7 ve 9 MPa başlangıç basıncına sahip durumda (Durum 19 ve 20) dolun işlemi sonucunda elde edilen nihai sıcaklık değeri TIR J2601'de [13] izin verilen sıcaklık sınırını aşmamaktadır. 20 g/s sabit debi için 7 MPa (Durum 19) başlangıç basıncına sahip durumda dolun süresi 97,75 saniye olarak hesaplanmış olup ulaşılan son sıcaklık değeri ise 357,86 K'dir, 9 MPa başlangıç basıncı (Durum 20) için dolun süresi 89,30 saniye, ulaşılan son sıcaklık değeri ise 352,79 K'dir. Durum 19 ve 20 izin verilen sıcaklık içerisinde olmasına rağmen Durum 17 ve 18'de sıcaklık sınırı aşılmıştır. 2 MPa başlangıç basıncına sahip

durumda (Durum 17) dolun süresi 120,60 saniye, son sıcaklık 368,47 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca 5 MPa başlangıç basıncına sahip durumda (Durum 18) ise solum süresi 107,00 saniye iken ulaşılan son sıcaklık 361,30 K'dir. Sıcaklık aşım durumları incelenerek bu sıcaklıkların izin verilen değerin altında tutulması amaçlanmıştır. Yapılan ön çalışmalar sonrasında hidrojen dolun sıcaklıkları aşağıdaki Çizelge 4.6'da gösterildiği gibi optimum değere düşürülmüştür. Giriş sıcaklığı için verilen değerlerin bulunması için her durumda birden fazla analiz yapılmış olup optimum değerler bulunmuştur. Ayrıca sonuçlar Şekil 4.16'da görüldüğü gibi grafik formatında da gösterilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi Durum 17 ve 18 sıcaklık sınırını aşmaktadır.



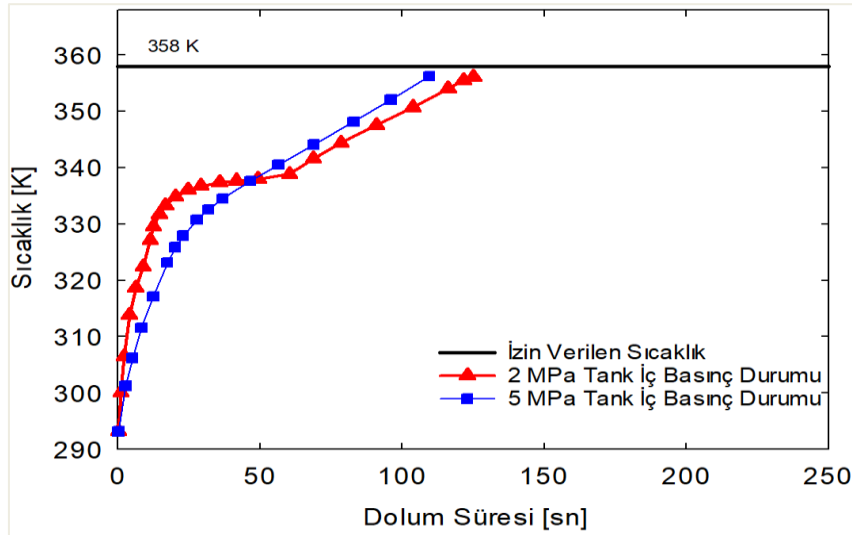
Şekil 4.15. 20 g/s debi için 293 K hidrojen ile dolun sonuçları

Çizelge 4.6'da görüldüğü üzere tank içerisindeki hidrojen final sıcaklığına bağlı olarak hidrojen giriş sıcaklık değerleri düşürülmüş ve ulaşılan son sıcaklıklar güvenli sıcaklık değeri 85°C sıcaklık sınırının [13] altında güvenli bölgede kalmıştır. Sıcaklığı izin verilen sınırdaki tutmak için hidrojen giriş sıcaklıkları Durum 17 için sıcaklık 293 K'den 273 K'e düşürülerek Durum 21 olarak, Durum 18 için sıcaklık 293 K'den 283 K'e düşürülerek Durum 22 olarak, olarak tekrar analiz edilmiştir. Sonuçlarda görüldüğü gibi Durum 21 için ulaşılan maksimum sıcaklık 357,37 K, Durum 22 için 356,35 K olarak bulunmuştur ve tüm sıcaklıkların izin verilen sınırdaki olduğu görülmektedir. Ön soğutma işlemi uygulanan Durum 21 ve 22'da dolun sürelerinde Durum 17 ve 18'e göre artış gözlenmiştir. Oluşan bu artış dolun sonunda tank içerisinde depolanan kütlenin artmasını ve kullanımın uzamasını

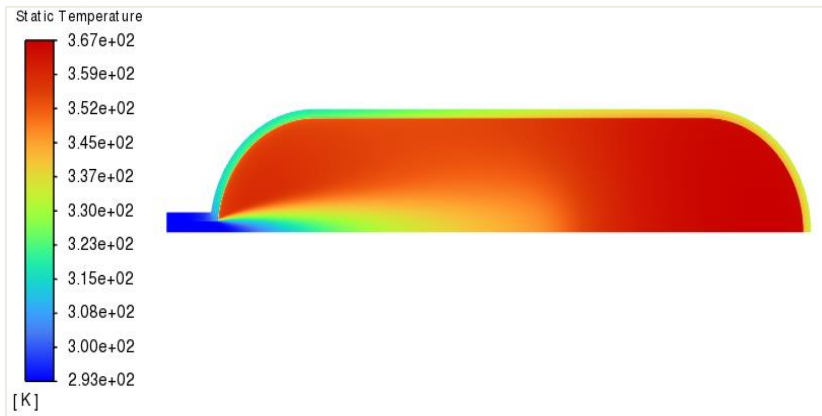
sağlayacaktır. Ayrıca sonuçlar Şekil 4.16'de görüldüğü gibi grafik formatında da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. 20 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolum sonuçları

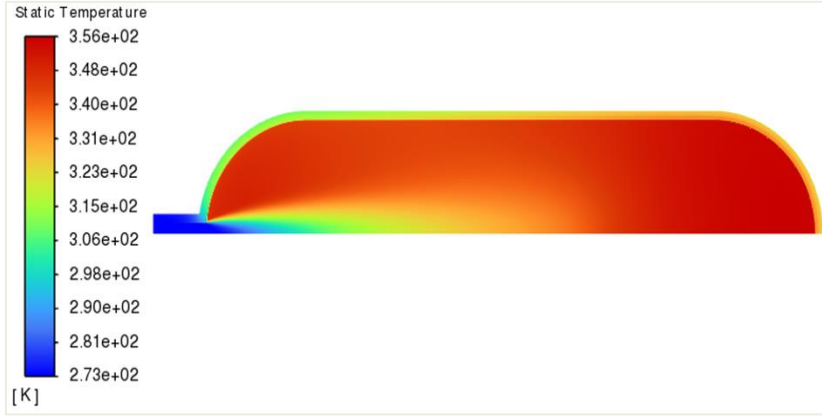
Durum	Debi [g/s]	Tank Başlangıç Basıncı [MPa]	Tank Final Basıncı [MPa]	İzin verilen Final Sıcaklık [K]	H2 Dolum Sıcaklığı [K]	Dolum Süresi (sn)	Final Sıcaklık [K]
21	20	2	35	358	273	125,20	357,37
22	20	5	35	358	283	109,35	356,35
23	20	7	35	358	293	97,75	357,86
24	20	9	35	358	293	89,30	352,79



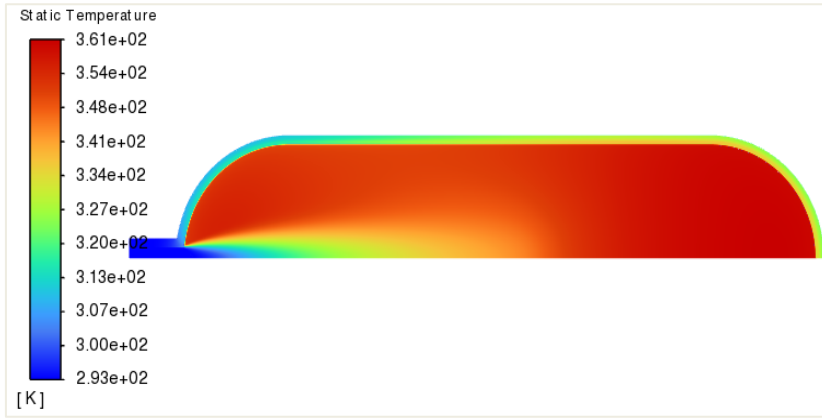
Şekil 4.16. 20 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolum sonuçları



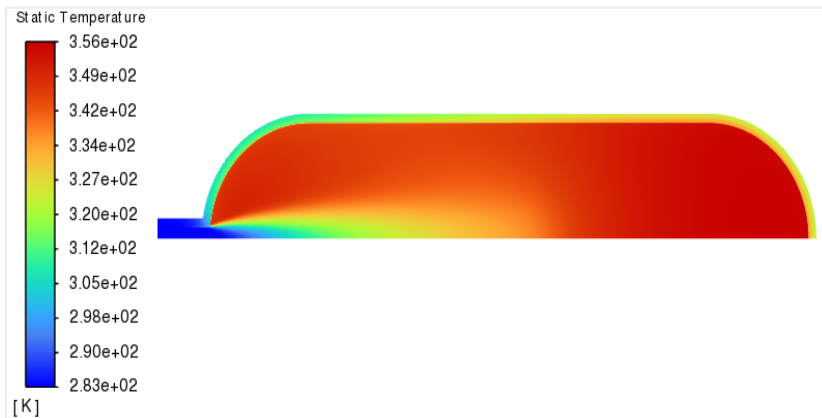
Şekil 4.17. 20 g/s debi için 293 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı



Şekil 4.18. 20 g/s debi için 273 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı



Şekil 4.19. 20 g/s debi için 293 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı



Şekil 4.20. 20 g/s debi için 283 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı

Analiz 20 g/s akış hızı ve 2, 5, 7 ve 9 MPa iç basınçlar için tekrarlanmıştır. Çizelge 4.5'te görülebileceği gibi, elde edilen nihai sıcaklıklar 7 MPa ve 9 MPa başlangıç basıncına sahip Durum 19 ve 20 için izin verilen sınırlar dahilindedir. Hesaplamalar 2 ve 5 MPa başlangıç basınç değerlerine sahip durumlar (Durum 17, Durum 18) için Çizelge 4.6'da gösterilen yeni giriş sıcaklığı değerleri ile tekrarlanmıştır. Yine aynı çizelge ve Şekil 4.16 incelendiğinde, belirlenen yeni giriş sıcaklıkları ile 20 g/s akış hızı ve 2 ve 5 MPa başlangıç basınç değerleri için sonuçların izin verilen sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı akış hızı ve başlangıç basıncı için tank katmanı ve hidrojen için sıcaklık dağılımları ön soğutmalı ve ön soğutmasız olarak detaylı bir şekilde gösterilmiştir (Şekil 4.17-Şekil 4.20).

3.4. 25 g/s Sabit Debi ve Farklı Başlangıç Basınçları İçin Elde Edilen Sıcaklık Sonuçları

Yapılan analizler bir sonraki adımda 25 g/s için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen dolum süresi ve son sıcaklık değerleri Çizelge 4.7'de gösterilmiştir. Ayrıca sonuçlar Şekil 4.21'te görüldüğü gibi grafik formatında da gösterilmiştir.

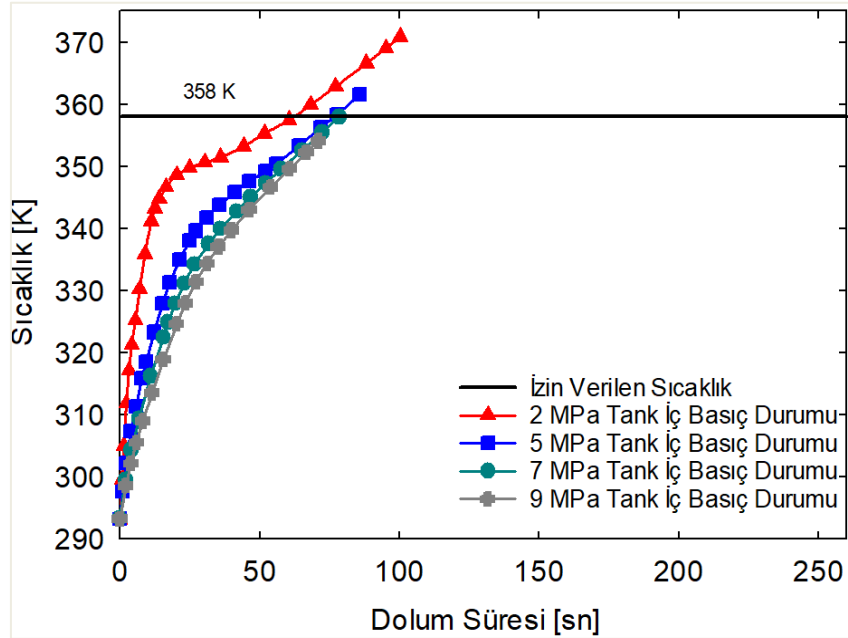
Çizelge 4.7. 25 g/s debi ve 293 K sabit sıcaklık için elde edilen sonuçlar

Durum	Debi [g/s]	Tank Başlangıç Basıncı [MPa]	Tank Final Basıncı [MPa]	İzin verilen Final Sıcaklık [K]	H2 Dolum Sıcaklığı [K]	Dolum Süresi (sn)	Final Sıcaklık [K]
25	25	2	35	358	293	100,25	370,90*
26	25	5	35	358	293	85,75	361,60*
27	25	7	35	358	293	78,50	357,99
28	25	9	35	358	293	71,20	354,12

*İzin verilen sıcaklığın aşıldığı durumlar

Çizelge 4.7'de görüldüğü gibi tüm durumlar için hidrojen giriş sıcaklığı 293 K olarak tanımlanmış ve dolum işlemi sonundaki basınç 35 MPa olarak ayarlanmıştır. 25 g/s sabit debi, 7 ve 9 MPa başlangıç basıncına sahip durumda (Durum 27 ve 28) dolum işlemi sonucunda elde edilen nihai sıcaklık değeri TIR J2601'de [13] izin verilen sıcaklık sınırını aşmamaktadır. 25 g/s sabit debi için 7 MPa (Durum 27) başlangıç basıncına sahip durumda dolum süresi 78,48 saniye olarak hesaplanmış olup ulaşılan son sıcaklık değeri ise 357,99 K'dir, 9 MPa başlangıç basıncı (Durum 28) için dolum süresi 71,21 saniye, ulaşılan son sıcaklık değeri ise 354,12 K'dir. Durum 27 ve 28 izin verilen sıcaklık içerisinde olmasına rağmen Durum 25 ve 26'da sıcaklık sınırı aşılmıştır. 2 MPa başlangıç basıncına sahip durumda (Durum 25) dolum süresi 100,25 saniye, son sıcaklık 370,90 olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca 5 MPa başlangıç basıncına sahip durumda (Durum 26) ise solun süresi 85,75 saniye iken ulaşılan son sıcaklık 361,60 K'dir. Elde edilen sonuçlarda görüldüğü gibi debinin artması dolun süresini kısaltmakta fakat ulaşılan sıcaklığı arttırmaktadır. Sıcaklık aşım durumları incelenerek bu sıcaklıkların izin verilen değerin altında tutulması amaçlanmıştır. Yapılan ön çalışmalar sonrasında hidrojen dolun sıcaklıkları aşağıdaki Çizelge 4.8'de gösterildiği gibi optimum değere düşürülmüştür. Giriş sıcaklığı için verilen değerlerin bulunması için her durumda birden fazla analiz yapılmış olup optimum değerler bulunmuştur. Ayrıca sonuçlar Şekil 4.21'de görüldüğü gibi grafik formatında da gösterilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi Durum 25 ve 26 sıcaklık sınırını aşmaktadır.



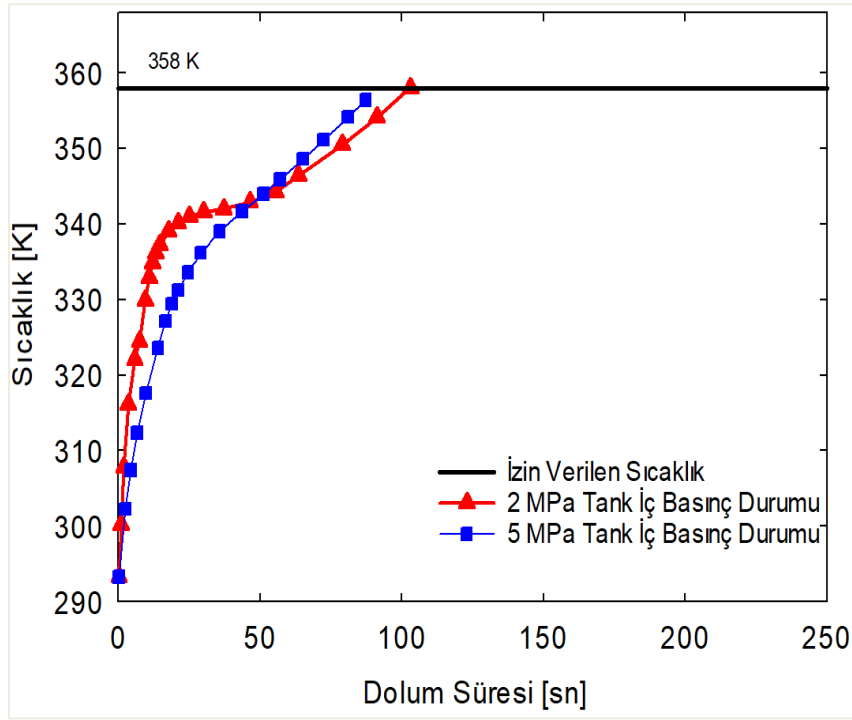
Şekil 4.21. 25 g/s debi için 293 K hidrojen ile dolun sonuçları

Çizelge 4.8'de görüldüğü üzere tank içerisindeki hidrojen final sıcaklığına bağlı olarak hidrojen giriş sıcaklık değerleri düşürülmüş ve güvenli sıcaklık değeri 85°C sıcaklık sınırının [13] altında güvenli bölgede kalmıştır. Sıcaklığı izin verilen sınırdan tutmak için hidrojen giriş sıcaklıkları Durum 25 için sıcaklık 293 K'den 273 K'e düşürülerek Durum 29 olarak, Durum 26 için sıcaklık 293 K'den 283 K'e düşürülerek Durum 30 olarak, olarak tekrar analiz edilmiştir. Sonuçlarda görüldüğü gibi Durum 29 için ulaşılan maksimum sıcaklık 358,00 K, Durum 30 için 356,61 K olarak bulunmuştur ve tüm sıcaklıkların izin verilen sınırdan olduğu görülmektedir. Ön soğutma işlemi uygulanan Durum 29 ve 30'da dolun sürelerinde Durum 25 ve 26'e göre artış gözlemlenmiştir. Oluşan bu artış dolun sonunda tank içerisinde depolanan

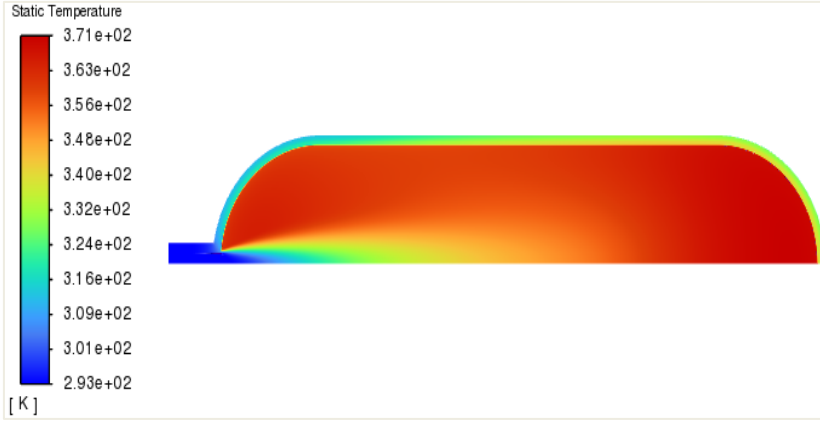
kütlenin artmasını ve kullanımın uzamasını sağlayacaktır. Ayrıca sonuçlar Şekil 4.22’de görüldüğü gibi grafik formatında da gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. 25 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolun sonuçları

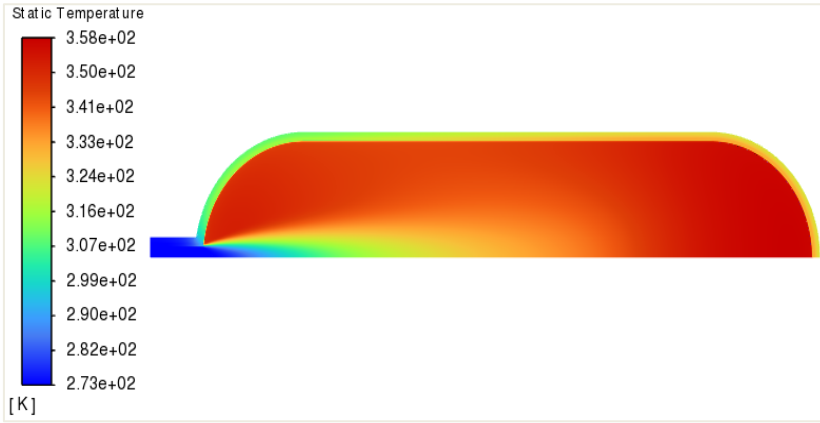
Durum	Debi [g/s]	Tank Başlangıç Basıncı [MPa]	Tank Final Basıncı [MPa]	İzin verilen Final Sıcaklık [K]	H2 Dolun Sıcaklığı [K]	Dolum Süresi (sn)	Final Sıcaklık [K]
29	25	2	35	358	273	103,05	358,00
30	25	5	35	358	283	87,15	356,61
31	25	7	35	358	293	78,50	357,99
32	25	9	35	358	293	71,20	354,12



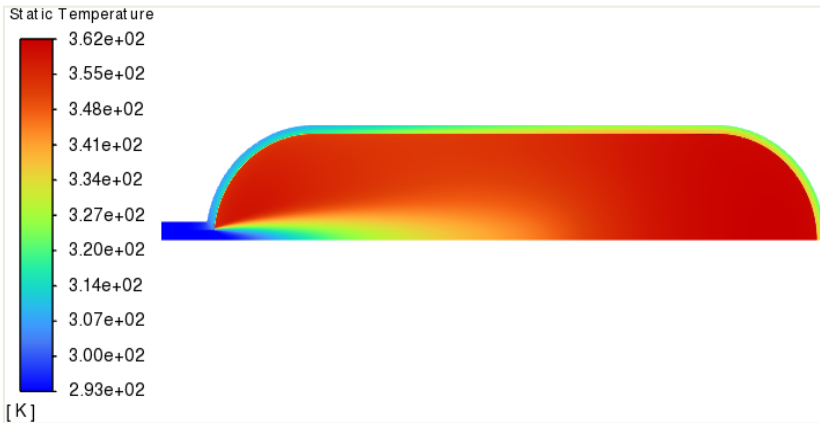
Şekil 4.22. 25 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolun sonuçları



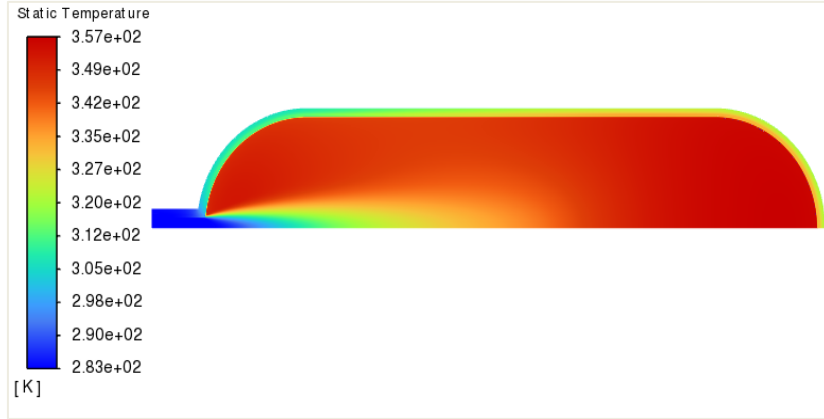
Şekil 4.23. 25 g/s debi için 293 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı



Şekil 4.24. 25 g/s debi için 273 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı



Şekil 4.25. 25 g/s debi için 293 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı



Şekil 4.26. 25 g/s debi için 283 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolum sonuçları sıcaklık dağılımı

Analiz 25 g/s akış hızı ve 2, 5, 7 ve 9 MPa iç basınçlar için tekrarlanmıştır. Çizelge 4.7'de görülebileceği gibi, elde edilen nihai sıcaklıklar 7 MPa ve 9 MPa başlangıç basıncına sahip Durum 27 ve 28 için izin verilen sınırlar dahilindedir. Hesaplamalar 2 ve 5 MPa başlangıç basınç değerlerine sahip durumlar (Durum 25, Durum 26) için Çizelge 4.8'de gösterilen yeni giriş sıcaklığı değerleri ile tekrarlanmıştır. Aynı çizelge ve Şekil 4.22 incelendiğinde, belirlenen yeni giriş sıcaklıkları ile 25 g/s akış hızı ve 2 ve 5 MPa başlangıç basınç değerleri için sonuçların izin verilen sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı akış hızı ve başlangıç basıncı için tank katmanı ve hidrojen için sıcaklık dağılımları ön soğutmalı ve ön soğutmasız olarak detaylı bir şekilde aşağıdaki şekillerde sıcaklık konturu olarak gösterilmiştir (Şekil 4.23-Şekil 4.26).

3.5. 40 g/s Sabit Debi ve Farklı Başlangıç Basınçları İçin Elde Edilen Sıcaklık Sonuçları

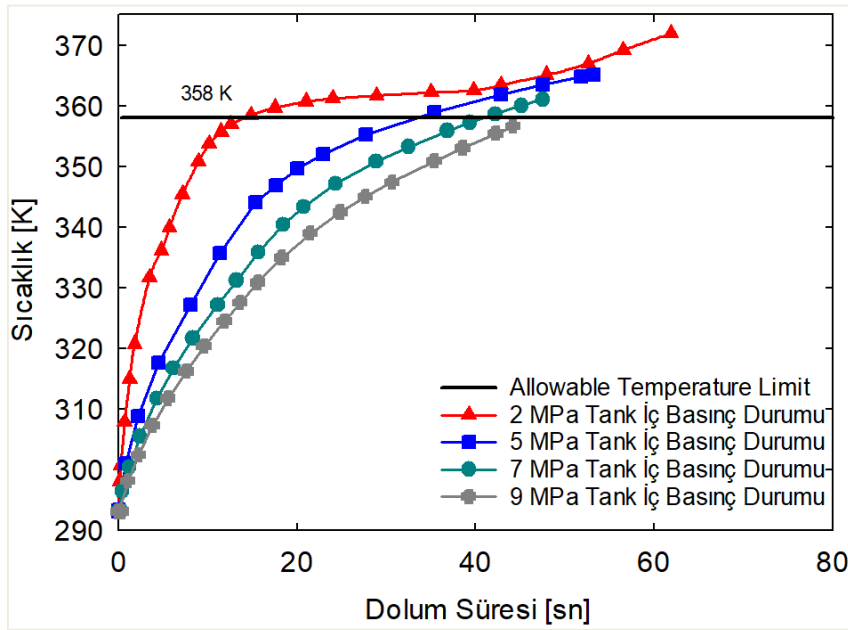
Analizler son olarak 40 g/s için yapılmış olup elde edilen dolum süresi ve son sıcaklık değerleri Çizelge 4.9'da gösterilmiştir. Ayrıca sonuçlar Şekil 4.27'de görüldüğü gibi grafik formatında da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. 40 g/s ve debi ve 293 K sabit sıcaklık için elde edilen sonuçlar

Durum	Debi [g/s]	Tank Başlangıç Basıncı [MPa]	Tank Final Basıncı [MPa]	İzin verilen Final Sıcaklık [K]	H2 Dolum Sıcaklığı [K]	Dolum Süresi (sn)	Final Sıcaklık [K]
33	40	2	35	358	293	61,85	371,94*
34	40	5	35	358	293	53,20	365,12*
35	40	7	35	358	293	47,50	361,10*
36	40	9	35	358	293	44,20	356,66

*İzin verilen sıcaklığın aşıldığı durumlar

Çizelge 4.9'da görüldüğü gibi tüm durumlar için hidrojen giriş sıcaklığı 293 K olarak tanımlanmıştır ve dolun işlemin sonundaki basınç 35 MPa olarak ayarlanmıştır. 40 g/s sabit debi, 9 MPa başlangıç basıncına sahip durumda (Durum 36) dolun işlemin sonucunda elde edilen nihai sıcaklık değeri TIR J2601'de [13] izin verilen sıcaklık sınırını aşmamaktadır. 40 g/s sabit debi için 9 MPa başlangıç basıncı (Durum 36) için dolun süresi 44,22 saniye, ulaşılan son sıcaklık değeri ise 356,66 K'dir. 2 MPa başlangıç basıncına sahip durumda (Durum 33) dolun süresi 61,86 saniye, son sıcaklık 371,94 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca 5 MPa başlangıç basıncına sahip durumda (Durum 34) ise dolun süresi 53,20 saniye iken ulaşılan son sıcaklık 365,12 K, 7 MPa (Durum 35) başlangıç basıncına sahip durumda dolun süresi 47,50 saniye olarak hesaplanmış olup ulaşılan son sıcaklık değeri ise 361,10 K'dir. Elde edilen sonuçlarda görüldüğü gibi debinin artması dolun süresini kısaltmakta fakat ulaşılan sıcaklığı arttırmaktadır. Sıcaklık aşım durumları incelenerek bu sıcaklıkların izin verilen değerin altında tutulması amaçlanmıştır. Yapılan ön çalışmalar sonrasında hidrojen dolun sıcaklıkları aşağıdaki Çizelge 4.10'da gösterildiği gibi optimum değere düşürülmüştür. Giriş sıcaklığı için verilen değerlerin bulunması için her durumda birden fazla analiz yapılmış olup optimum değerler bulunmuştur. Ayrıca sonuçlar Şekil 4.27'de görüldüğü gibi grafik formatında da gösterilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi Durum 33, 34 ve 35 sıcaklık sınırını aşmaktadır.

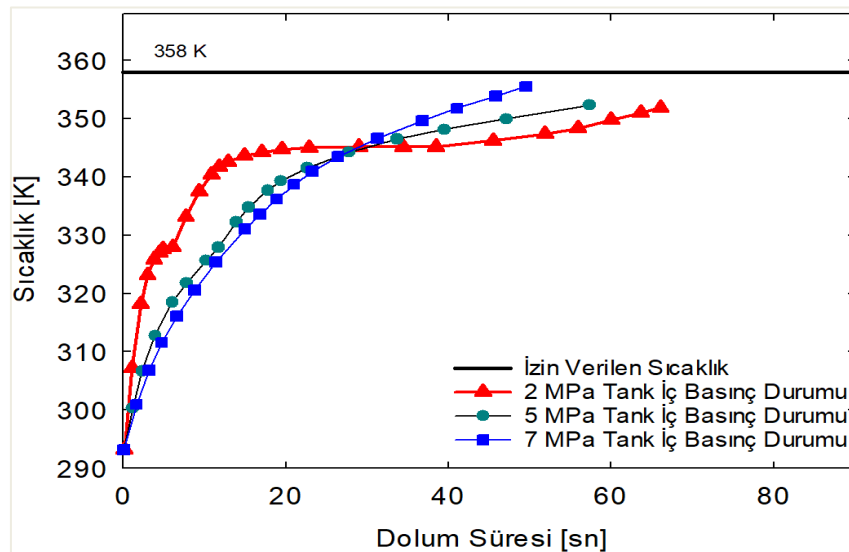


Şekil 4.27. 40 g/s debi için 293 K hidrojen ile dolun sonuçları

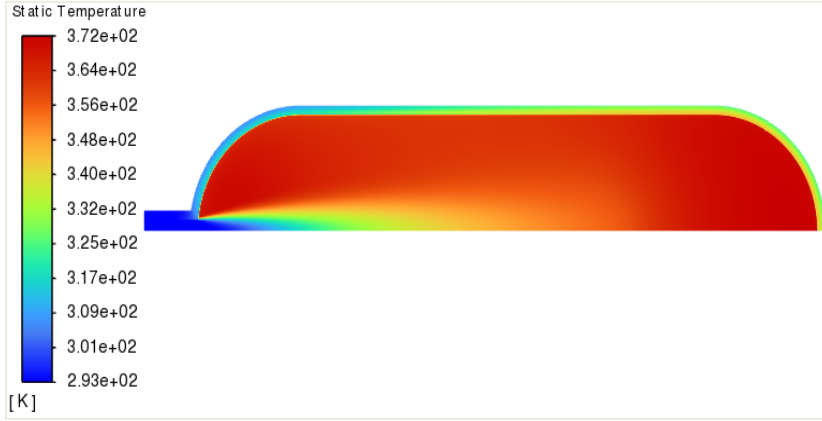
Çizelge 4.10'da görüldüğü üzere tank içerisindeki hidrojen final sıcaklığına bağlı olarak hidrojen giriş sıcaklık değerleri düşürülmüş ve güvenli sıcaklık değeri 85°C sıcaklık sınırının [13] altında güvenli bölgede kalmıştır. Sıcaklıkları izin verilen sınırdan tutmak için Durum 33 için sıcaklık 293 K'den 263 K'e düşürülerek Durum 37 olarak, Durum 34 için sıcaklık 293 K'den 273 K'e düşürülerek Durum 38 olarak, Durum 35 için sıcaklık 293 K'den 283 K'e düşürülerek Durum 39 olarak tekrar analiz edilmiştir. Sonuçlarda görüldüğü gibi Durum 37 için ulaşılan maksimum sıcaklık 352,08 K, Durum 38 için 352,45 K, Durum 39 için 355,62 K olarak bulunmuştur ve tüm sıcaklıkların izin verilen sınırdan olduğu görülmektedir. Ön soğutma işlemi uygulanan Durum 37, 38 ve 39'da dolun sürelerinde Durum 33, 34 ve 35'e göre artış gözlenmiştir. Oluşan bu artış dolun sonunda tank içerisinde depolanan kütle artmasını ve kullanımının uzamasını sağlayacaktır. Ayrıca sonuçlar Şekil 4.28'de görüldüğü gibi grafik formatında da gösterilmiştir. Grafikte de görüldüğü üzere tüm sonuçlar izin verilen sınırın altındadır.

Çizelge 4.10. 40 g/s debi için optimize edilmiş sonuçlar

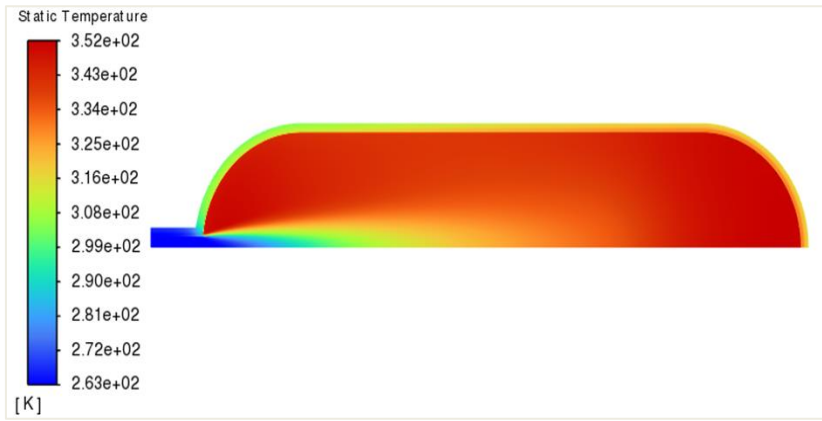
Durum	Debi [g/s]	Tank Başlangıç Basıncı [MPa]	Tank Final Basıncı [MPa]	İzin verilen Final Sıcaklık [K]	H2 Dolun Sıcaklığı [K]	Dolun Süresi (sn)	Final Sıcaklık [K]
37	40	2	35	358	263	66,10	352,08
38	40	5	35	358	273	57,30	352,45
39	40	7	35	358	283	49,50	355,62
40	40	9	35	358	293	44,20	356,66



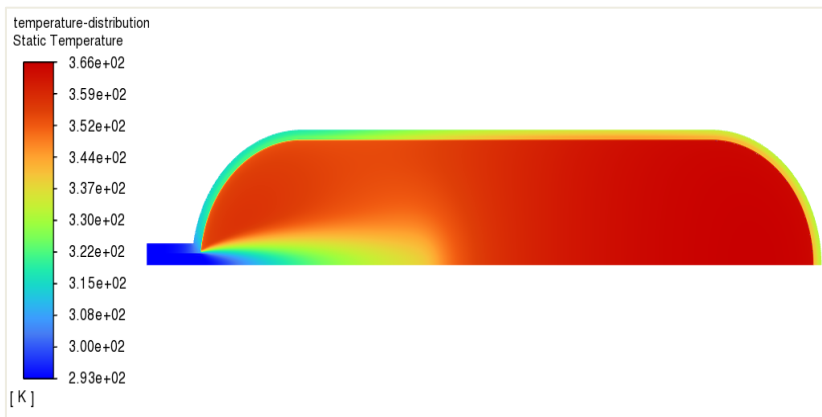
Şekil 4.28. 40 g/s debi için ön soğutmalı hidrojen ile dolun sonuçları



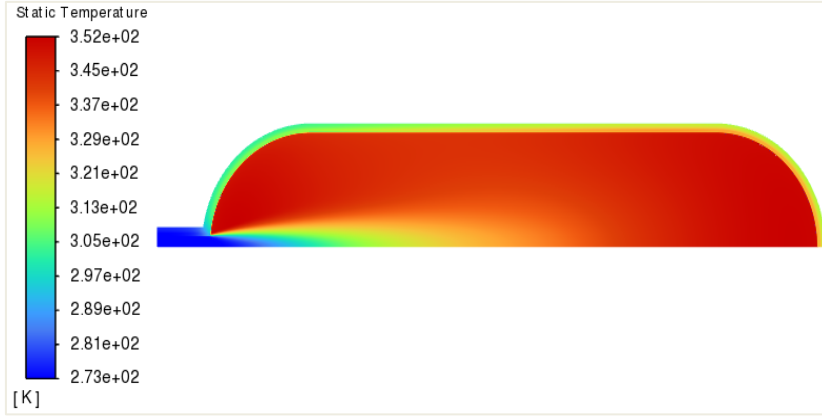
Şekil 4.29. 40 g/s debi için 293 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolun sonuçları sıcaklık dağılımı



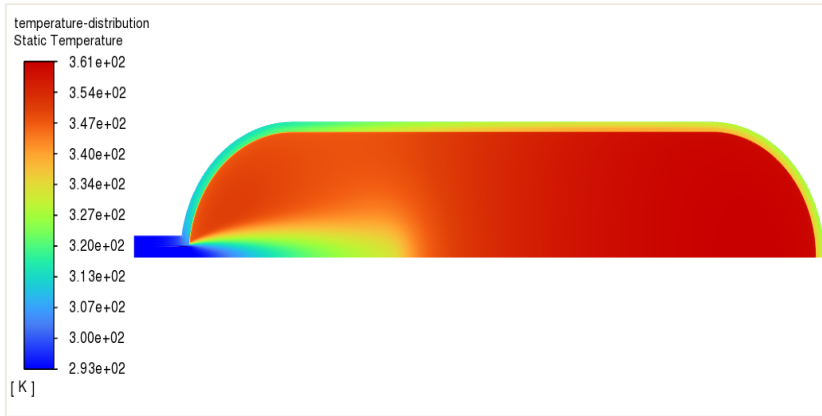
Şekil 4.30. 40 g/s debi için 263 K hidrojen ile 2 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolun sonuçları sıcaklık dağılımı



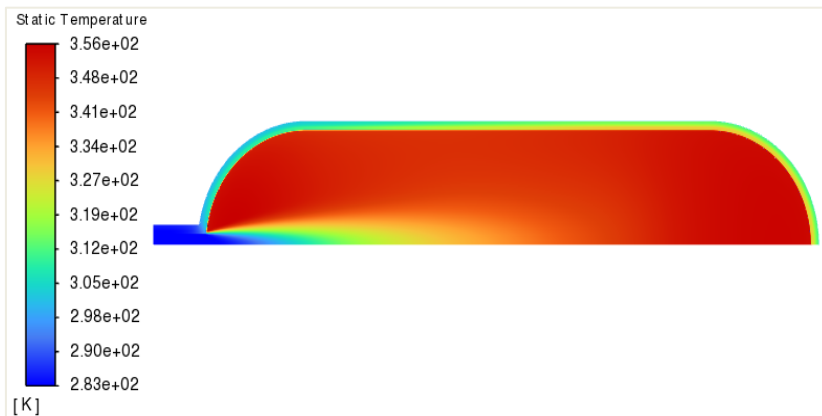
Şekil 4.31. 40 g/s debi için 293 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolun sonuçları sıcaklık dağılımı



Şekil 4.32. 40 g/s debi için 273 K hidrojen ile 5 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolun sonuçları sıcaklık dağılımı



Şekil 4.33. 40 g/s debi için 293 K hidrojen ile 7 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolun sonuçları sıcaklık dağılımı



Şekil 4.34. 40 g/s debi için 283 K hidrojen ile 7 MPa başlangıç basınçlı tankı için dolun sonuçları sıcaklık dağılımı

Analiz 40 g/s akış hızı ve 2, 5, 7 ve 9 MPa iç basınçlar için tekrarlanmıştır. Çizelge 4.9'da görülebileceği gibi, elde edilen nihai sıcaklık 9 MPa başlangıç basıncına sahip Durum 36 için izin verilen sınırlar dahilindedir. Hesaplamalar 2, 5 ve 7 MPa başlangıç basınç değerlerine sahip durumlar (Durum 33, Durum 34, Durum 35) için yeni giriş sıcaklığı değerleri ile tekrarlanmıştır. Çizelge 4.10 ve Şekil 4.28'de incelendiğinde, belirlenen yeni giriş sıcaklıkları ile 40 g/s akış hızı ve 2, 5 ve 7 MPa başlangıç basınç değerleri için sonuçların izin verilen sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı akış hızı ve başlangıç basıncı için tank katmanı ve hidrojen için sıcaklık dağılımları ön soğutmalı ve ön soğutmasız olarak detaylı bir şekilde aşağıdaki şekillerde sıcaklık konturu olarak gösterilmiştir (Şekil 4.29-Şekil 4.34).

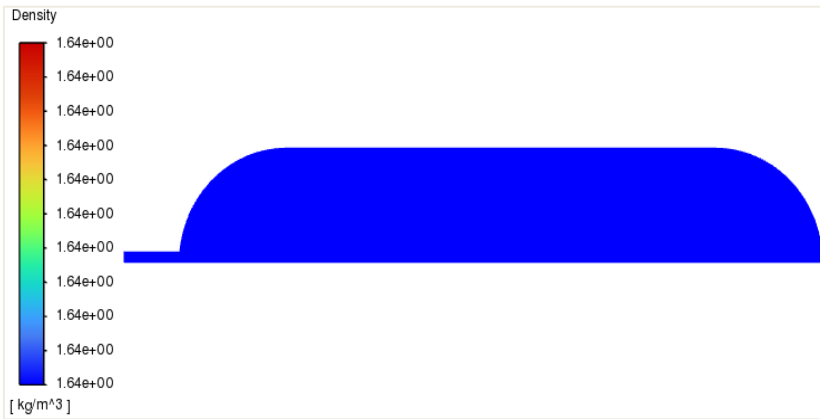
3.6. Tüm Durumlar için Depolanan Hidrojen Kütlesinin İncelenmesi

Öncelikli olarak yukarıdaki bölümlerde görüldüğü gibi hidrojen depolama işleminde 5 farklı debi 4 farklı başlangıç basıncı için ulaşılan son sıcaklığın izin verilen sınırlara uygunluğu kontrol edilmiştir. Yapılan kontrollerden sonra uygun olmayan durumlarda hidrojen için ön soğutma yapılarak tüm dolun işlemleri izin verilen sıcaklık sınırının altında tutulmuştur ve ön soğutmanın depolanan hidrojen kütlesine etkisi araştırılmıştır.

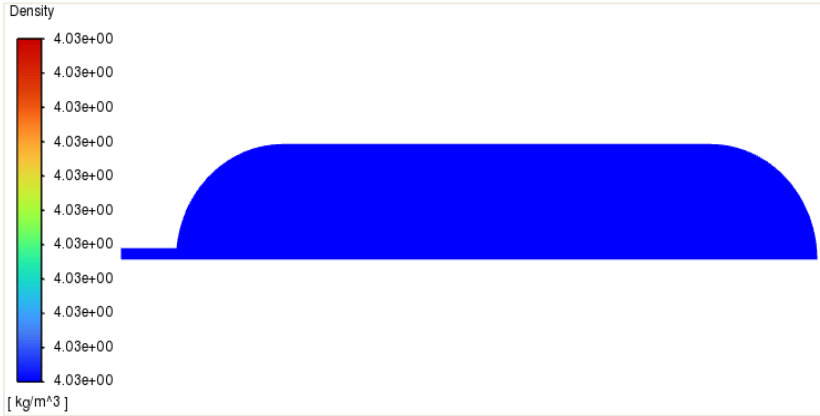
Sıcaklık kontrollerinden sonra ise tank içerisinde depolanan toplam hidrojen kütlesi incelenmiştir. Dolun sonrası depolanan toplam hidrojen kütlesini bulmak için öncelikle başlangıç zamanında tanklar basınçlı olduğundan tank içerisinde basınç altında depolanan hidrojen kütlesi bulunmaktadır. Bu hidrojen kütlesini bulmak için hidrojenin başlangıç şartlarındaki özkütlesinin bulunması hedeflenmiştir. Çözülen analiz modeli sıkıştırılabilir olduğundan basınç altındaki hidrojenin özkütlesini bulmak için gerçek gaz denklemi kullanılmıştır. Bu hidrojen öz kütlesini bulmak için bir gerçek gaz modeli olan Redlich-Kwong Denklemi (Denklem 3.6, 3.7, 3,8) kullanılmıştır. Yapılan analizler ile hidrojenin özkütlesi ANSYS Fluent programı yardımı ile hesaplanmıştır. Şekil 4.35'te görüldüğü gibi 2 MPa-293 K koşullarında hidrojenin özkütlesi 1,64 kg/m³, Şekil 4.36'da görüldüğü gibi 5 MPa-293 K koşullarında hidrojenin özkütlesi 4,03 kg/m³, Şekil 4.37'de görüldüğü gibi 7 MPa-293 K koşullarında hidrojenin özkütlesi 5,58 kg/m³ ve son olarak Şekil 4.38'de görüldüğü gibi 9 MPa-293 K koşullarında hidrojenin özkütlesi 7,09 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. 140 L olan tank içerisinde depolanan hidrojen kütlesi, özkütelerin elde edilmesinin ardından Denklem 3.9 kullanılarak bulunmuştur. Çizelge 4.11'de görüldüğü

gibi 2 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde 0,23 kg, 5 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde 0,56 kg, 7 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde 0,78 kg, 9 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde 0,99 kg sıkıştırılmış hidrojen bulunmaktadır. Tank başlangıç basıncının yüksek olduğu durumlarda depolanan hidrojen miktarı da artmaktadır.

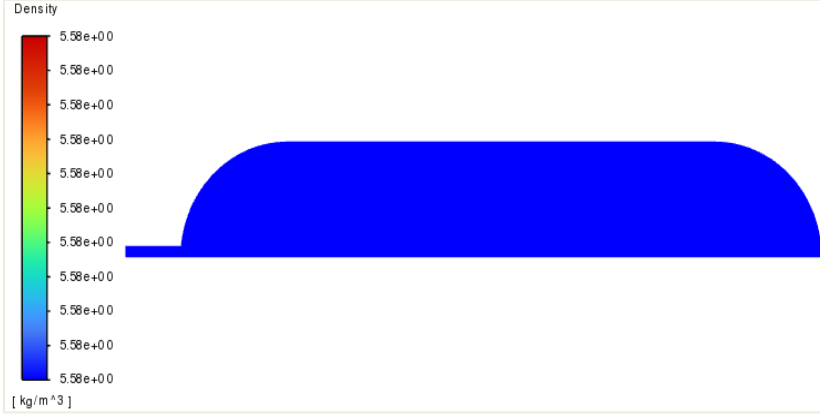
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.17)$$



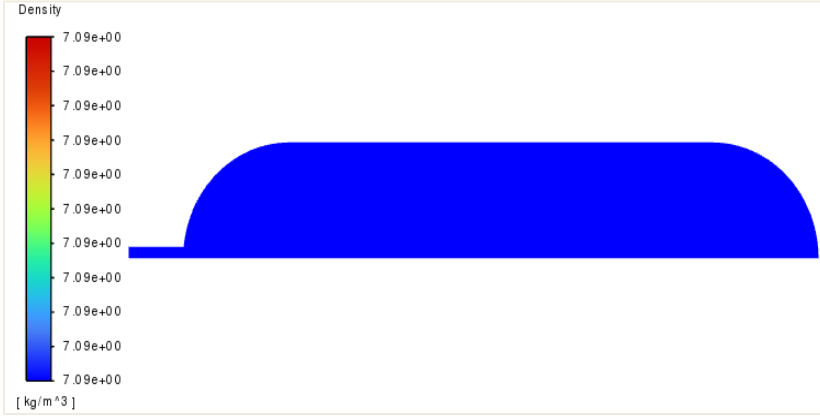
Şekil 4.35. 2 MPa-293 K koşullarında hidrojen özkütlesi



Şekil 4.36. 5 MPa-293 K koşullarında hidrojen özkütlesi



Şekil 4.37. 7 MPa-293 K koşullarında hidrojen özkütlesi



Şekil 4.38. 9 MPa-293 K koşullarında hidrojen özkütlesi

Çizelge 4.11. Farklı basınçlarda hidrojen özellikleri

İç Basınç (MPa)	Sıcaklık (K)	Özkütle (kg/m ³)	Hacim (m ³)	Başlangıç Anında Tank İçerisindeki Hidrojen Kütle (kg)
2	293	1,64	0,14	0,23
5	293	4,03	0,14	0,56
7	293	5,58	0,14	0,78
9	293	7,09	0,14	0,99

10 g/s debi için dolum sonundaki depolanan hidrojen kütlelerinin incelenmesi

Bu bölümde öncelikli olarak 10 g/s debiye ait dolum prosesi sonrasında depolanan hidrojen kütleleri incelenmiştir. Çalışmanın başında da belirtildiği gibi izin verilen sıcaklığı aşan durumlar için analizler 85 °C (358 K)'de durdurulmuştur ve bu andaki kütleleri incelenmiştir. Ardından ön soğutmalı hidrojen ile yapılan durumlar için depolanan kütle hesaplamaları yapılmış olup iki durum birbiri ile kıyaslanmıştır. Çizelge 4.12'de görüldüğü gibi sadece

izin verilen sıcaklığı aşan durumların depolama süreleri verilmiştir. Bu çizelge 10 g/s debi için ön soğutmasız durumlarda (293 K hidrojen giriş sıcaklığı) elde edilen sonuçlara göre hazırlanmıştır. Çizelgede görüldüğü gibi ön soğutmasız durumlarda 10 g/s debi için 2, 5 ve 7 MPa başlangıç basıncına sahip tanklarda yapılan dolum işleminde son basınç 35 MPa'ya ulaşmadan sıcaklık 358 K'e ulaşmaktadır. Verilen süreler dolum sürecinde tank içerisindeki hidrojenin 358 K'e ulaştığı süreyi göstermektedir. Yapılan ön soğutmadan sonra 10 g/s için tüm durumlar izin verilen sınırdadır ve tankın iç basıncının 35 MPa'ya ulaştığı dolum süreleri Çizelge 4.13'te verilmiştir. Çizelge 4.13'te verilen süreler Çizelge 4.2'de verilen dolum süreleri ile aynıdır.

Çizelge 4.12. 10 g/s debi 85 °C ulaşılma süreleri (izin verilen sıcaklık sınırın aşıldığı durumlar)

İç Basınç (MPa)	85 °C Ulaşılma Süresi (sn)
2	187,10
5	160,10
7	158,40

Çizelge 4.13. 10 g/s debi 35 MPa'ya ulaşılma süreleri (izin verilen sıcaklık sınırın aşılmadığı durumlar)

İç Basınç (MPa)	Dolum Süresi (sn)
2	256,00
5	189,00
7	174,15
9	160,40

Ön soğutmasız durumlar için yapılan analizlerde 85 °C'yi aşan durumlarda bu sıcaklığa ulaşılma anları bulunmuş olup ardından tank içerisinde bulunan kütleye elde edilen bu sürede tank içerisine giriş yapan hidrojen kütlesi eklenmiş ve toplam kütle bulunmuştur. Elde edilen bu değerler ve 10 g/s debi için iki durum arasında depolanan hidrojen kütlesi farkı Çizelge 4.14'te verilmiştir. 2, 5 ve 7 MPa başlangıç basıncına sahip ön soğutmasız durumlarda tank son basıncı 35 MPa değerine ulaşmadan sıcaklık değeri izin verilen sıcaklık değerine ulaşmış ve dolum sonlandırılmıştır. Bu çizelgede görüleceği gibi ön soğutmasız 10 g/s için 2 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolum sonunda 2,10 kg, 5 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolum sonunda 2,16 kg ve 7 MPa başlangıç

basıncına sahip tank içerisinde dolum sonunda 2,36 kg hidrojen depolanmıştır. Ön soğutma ihtiyacı bulunmayan 10 g/s debi ve 9 MPa başlangıç basıncına sahip tankta ise 293 K sabit sıcaklıkla dolum işleminin sonunda tank içerisinde 2,60 kg hidrojen depolanmıştır. Dolum süresinin az olmasından dolayı depolanan hidrojen kütlesi ön soğutmasız durumlarda daha azdır. Ve yine aynı çizelgede görüldüğü gibi ön soğutma depolanan hidrojen kütlesinin artışına yardımcı olmaktadır. Ön soğutma işlemi ile 10 g/s sabit debi ile 2 MPa başlangıç basıncına sahip durumda 0,69 kg, 5 MPa başlangıç basıncına sahip durumda 0,29 kg, 7 MPa başlangıç basıncına sahip durumda ise 0,16 kg daha fazla hidrojen depolanmıştır. 10 g/s sabit debide düşük başlangıç basıncına sahip tanklar için ön soğutma kullanmanın avantajları depolanan kütle farkından anlaşılmaktadır. Ayrıca ön soğutmalı durum sonuçlarından görüldüğü gibi dolum işlemi sonundan depolanan hidrojen kütleleri birbirine oldukça yakındır. 9 MPa durum için ön soğutmaya ihtiyaç olmadığından iki durumda da kütlesi aynı verilmiştir.

Çizelge 4.14. 10 g/s debi- ön soğutmalı ve ön soğutmasız durumlarda depolanan hidrojen kütlesi

İç Basıncı (MPa)	Ön Soğutmasız Durumlarda Depolanan Hidrojen Kütlesi (kg)	Ön Soğutmalı Durumlarda Depolanan Hidrojen Kütlesi (kg)	Ön Soğutmalı Durum ve Ön Soğutmasız Arasındaki Fark (kg)
2	2,10	2,79	0,69
5	2,16	2,45	0,29
7	2,36	2,52	0,16
9	2,60	-	-

15 g/s debi için dolum sonundaki depolanan hidrojen kütlesinin incelenmesi

10 g/s debi için yapılan tüm çalışmalar 15, 20, 25 ve 40 g/s debiler için tekrarlanmıştır. Ön soğutmasız durumlarda (293 K hidrojen giriş sıcaklığı) sınır sıcaklığa ulaşılan süre 15 g/s debi için süreler Çizelge 4.15'te verilmiştir. Elde edilen bu değerler ve 15 g/s debi için iki durum arasında depolanan hidrojen kütlesi farkı Çizelge 4.17'de verilmiştir. Bu çizelgede görüleceği gibi ön soğutmasız 15 g/s için 2 ve 5 MPa başlangıç basıncına sahip durumlarda tank son basıncı 35 MPa değerine ulaşmadan sıcaklık değeri izin verilen sıcaklık değerine ulaşmaktadır. Yapılan ön soğutmadan sonra 10 g/s için tüm durumlar izin verilen sınırdadır ve dolum süreleri Çizelge 4.16'de verilmiştir.

Çizelge 4.15. 15 g/s Debi 85 °C ulaşılma süreleri (izin verilen sınırın aşıldığı durumlar)

İç Basınç (MPa)	85 °C Ulaşılma Süresi (sn)
2	130,20
5	128,10

Çizelge 4.16. 15 g/s debi MPa'ya ulaşılma süreleri (izin verilen sınırın aşılmadığı durumlar)

İç Basınç (MPa)	Dolum Süresi (sn)
2	168,75
5	146,20
7	131,30
9	109,10

Çizelge 4.17. 15 g/s debi- ön soğutmalı ve ön soğutmasız durumlarda depolanan hidrojen kütlesi

İç Basınç (MPa)	Ön Soğutmasız Durumlarda Depolanan Hidrojen Kütlesi (kg)	Ön Soğutmalı Durumlarda Depolanan Hidrojen Kütlesi (kg)	Ön Soğutmalı Durum ve Ön Soğutmasız Fark (kg)
2	2,18	2,76	0,58
5	2,48	2,75	0,27
7	2,74	-	-
9	2,62	-	-

Ön soğutmasız durumlarda izin verilen sıcaklık sınırının, maksimum izin verilen basınca ulaşılmadan aşılmasından dolayı depolanan hidrojen kütlesi ön soğutmasız durumlarda daha azdır. Çizelge 4.17'de görüldüğü gibi ön soğutma depolanan hidrojen kütlesinin artışına yardımcı olmaktadır. Bu çizelgede görüleceği gibi ön soğutmasız 15 g/s için 2 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolum sonunda 2,18 kg, 5 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolum sonunda 2,48 kg ve 7 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolum sonunda 2,74, 9 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolum sonunda 2,62 kg hidrojen depolanmıştır. Dolum süresinin az olmasından dolayı depolanan hidrojen kütlesi ön soğutmasız 2 ve 5 MPa başlangıç basıncına sahip durumlarda daha azdır. Ve yine aynı çizelgede görüldüğü gibi ön soğutma depolanan hidrojen kütlesinin artışına yardımcı olmaktadır. Ön soğutma işlemi ile 15 g/s sabit debi ile 2 MPa başlangıç basıncına sahip durumda 0,58 kg, 5 MPa başlangıç basıncına sahip durumda 0,27 kg daha fazla hidrojen depolanmıştır. 15 g/s sabit debide düşük başlangıç basıncına sahip tanklar için ön

soğutma kullanmanın avantajları depolanan kütle farkından anlaşılmaktadır. Ayrıca ön soğutmalı durum sonuçlarından görüldüğü gibi dolun işlemler sonundan depolanan hidrojen kütleleri birbirine oldukça yakındır. 7 ve 9 MPa başlangıç basıncı ait durum için ön soğutmaya ihtiyaç olmadığından iki durumda da kütlesi aynı verilmiştir.

20 g/s debi için dolun sonundaki depolanan hidrojen kütlesinin incelenmesi

Ön soğutmasız durumlarda (293 K hidrojen giriş sıcaklığı) sınır sıcaklığa ulaşılan süre 20 g/s debi için süreler Çizelge 4.18’de verilmiştir. Ön soğutmalı durumlar için değerler ise Çizelge 4.19’da verilmiştir. Elde edilen bu değerler ve 20 g/s debi için iki durum arasında depolanan hidrojen kütlesi farkı Çizelge 4.20’de verilmiştir.

Çizelge 4.18. 20 g/s debi 85 °C ulaşılma süreleri (izin verilen sınırın aşıldığı durumlar)

İç Basınç (MPa)	85 °C Ulaşılma Süresi (sn)
2	85,6
5	94,8

Çizelge 4.19. 20 g/s debi MPa’ya ulaşılma süreleri (izin verilen sınırın aşılmadığı durumlar)

İç Basınç (MPa)	Dolum Süresi (sn)
2	125,20
5	109,35
7	97,75
9	89,30

Çizelge 4.20. 20 g/s debi- ön soğutmalı ve ön soğutmasız durumlarda depolanan hidrojen kütlesi

İç Basınç (MPa)	Ön Soğutmasız Durumlarda Depolanan Hidrojen Kütlesi (kg)	Ön Soğutmalı Durumlarda Depolanan Hidrojen Kütlesi (kg)	Ön Soğutmalı Durum ve Ön Soğutmasız Fark (kg)
2	1,94	2,73	0,79
5	2,46	2,75	0,29
7	2,74	-	-
9	2,79	-	-

Ön soğutmasız durumlarda izin verilen sıcaklık sınırının maksimum izin verilen basınca ulaşılmadan aşılmasından dolayı dolun süresinin az olmasından dolayı depolanan hidrojen kütlesi ön soğutmasız durumlarda daha azdır.

Çizelge 4.20’de görüldüğü gibi ön soğutma depolanan hidrojen kütlesinin artışına yardımcı olmaktadır. Bu çizelgede görüleceği gibi ön soğutmasız 20 g/s için 2 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolun sonunda 1,94 kg, 5 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolun sonunda 2,46 kg ve 7 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolun sonunda 2,74, 9 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolun sonunda 2,79 kg hidrojen depolanmıştır. Dolun süresinin az olmasından dolayı depolanan hidrojen kütlesi ön soğutmasız 2 ve 5 MPa başlangıç basıncına sahip durumlarda daha azdır. Ve yine aynı çizelgede görüldüğü gibi ön soğutma depolanan hidrojen kütlesinin artışına yardımcı olmaktadır. Ön soğutma işlemi ile 20 g/s sabit debi ile 2 MPa başlangıç basıncına sahip durumda 0,79 kg, 5 MPa başlangıç basıncına sahip durumda 0,29 kg daha fazla hidrojen depolanmıştır. 20 g/s sabit debide düşük başlangıç basıncına sahip tanklar için ön soğutma kullanmanın avantajları depolanan kütle farkından anlaşılmaktadır. Ayrıca ön soğutmalı durum sonuçlarından görüldüğü gibi dolun işlemi sonundan depolanan hidrojen kütleleri birbirine oldukça yakındır. 7 ve 9 MPa başlangıç basıncı ait durum için ön soğutmaya ihtiyaç olmadığından iki durumda da kütlesi aynı verilmiştir. Ayrıca ön soğutmalı durum sonuçlarından görüldüğü gibi dolun işlemi sonundan depolanan hidrojen kütleleri birbirine oldukça yakındır. 7 ve 9 MPa başlangıç basıncı ait durum için ön soğutmaya ihtiyaç olmadığından iki durumda da kütlesi aynı verilmiştir.

25 g/s debi için dolun sonundaki depolanan hidrojen kütlesinin incelenmesi

Ön soğutmasız durumlarda (293 K hidrojen giriş sıcaklığı) sınır sıcaklığa ulaşılan süre 25 g/s debi için süreler Çizelge 4.21’de verilmiştir. Ön soğutmalı durumlar için değerler ise Çizelge 4.22’te verilmiştir. Elde edilen bu değerler ve 25 g/s debi için iki durum arasında depolanan hidrojen kütlesi farkı Çizelge 4.23’te verilmiştir.

Çizelge 4.21. 25 g/s debi 85 °C ulaşılma süreleri (izin verilen sınırın aşıldığı durumlar)

İç Basıncı (MPa)	85 °C Ulaşılma Süresi (sn)
2	60,60
5	71,60

Çizelge 4.22. 25 g/s debi MPa'ya ulaşıma süreleri (izin verilen sınırın aşılmadığı durumlar)

İç Basınç (MPa)	Dolum Süresi (sn)
2	103,05
5	87,15
7	78,50
9	71,20

Çizelge 4.23. 25 g/s debi- ön soğutmalı ve ön soğutmasız durumlarda depolanan hidrojen kütlesi

İç Basınç (MPa)	Ön Soğutmasız Durumlarda Depolanan Hidrojen Kütlesi (kg)	Ön Soğutmalı Durumlarda Depolanan Hidrojen Kütlesi (kg)	Ön Soğutmalı Durum ve Ön Soğutmasız Fark (kg)
2	1,75	2,81	1,06
5	2,35	2,74	0,39
7	2,74	-	-
9	2,77	-	-

Ön soğutmasız durumlarda izin verilen sıcaklık sınırının maksimum izin verilen basınca ulaşılmadan aşılmasından dolayı dolun süresinin az olmasından dolayı depolanan hidrojen kütlesi ön soğutmasız durumlarda daha azdır. Çizelge 4.23'te görüldüğü gibi ön soğutma depolanan hidrojen kütlesinin artışına yardımcı olmaktadır. Bu çizelgede görüleceği gibi ön soğutmasız 25 g/s için 2 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolun sonunda 1,75 kg, 5 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolun sonunda 2,35 kg ve 7 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolun sonunda 2,74, 9 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolun sonunda 2,77 kg hidrojen depolanmıştır. Dolun süresinin az olmasından dolayı depolanan hidrojen kütlesi ön soğutmasız 2 ve 5 MPa başlangıç basıncına sahip durumlarda daha azdır. Ve yine aynı çizelgede görüldüğü gibi ön soğutma depolanan hidrojen kütlesinin artışına yardımcı olmaktadır. Ön soğutma işlemi ile 25 g/s sabit debi ile 2 MPa başlangıç basıncına sahip durumda 1,06 kg, 5 MPa başlangıç basıncına sahip durumda 0,39 kg daha fazla hidrojen depolanmıştır. 25 g/s sabit debide düşük başlangıç basıncına sahip tanklar için ön soğutma kullanmanın avantajları depolanan kütle farkından anlaşılmaktadır. Ayrıca ön soğutmalı durum sonuçlarından görüldüğü gibi dolun işlemi sonundan depolanan hidrojen kütleleri birbirine oldukça yakındır. 7 ve 9 MPa başlangıç basıncı ait durum için ön soğutmaya ihtiyaç olmadığından iki durumda da kütlesi aynı verilmiştir. Ayrıca ön soğutmalı durum sonuçlarından görüldüğü gibi dolun işlemi sonundan depolanan hidrojen kütleleri birbirine oldukça yakındır. 7 ve 9 MPa başlangıç

basıncı ait durum için ön soğutmaya ihtiyaç olmadığından iki durumda da kütlesi aynı verilmiştir.

40 g/s debi için dolum sonundaki depolanan hidrojen kütlesinin incelenmesi

Yapılan analizler son olarak 40 g/s debi için yapılmış olup ön soğutmasız durumlarda (293 K hidrojen giriş sıcaklığı) sınır sıcaklığa ulaşılan süreler Çizelge 4.24'te verilmiştir. Ön soğutmalı durumlar için değerler ise Çizelge 4.25'te verilmiştir. Elde edilen bu değerler ve 40 g/s debi için iki durum arasında depolanan hidrojen kütlesi farkı Çizelge 4.26'de verilmiştir.

Çizelge 4.24. 40 g/s debi 85 °C ulaşılma süreleri (izin verilen sınırın aşıldığı durumlar)

İç Basıncı (MPa)	85 °C Ulaşılma Süresi (sn)
2	16,50
5	26,50
7	39,90

Çizelge 4.25. 40 g/s debi MPa'ya ulaşılma süreleri (izin verilen sınırın aşılmadığı durumlar)

İç Basıncı (MPa)	Dolum Süresi (sn)
2	66,10
5	57,30
7	49,50
9	44,20

Çizelge 4.26. 40 g/s debi- ön soğutmalı ve ön soğutmasız durumlarda depolanan hidrojen kütlesi

İç Basıncı (MPa)	Ön Soğutmasız Durumlarda Depolanan Hidrojen Kütlesi (kg)	Ön Soğutmalı Durumlarda Depolanan Hidrojen Kütlesi (kg)	Ön Soğutmalı Durum ve Ön Soğutmasız Fark (kg)
2	0,89	2,87	1,98
5	1,62	2,85	1,23
7	2,38	2,76	0,38
9	2,76	-	-

Ön soğutmasız durumlarda izin verilen sıcaklık sınırının maksimum izin verilen basınca ulaşılmadan aşılmasından dolayı dolum süresinin az olmasından dolayı depolanan hidrojen

kütlesi ön soğutmasız durumlarda daha azdır. Çizelge 4.26'da görüldüğü gibi ön soğutma depolanan hidrojen kütlesinin artışına yardımcı olmaktadır. Bu çizelgede görüleceği gibi ön soğutmasız 40 g/s için 2 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolum sonunda 0,89 kg, 5 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolum sonunda 1,62 kg ve 7 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolum sonunda 2,38 kg, 9 MPa başlangıç basıncına sahip tank içerisinde dolum sonunda 2,76 kg hidrojen depolanmıştır. Dolum süresinin az olmasından dolayı depolanan hidrojen kütlesi ön soğutmasız 2, 5 ve 7 MPa başlangıç basıncına sahip durumlarda daha azdır. Ve yine aynı çizelgede görüldüğü gibi ön soğutma depolanan hidrojen kütlesinin artışına yardımcı olmaktadır. Ön soğutma işlemi ile 40 g/s sabit debi ile 2 MPa başlangıç basıncına sahip durumda 1,98 kg, 5 MPa başlangıç basıncına sahip durumda 1,23 kg, 7 MPa başlangıç basıncına sahip durumda 0,38 kg daha fazla hidrojen depolanmıştır. 40 g/s sabit debide düşük başlangıç basıncına sahip tanklar için ön soğutma kullanmanın avantajları depolanan kütle farkından anlaşılmaktadır. Hidrojenin ön soğutma ile depolama tankına gönderilmesinin önemi debi arttıkça daha da artmaktadır. Artan debi ile depolamada ön soğutmalı ve soğutmasız durumlarda depolanan hidrojen kütlesi arasındaki fark artmaktadır. Ayrıca ön soğutmalı durum sonuçlarından görüldüğü gibi dolum işlemi sonundan depolanan hidrojen kütleleri birbirine oldukça yakındır. 9 MPa başlangıç basıncı ait durum için ön soğutmaya ihtiyaç olmadığından iki durumda da kütlesi aynı verilmiştir. Ayrıca ön soğutmalı durum sonuçlarından görüldüğü gibi dolum işlemi sonundan depolanan hidrojen kütleleri birbirine oldukça yakındır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan ilk analizlerde, hidrojen depolama işleminde dolun sonunda tank içerisindeki hidrojen ve katmalarda oluşan maksimum sıcaklıkların izin verilen sıcaklık değerine uygunluğu kontrol edilmiştir. İzin verilen sıcaklığı aştığı tespit edilen durumlar, uygun durumu getirilmek için dolun yapılan hidrojenin ön soğutulmasıyla analizler tekrarlanmıştır. Böylece, tüm durumların izin verilen sıcaklık aralığında kalması sağlanmıştır. Tip 3 hidrojen depolama tankları için hidrojenin hızlı dolunu üzerine yapılan çalışma, depolanan hidrojenin dolun sonrası ulaştığı maksimum sıcaklığının belirlenmesinde hem başlangıç basıncının hem de giriş sıcaklığının önemini ortaya koymuştur. Özellikle, başlangıç basıncını düşürmenin ve giriş sıcaklığını artırmanın her ikisinin de depolama tankının ulaştığı son sıcaklıkta bir artışa neden olduğu bulunmuştur. Yapılan hesaplamalar göstermiştir ki hidrojen dolun prosesinde sıcaklığı kontrol altında tutmak için ön soğutma etkili bir yöntemdir fakat aynı zamanda da dışardan enerji kullanımını arttıran bir yöntemdir. Bu bulgular, hidrojen depolama sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu için önemli çıkarımlara sahiptir, çünkü hem başlangıç basıncının hem de giriş sıcaklığının dikkatli bir şekilde değerlendirilmesinin güvenli ve verimli çalışmayı sağlamaya yardımcı olabileceği önerilmektedir. Sonuçlarımız, farklı başlangıç basınçları ve debi değerleri için yapılan HAD analizinin hidrojen depolama tankı performansını etkilediğini göstermektedir.

Ayrıca sonuçlar incelendiğinde ön soğutma uygulamasının dolun işlemini izin verilen sıcaklıkta tutmak için iyi bir yöntem olduğunu göstermesinin yanı sıra hidrojen tankı dolun prosesinde ön soğutma depolanan hidrojen miktarında artış sağlamaktadır. Ön soğutmalı hidrojen kullanımı özellikle yüksek debili ve düşük başlangıç basınçlarına sahip tanklarda yapılan dolun işlemlerinde daha gerekli olduğu görülmüştür. Yüksek debili dolumlarda izin verilen sıcaklığa ulaşmak daha hızlı olduğundan depolanan hidrojen miktarı oldukça düşmektedir. Hidrojen ön soğutma depolanan kütle miktarını artırıp, doldurma prosesinde oluşan maksimum sıcaklığı izin verilen sıcaklıkta tutması artı yönü olsa da hidrojeni soğutmak için bir enerjiye ihtiyaç vardır. Hidrojen ön soğutmanın kullanılıp kullanılmaması yapılan detaylı hesaplamalardan sonra her sistem için farklılık gösterebilir.

Analiz sonuçlarına dayanarak, ön soğutma işlemiyle hidrojenin sıcaklığının düşürülmesinin, tankın performansını önemli ölçüde iyileştirdiği görüldü. İzin verilen sıcaklıkta tutulan

hidrojenin, daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu ve dolayısıyla daha fazla miktarda hidrojenin depolanabildiği belirlendi.

Bu alışma, hidrojen depolama teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli bir adım olmuştur. Elde edilen sonuçlar, hidrojen depolama tanklarının verimliliğini artırma potansiyeline sahip olan n soğutma yöntemine odaklanmayı gerektirdiğini göstermektedir. Bu bulgular, hidrojen ekonomisinde depolama ve taşıma sistemlerinin optimize edilmesi için önemli bir katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, hidrojen depolama tankları için n soğutmanın önemini vurgulamakta ve hidrojenin depolama kapasitesini artırma potansiyeline sahip bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu bulgular, enerji depolama ve hidrojen ekonomisi alanlarında ilerlemeyi teşvik etmektedir.

KAYNAKLAR

1. Borowski, P. F. (2020). New technologies and innovative solutions in the development strategies of energy enterprises. *HighTech and Innovation Journal*, 1(2), 39-58.
2. Léon, A. (Ed.). (2008). *Hydrogen technology: mobile and portable applications*. New York: Springer Science & Business Media.
3. İnternet: *Hydrogen Storage*. URL: <http://www.hydrogen.energy.gov/storage.html>, Son Erişim Tarihi: 24.01.2023.
4. Mori, D., and Hirose, K. (2009). Recent challenges of hydrogen storage technologies for fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(10), 4569-4574.
5. Zheng, J., Liu, X., Xu, P., Liu, P., Zhao, Y., and Yang, J. (2012). Development of high pressure gaseous hydrogen storage technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(1), 1048-1057.
6. Zhou, W., Wang, J., Pan, Z. B., Liu, J., Ma, L. H., Zhou, J. Y., and Su, Y. F. (2022). Review on optimization design, failure analysis and non-destructive testing of composite hydrogen storage vessel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 47, 38862-38883.
7. Wong, J., and Eng, P. (2009r). *CNG & hydrogen tank safety, R&D, and testing*. Avenue: Powertech Labs Inc.
8. Zhiyong, L., Xiangmin, P., and Jianxin, M. (2010). Quantitative risk assessment on a gaseous hydrogen refueling station in Shanghai. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(13), 6822-6829.
9. Doe, U. (2009). *Targets for onboard hydrogen storage systems for light-duty vehicles*. US Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy and The Freedom CAR and Fuel Partnership: Washington, DC, USA.
10. Hirose, M. (2010). *Handbook of hydrogen storage: new materials for future energy storage*. New York: John Wiley & Sons.
11. Jena, P. (2011). Materials for hydrogen storage: past, present, and future. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2(3), 206-211.
12. Pregassame, S., Barth, F., Allidiers, L., and Barral, K. (2006, 13-16 June). *Hydrogen refuelling station: filling control protocols development*. 16th World Hydrogen Energy Conference. Lyon France, 13-16.
13. Society of Automotive Engineers. (2010). Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicle, *Technical Information Report*. SAE international, J2601.
14. European Commission (2010). Commission regulation (EU) no 406/2010 of 26 April 2010 implementing regulation (EC) no 79/2009 on type-approval of hydrogen-powered motor vehicles. *Official Journal of the European Union*, L 122, 1-107.

15. ECE/TRANS/WP.29/2013/41. Proposal for a global technical regulation on hydrogen and fuel cell vehicles.
16. SAE J2579 (2013). Technical information report for fuel system in fuel cells and other hydrogen vehicles.
17. İnternet: ISO/TS. (2009). Gaseous hydrogen and hydrogen blends: land vehicle fuel tanks (ISO/TS 15869:2009(en)). International Standard Organization. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:15869:ed-1:v1:en>, Son Erişim Tarihi: 13.06.2023.
18. Cebolla, R. O., Acosta, B., de Miguel, N., and Moretto, P. (2015). Effect of precooled inlet gas temperature and mass flow rate on final state of charge during hydrogen vehicle refueling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(13), 4698-4706.
19. Dicken, C. J. B., and Mérida, W. (2007). Modeling the transient temperature distribution within a hydrogen cylinder during refueling. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 53(7), 685-708.
20. Liu, Y. L., Zhao, Y. Z., Zhao, L., Li, X., Chen, H. G., Zhang, L. F., and Zheng, J. Y. (2010). Experimental studies on temperature rise within a hydrogen cylinder during refueling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(7), 2627-2632.
21. Melideo, D., Baraldi, D., Galassi, M. C., Cebolla, R. O., Iborra, B. A., and Moretto, P. (2014). CFD model performance benchmark of fast filling simulations of hydrogen tanks with pre-cooling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(9), 4389-4395.
22. Li, Q., Zhou, J., Chang, Q., and Xing, W. (2012). Effects of geometry and inconstant mass flow rate on temperatures within a pressurized hydrogen cylinder during refueling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(7), 6043-6052.
23. Yang, J. C. (2009). A thermodynamic analysis of refueling of a hydrogen tank. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(16), 6712-6721.
24. Zhao, L., Liu, Y., Yang, J., Zhao, Y., Zheng, J., Bie, H., and Liu, X. (2010). Numerical simulation of temperature rise within hydrogen vehicle cylinder during refueling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(15), 8092-8100.
25. Li, H., Lyu, Z., Liu, Y., Han, M., and Li, H. (2021). The effects of infill on hydrogen tank temperature distribution during fast fill. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(17), 10396-10410.
26. Kuroki, T., Sakoda, N., Shinzato, K., Monde, M., and Takata, Y. (2018). Dynamic simulation for optimal hydrogen refueling method to Fuel Cell Vehicle tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(11), 5714-5721.
27. Cebolla, R. O., Acosta, B., de Miguel, N., and Moretto, P. (2015). Effect of precooled inlet gas temperature and mass flow rate on final state of charge during hydrogen vehicle refueling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(13), 4698-4706.
28. Heitsch, M., Baraldi, D., and Moretto, P. (2011). Numerical investigations on the fast filling of hydrogen tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(3), 2606-2612.

29. Suryan, A., Kim, H. D., and Setoguchi, T. (2012). Three dimensional numerical computations on the fast filling of a hydrogen tank under different conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(9), 7600-7611.
30. Xiao, J., Cheng, J., Wang, X., Bénard, P., and Chahine, R. (2018). Final hydrogen temperature and mass estimated from refueling parameters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(49), 22409-22418.
31. Simonovski, I., Baraldi, D., Melideo, D., and Acosta-Iborra, B. (2015). Thermal simulations of a hydrogen storage tank during fast filling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(36), 12560-12571.
32. Mohamed, K., and Paraschivoiu, M. (2005). Real gas simulation of hydrogen release from a high-pressure chamber. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(8), 903-912.
33. Ramasamy, V., and Richardson, E. S. (2020). Thermal response of high-aspect-ratio hydrogen cylinders undergoing fast-filling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 160, 120179.
34. Maus, S., Hapke, J., Ranong, C. N., Wüchner, E., Friedlmeier, G., and Wenger, D. (2008). Filling procedure for vehicles with compressed hydrogen tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(17), 4612-4621.
35. Liss, W. E., Richards, M. E., Kountz, K., and Kriha, K. (2004, June). *Development and validation testing of hydrogen fast-fill fueling algorithms*. 15th World Hydrogen Energy Conference. Gas Technology Institute, Illinois, USA.
36. ANSYS. (2010). *ANSYS FLUENT User's Guide, Release 13.0*. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc.
37. Redlich, O., and Kwong, J. N. (1949). On the thermodynamics of solutions. V. An equation of state. Fugacities of gaseous solutions. *Chemical Reviews*, 44(1), 233-244.



Gazili olmak ayrıcalıktır