SIKIŞTIRILMIŞ DOĞAL GAZ DEPOLAMA VE DAĞITIM TEKNOLOJİLERİ

Fatih ÖZCAN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIKIŞTIRILMIŞ DOĞAL GAZ DEPOLAMA VE DAĞITIM TEKNOLOJİLERİ

Fatih ÖZCAN

0000-0003-2638-0366

Prof. Dr. Muhsin KILIÇ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

SIKIŞTIRILMIŞ DOĞAL GAZ DEPOLAMA VE DAĞITIM TEKNOLOJİLERİ

Fatih ÖZCAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

Bu tezde, sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) dolum istasyonlarının termodinamik davranışı, sistem bileşenlerinin dinamik etkileşimi ve tasarım parametrelerinin optimizasyonu çok disiplinli ve bütüncül bir yaklaşımla analiz edilmiştir. İlk olarak, farklı doğal gaz karışımları için sıcaklık ve basınca bağlı olarak özgül hacim, entalpi, entropi, sıkıştırılabilirlik faktörü ve ses hızı gibi termodinamik özellikler hesaplanmış, bu kapsamda doğrulama amacıyla AGA8-DC92 denklemi uygulanmış, esas modelleme sürecinde ise CoolProp kütüphanesi ile daha esnek ve kapsamlı hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplanan veriler, Simulink ortamında geliştirilen fiziksel modele aktarılmış ve çok kademeli kompresör, ara soğutucular, üç seviyeli depolama tankları ile dispenser birimi ayrıntılı biçimde temsil edilmiştir. Model, araç dolum süreci boyunca sıcaklık, basınç ve debi değişimlerinin zamana bağlı olarak izlenmesini sağlamaktadır. Araç tankı, hortum ve depo bileşenleri arasındaki akış ve ısı transferi ilişkileri incelenmiş; farklı gaz özellikleri, ortam koşulları ve dolum senaryoları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Sistem performansı üzerindeki etkisi nedeniyle kademeli depolama sistemine ait hem basınçların hem tank hacim oranlarının optimizasyonu gerçekleştirilmiş; bu kapsamda Taguchi deneysel tasarımı uygulanmış ve çoklu performans kriterleri Gri İlişki Analizi (GRA) yöntemiyle birlikte değerlendirilmiştir. Geliştirilen model ve elde edilen optimizasyon çıktıları, CNG istasyonlarının tasarımı ve işletilmesi için uygulanabilir mühendislik kararları sunmakta, literatüre hem bilimsel hem de pratik katkılar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: sıkıştırılmış doğal gaz (CNG), dinamik modelleme, kompresör sistemi, depolama optimizasyonu, Taguchi yöntemi, gri ilişki analizi
2025, xvi + 122 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

COMPRESSED NATURAL GAS STORAGE AND DELIVERY INSTALLATION TECHNOLOGIES

Fatih ÖZCAN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

In this dissertation, the thermodynamic behavior of compressed natural gas (CNG) refueling stations, the dynamic interaction among system components, and the optimization of design parameters are analyzed through a multidisciplinary and integrated approach. Initially, thermodynamic properties such as specific volume, enthalpy, entropy, compressibility factor, and speed of sound were calculated depending on temperature and pressure for various natural gas mixtures. For validation purposes, the AGA8 DC92 equation of state was used, while the main modeling was carried out using the CoolProp library to enable more flexible and comprehensive calculations. The computed data were transferred into a physical model developed in the Simulink environment, which includes a compressor with multiple stages, intercoolers, a storage tank system with three pressure levels, and a dispenser unit. The model allows time-based monitoring of temperature, pressure, and mass flow variations during the vehicle filling process. The flow and heat transfer interactions between the vehicle tank, hose, and storage units were examined, and different gas compositions, environmental conditions, and filling scenarios were comparatively analyzed. Due to their significant impact on system performance, both reservoir pressures and volume ratios of the storage tanks were optimized. In this context, the Taguchi experimental design was applied, and multiple performance indicators were evaluated using the Grey Relational Analysis (GRA) method. The developed model and the resulting optimization outcomes provide practical engineering recommendations for improving the design and operation of CNG refueling systems and contribute original insights to the scientific literature.

Keywords: compressed natural gas (CNG), dynamic modeling, compressor system, storage optimization, Taguchi method, grey relational analysis
2025, xvi + 122 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince bilgi ve tecrübesiyle bana her zaman yol gösteren, akademik yaklaşımı, yapıcı eleştirileri ve desteğiyle çalışmamın her aşamasında katkı sunan değerli danışmanım Prof. Dr. Muhsin KILIÇ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisiyle çalışmak, akademik gelişimim açısından son derece kıymetli bir deneyim olmuştur.

Ayrıca bu çalışmanın yürütülmesi sürecinde görev yaptığım Bursa Uludağ Üniversitesi Orhangazi Yeniköy Asil Çelik Meslek Yüksekokulu'na ve değerli meslektaşlarıma sağladıkları akademik ortam, anlayış ve manevi destek için teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yanımda olan, sabırları, sevgileri ve destekleriyle bana güç veren aileme şükranlarımı sunuyorum. Özellikle bu zorlu süreçte her daim yanımda duran, fedakârlığı ve anlayışıyla bana en büyük desteği sağlayan sevgili eşim Esma'ya; varlığıyla hayatıma neşe ve anlam katan güzel kızım Özün'e; koşulsuz sevgileri ve dualarıyla her zaman yanımda olduklarını hissettiren kıymetli anneme ve babama minnettarım.

Fatih ÖZCAN
10/06/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ xvi
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 4
2.1. Doğal Gazın Temel Özellikleri ve CNG Tanımı 4
2.2. CNG Dolum İstasyonlarının Genel Yapısı 6
2.3. Doğal Gaz Kompresörleri 8
2.4. Depolama Sistemleri 10
2.5. Dolum Sürecinde Termodinamik Etkiler 12
2.6. Simülasyon ve Modelleme 15
2.7. Çok Amaçlı Optimizasyon 16
2.8. Literatür İncelemesi 18
3. MATERYAL ve YÖNTEM 21
3.1. CNG İstasyonu Dinamik Modeli 21
3.1.1. Fiziksel ve sayısal model yapısı 22
3.1.2. Mantıksal kontrol ve dolum karar mekanizması 25
3.2. Kompresör Sistemi Modeli 28
3.2.1. Kompresör kademeleri 31
3.2.2. Soğutma sistemi ve coolant bloğu 33
3.3. Depolama ve Dolum Sistemi Modeli 35
3.3.1. Üç basınç seviyeli depolama tankları 36
3.3.2. Öncelik vanası (priority valve) 38
3.3.3. Dağıtım ünitesi ve araç tankı 39
3.4. Termodinamik Özelliklerin Hesaplanması 41
3.5. Simülasyon Modelinin Girdi Parametrelerinin Belirlenmesi 43
3.6. Simülasyon Senaryoları ve Uygulama Kısıtları 44
3.7. Taguchi Deney Tasarımı ve Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Optimizasyon Yaklaşımı 45
3.8. Deneysel Verilerle Model Doğrulaması 48
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 51
4.1. Termodinamik Özellik Hesaplama Kodu ve AGA8-DC92 Hal Denklemi Uygulaması 51
4.2. AGA8-DC92 Denklemi ile Termodinamik Özelliklerin Hesaplanması ve Yoğunluk Doğrulaması 53
4.3. Doğal Gaz Modelleme Yaklaşımlarının ve Bileşim Farklılıklarının Dolum Performansına Etkisi 56
4.3.1. Gerçek ve ideal gaz varsayımlarının karşılaştırılması 57
4.3.2. Farklı doğal gaz karışımları için simülasyon bulguları 60
4.4. Kademeli Depolama Yapısı ile Dolum Performansının Dinamik Modellenmesi 67

4.5. Kademeli Depolama Sistemi için Çok Amaçlı Optimizasyon 74
4.5.1. Depolama basınçlarının optimizasyonu 75
4.5.2. Depo hacimlerinin oranına göre optimizasyon 84
5. SONUÇ 97
KAYNAKLAR 101

EKLER 108

EK 1 AGA8-DC92 HAL DENKLEMİ İLE TERMODİNAMİK ÖZELİK HESAPLAMASI İÇİN GELİŞTİRİLEN MATLAB KODU 109
EK 2 AGA8-DC92 DENKLEMİ İLE SIKIŞTIRILABİLİRLİK FAKTÖRÜ VE YOĞUNLUK HATASI HESAPLAMALARI İÇİN MATLAB KODLARI 119
ÖZGEÇMİŞ 122

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
w_i	ağırlık faktörü
$\emptyset$	ayırt edici katsayı
m	kütle (kg)
h	özgül entalpi (kJ/kg)
s	özgül entropi (kJ/kgK)
T	sıcaklık (^oC)
$Delta$	sinyal gürültü oranı aralığı
U	toplam ısı transfer katsayısı (W/m_2K)
P	Basınç (bar)
Q	Isı transferi (kW)
R	Gaz sabiti (kJ/kmol·K)
T	Sıcaklık (^oC)
V	Hacim (L)
W	Kompresör işi (kWh)
Z	Sıkıştırılabilirlik faktörü
c_p	Sabit basınçtaki özgül ısı (kJ/kg·K)
c_v	Sabit hacimdeki özgül ısı (kJ/kg·K)
k	Isı iletkenlik katsayısı(W/m·K)
n	Araç sayısı
t	Zaman s
ΔP	Basınç farkı bar
ΔT	Sıcaklık farkı °C
α	İzobarik genleşme katsayısı (K^{-1})
β	İzotermal sıkıştırılabilirlik katsayısı (MPa^{-1})
γ	Oranlar oranı (cp/cv)
η	Verim
μ	Dinamik viskozite (μPa·s)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
$\dot{m}$	Kütlesel debi (kg/s)
$P_{düşük}$	Düşük basınç depo tankı basıncı
P_{orta}	Orta basınç depo tankı basıncı
$P_{yüksek}$	Yüksek basınç depo tankı basıncı

Kısaltmalar	**Açıklama**
CNG	Compressed Natural Gas (Sıkıştırılmış Doğal Gaz)
GRA	Grey Relational Analysis (Gri İlişki Analizi)
GRD	Gri İlişki Derecesi
GRC	Gri İlişki Katsayısı
HCNG	Hydrogen-enriched Compressed Natural Gas
NGV	Natural Gas Vehicle (Doğal Gazlı Araç)
MATLAB	Matrix Laboratory (MATLAB yazılımı)

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 3.1.	CNG dolum istasyonunun fiziksel bileşen yapısı ve gaz akış yönü	22
Şekil 3.2.	Simscape tabanlı CNG istasyonu modelinin üst seviye blok diyagramı	23
Şekil 3.3.	Simscape Solver Configuration bloğu için tanımlanmış çözüm parametreleri	24
Şekil 3.4.	Gas properties bloğunda gerçek gaz modeli için kullanılan parametre tanımları	25
Şekil 3.5.	BufferStatus bloğunda üç basınç seviyesine göre doluluk kontrol mantığı	26
Şekil 3.6.	ChargeBuffer bloğunda dolum sırasını belirleyen karar yapısı	27
Şekil 3.7.	Dispense1 alt sisteminde Stateflow tabanlı araç tankı dolum kontrolü	28
Şekil 3.8.	Üç kademeli kompresör sisteminin Simscape ortamında modellenmiş genel yapısı	29
Şekil 3.9.	Simscape Orifice (G) bloğuna ait parametre ayarları	30
Şekil 3.10.	Stage 1 bloğu, çıkış sensörleri ve Intercooler 1 bağlantılarıyla birlikte birinci kompresör kademesinin genel yapısı	33
Şekil 3.11.	Kompresör kademelerine seri bağlı üç eşanjör üzerinden geçen kapalı çevrimli soğutma sisteminin Simulink ortamındaki modeli.	35
Şekil 3.12.	Simulink ortamında modellenmiş üç seviyeli (yüksek, orta, düşük) basınçlı doğal gaz depolama sistemi	36
Şekil 3.13.	Yüksek basınçlı tank için ısı geçişi ve sıcaklık modellemesi	37
Şekil 3.14.	Priority Valve Out alt sisteminde araç dolum sırası kontrolü	39
Şekil 3.15.	Dağıtım biriminde basınca bağlı çalışan vana ve akış denetim yapısı	40
Şekil 3.16.	Araç deposu, sıcaklık ve basınç algılayıcıları ile ısıl davranış modeli	40
Şekil 3.17.	Modelde kullanılan fiziksel verilerin hesaplanması ve Simulink'e aktarılması sürecine ait veri işleme yapısı.	43
Şekil 3.18.	Hızlı dolum işlemi sırasında kütlesel debi değişiminin deneysel ve simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılması	49
Şekil 3.19.	Araç silindiri iç basıncının zamanla değişiminin deneysel ve simülasyon verileriyle karşılaştırılması	49
Şekil 4.1.	Sabit sıcaklıklarda sıkıştırılabilirlik faktörünün basınca göre değişimi	54
Şekil 4.2.	Sabit basınçlarda sıkıştırılabilirlik faktörünün sıcaklığa göre değişimi	54
Şekil 4.3.	Deneysel ve hesaplanan yoğunluk değerlerinin karşılaştırılması	55
Şekil 4.4.	Hesaplanan yoğunlukların bağıl hata yüzdeleri	56
Şekil 4.5.	Gerçek gaz ve ideal gaz varsayımlarına göre araç tankına dolan toplam gaz kütlesinin zamana bağlı değişimi.	58
Şekil 4.6.	Gerçek gaz ve ideal gaz modellerine göre araç ve depo tank sıcaklıklarının zamana bağlı karşılaştırılması	58
Şekil 4.7.	Gerçek gaz ve ideal gaz modellerine göre araç ve depo tank basınçlarının zamana bağlı karşılaştırılması	59

Şekil 4.8. Araç ve depo tankına ait zamana bağlı sistem tepkileri: (a) araç tankı basıncı, (b) depo tankı basıncı,(c) araç tankı sıcaklığı, (d) depo tankı sıcaklığı,(e) araç tankı kütle debisi, (f) araç tankına dolan toplam kütle 60
Şekil 4.9. Farklı doğal gaz karışımları için dolum süresince araç tankı sıcaklığının iç basınca bağlı değişimi 62
Şekil 4.10. Farklı doğal gaz karışımları için dolum süresince araç tankına iletilen kütle debisinin iç basınca bağlı değişimi 63
Şekil 4.11. Farklı doğal gaz karışımları için araç tankına dolan toplam gaz kütlesinin iç basınca bağlı değişimi 63
Şekil 4.12. Farklı doğal gaz karışımları için dolum süresince araç tankı iç basıncının zamana bağlı değişimi 64
Şekil 4.13. Farklı doğal gaz karışımları için dolum süresince gazın özgül entropisinin zamana bağlı değişimi 65
Şekil 4.14. Ortam sıcaklığının farklı doğal gaz karışımları için araç tankı son sıcaklığı üzerindeki etkisi 65
Şekil 4.15. Ortam sıcaklığının farklı doğal gaz karışımları için araç tankına dolan gaz kütlesi üzerindeki etkisi 66
Şekil 4.16. Kompresör kademelerine ait çıkış basınçları ile düşük, orta ve yüksek basınçlı depo tanklarının dolum süresince basınç değişimleri 68
Şekil 4.17. Kompresör kademelerine ait giriş ve çıkış sıcaklık farklarının zamanla değişimi (ilk dolum döngüsü) 69
Şekil 4.18. Depolama tanklarının dolum süreci boyunca gözlenen sıcaklık değişimleri 70
Şekil 4.19. Araç ve depo tanklarının yaklaşık ilk yedi saatlik süre boyunca gözlenen basınç değişimleri 71
Şekil 4.20. İlk üç araç dolumu sırasında araç tankı sıcaklıkları ve anlık kütle debileri 73
Şekil 4.21. Araç sayısı için S/G oranı ortalamalarının faktör seviyelerine göre değişimi 78
Şekil 4.22. Ortalama Dolum Miktarı İçin S/G Oranı Ortalamalarının Faktör Seviyelerine Göre Değişimi 79
Şekil 4.23. Özgül Kompresör Enerjisi İçin S/G Oranı Ortalamalarının Faktör Seviyelerine Göre Değişimi 81
Şekil 4.24. Araç dolum sayısı için kontrol faktörlerinin seviyelerine göre ortalama S/G oranlarının değişimi 88
Şekil 4.25. Ortalama dolum kütlesi için kontrol faktörlerinin seviyelerine göre ortalama S/G oranlarının değişimi 89
Şekil 4.26. Özgül enerji tüketimi için kontrol faktörlerinin seviyelerine göre< ortalama S/G oranlarının değişimi 91
Şekil 4.27. Hacim ve basınç optimizasyonu sonrasında çok kademeli depo tanklarında basınç değişimi (24 saat) 94
Şekil 4.28. Hacim ve basınç optimizasyonu sonrasında çok kademeli depo tanklarında sıcaklık değişimi 94

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 3.1.	Depolama ve araç tanklarında ısı transferine ilişkin parametreler	38
Çizelge 4.1.	AGA8-DC92 ile hesaplanan termodinamik özellikler (T = 0 °C, P = 1,0156 bar)	52
Çizelge 4.2.	Deneysel çalışmada kullanılan doğal gaz karışımının bileşimi (mol %)	53
Çizelge 4.3.	Doğal gaz bileşenlerinin mol yüzde değerleri (% mol)	61
Çizelge 4.4.	Doğal gaz örneklerine ait fiziksel özellikler (20 °C ve 1 atm koşullarında)	61
Çizelge 4.5.	Kontrol faktörleri ve seviyeleri (depo basınçları)	75
Çizelge 4.6.	L16 ortogonal diziye göre deney koşulları ve çıktılar	76
Çizelge 4.7.	L16 ortogonal diziye göre sinyal/gürültü (S/G) oranları	76
Çizelge 4.8.	Araç sayısı performans ölçütüne göre S/G oranlarının seviye ortalamaları	77
Çizelge 4.9.	Ortalama dolum miktarı performans ölçütüne göre S/G oranlarının seviye ortalamaları	79
Çizelge 4.10.	Özgül kompresör enerjisi performans ölçütüne göre S/G oranlarının seviye ortalamaları	80
Çizelge 4.11.	Normalize edilmiş performans ölçütleri	82
Çizelge 4. 12.	Gri ilişki katsayıları, genel gri ilişki dereceleri ve sıralamalar	83
Çizelge 4.13.	Depo hacmi analizi için kontrol faktörleri ve seviyeleri	85
Çizelge 4.14.	Hacim optimizasyonu deney sonuçları	86
Çizelge 4. 15.	L9 ortogonal diziye göre sinyal/gürültü (S/G) oranları	87
Çizelge 4. 16.	Araç dolum sayısı için kontrol faktörlerine ait seviye ortalamaları, delta ve ağırlık değerleri (S/G oranları)	87
Çizelge 4.17.	Ortalama dolum kütlesi için kontrol faktörlerine ait seviye ortalamaları, delta ve ağırlık değerleri (S/G oranları)	89
Çizelge 4.18.	Özgül kompresör enerjisi performans ölçütüne göre S/G oranlarının seviye ortalamaları	90
Çizelge 4.19.	Hacim optimizasyonu için normalizasyon sonuçları	92
Çizelge 4.20.	Gri ilişki katsayıları, gri ilişki dereceleri ve sıralamalar	92
Çizelge 4.21.	Optimizasyon öncesi, basınç optimizasyonu sonrası ve hacim optimizasyonu sonrası CNG istasyonu performansı	96

1. GİRİŞ

Dünya genelinde enerji tüketiminin büyük bir bölümü ulaşım sektöründe gerçekleşmekte ve bu durum, fosil yakıtlara olan bağımlılığı artırmakta, çevresel etkileri ise derinleştirmektedir. Özellikle kentleşmenin yoğunlaştığı bölgelerde hava kalitesini olumsuz etkileyen bu tablo, karbon salımlarının artması, enerji maliyetlerinin yükselmesi ve enerji arz güvenliğinin zayıflaması gibi çok yönlü riskleri beraberinde getirmektedir (U.S. Department of Energy, 2015). Bu doğrultuda, alternatif yakıt teknolojilerine olan ilgi artmakta ve sürdürülebilir ulaşım çözümleri ön plana çıkmaktadır. Bu çözümler arasında, sıkıştırılmış doğal gaz (CNG); düşük karbon salımı, maliyet etkinliği ve erişilebilirliği sayesinde öne çıkan bir seçenek hâline gelmiştir (Khan vd., 2015; Prussi vd., 2021).

CNG, metan ağırlıklı yapısı sayesinde çevresel avantajlara sahiptir. Dizel ve benzin gibi konvansiyonel yakıtlara kıyasla yaklaşık %25 daha az karbon dioksit salımı ve düşük partikül emisyonu üretmesi, özellikle büyükşehirlerdeki toplu taşıma sistemlerinde tercih edilmesini sağlamaktadır (Yalçın ve Akcan, 2015). Ayrıca, doğal gazın yurt içi kaynaklardan temin edilebilmesi, enerji ithalatına olan bağımlılığı azaltarak ekonomik ve stratejik fayda sağlamaktadır. CNG'nin motor teknolojilerine uyumluluğu ve dolum sürelerinin geleneksel yakıtlarla benzer seviyelerde olması da operasyonel verimliliği artırmaktadır. Bu yönleriyle CNG kullanımı, birçok ülkede hızla yaygınlaşmakta ve buna paralel olarak CNG dolum altyapısı kurulumuna olan ihtiyaç da artmaktadır.

CNG dolum istasyonları; gazın sıkıştırılması, depolanması, soğutulması ve kontrollü biçimde araçlara iletilmesi gibi çok aşamalı, dinamik ve birbiriyle ilişkili süreçleri içermektedir (Farzaneh-Gord vd., 2015a; Saadat-Targhi vd., 2016). Bu süreçlerde sıcaklık, basınç, kütlesel debi ve enerji tüketimi gibi birçok parametre etkilidir. Sistemin başarısı yalnızca kullanılan ekipmanın kalitesiyle değil, aynı zamanda bu fiziksel ve mantıksal süreçlerin ne ölçüde doğru modellenebildiğiyle doğrudan ilişkilidir. Özellikle kademeli depo yapıları, soğutma sistemleri ve çoklu araç dolumu gibi uygulamalar, modellemenin kapsamını ve zorluk derecesini artırmaktadır.

Bu kapsamda yapılan literatür taramalarında, CNG sistemlerinin modelleme ve analizine yönelik birçok çalışmaya rastlansa da, çoğunluğunun sabit yük altında çalışan sistemler, tek araç dolumu, idealleştirilmiş gaz özellikleri ve basitleştirilmiş ısı transferi yaklaşımları ile sınırlı kaldığı görülmektedir (Khamforoush vd., 2014; Zhang vd., 2017). Bu tür varsayımlar özellikle yüksek basınç ve hızlı dolum gibi geçici süreçlerde ciddi sapmalara yol açabilmektedir. Bu nedenle, CNG dolum istasyonlarının davranışını doğru şekilde temsil edebilmek için gerçek gaz davranışını esas alan, fiziksel ve zamana bağlı modellerin kullanılması gereklidir.

Bu tez kapsamında, gerçek gaz özelliklerini dikkate alan ve fiziksel alan prensiplerine dayalı dinamik bir CNG dolum istasyonu modeli geliştirilmiştir. Modelleme süreci MATLAB–Simulink platformunda gerçekleştirilmiş; Simscape kütüphaneleri kullanılarak gaz, termal, mekanik ve sıvı etkileşimler bütüncül olarak temsil edilmiştir. Doğal gazın sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişen termodinamik özellikleri, açık kaynaklı CoolProp kütüphanesi yardımıyla hesaplanmış ve modele entegre edilmiştir (CoolProp, t.y.). Ayrıca Stateflow tabanlı mantıksal kontrol yapıları ile dolum sıralaması, depo önceliği ve dolum kararları zamanla değişen koşullara bağlı olarak modellenmiştir.

Modelin geçerliliği, literatürdeki deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Özellikle hızlı dolum sürecine ait kütlesel debi ve basınç değişimleri, geliştirilen modelle başarıyla temsil edilmiş; gerçek gaz modeli kullanımı sayesinde, ideal gaz modeline kıyasla daha yüksek doğruluk elde edilmiştir (George, 2014; Deymi-Dashtebayaz vd., 2014). Model doğrulama çalışmaları, yüksek basınç altındaki hızlı geçiş süreçlerinde gerçek gaz yaklaşımının ne denli kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Modelden elde edilen veriler doğrultusunda; 24 saatlik bir işletme süresi boyunca doldurulan toplam araç sayısı, araç başına aktarılan ortalama gaz kütlesi ve kompresörün özgül enerji tüketimi gibi performans metrikleri hesaplanmış ve analiz edilmiştir. Bu metrikler üzerinden sistemin optimizasyonu için Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılmış, ardından Gri İlişkisel Analiz (GRA) yöntemiyle çok hedefli

optimizasyon gerçekleştirilmiştir (Kılıç vd., 2023; Küçük ve Kılıç, 2023). Bu süreçte hem tank basınç seviyeleri hem de hacim oranları değişken olarak tanımlanmış; istasyonun en yüksek dolum verimini sağlayacak kombinasyonlar belirlenmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma literatürdeki mevcut modelleme yaklaşımlarının ötesine geçerek;

- Gerçek gaz özelliklerinin fiziksel modellemede kullanılmasını,
- Kademeli depolama sistemlerinin Simulink ortamında dinamik yapısını,
- Mantıksal kontrol algoritmalarıyla çoklu dolum sıralamasının modellenmesini,
- Geliştirilen modelin deneysel verilerle doğrulanmasını,
- Sayısal çıktılar üzerinden çok amaçlı optimizasyonun gerçekleştirilmesini içeren kapsamlı ve özgün bir yaklaşım sunmaktadır.

Bu yönüyle tez çalışması, literatüre özgün katkılar sunmakta ve CNG dolum sistemlerinin tasarım ve işletme süreçlerinde karar vericilere mühendislik temelli bir yol haritası sağlamaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) sistemlerine ilişkin temel mühendislik bilgileri ve mevcut literatürdeki güncel araştırmalar sistematik bir şekilde ele alınmıştır. İlk olarak doğal gazın temel özellikleri ve CNG'nin tanımı sunulmuş, ardından CNG dolum istasyonlarının yapısal bileşenleri ve sistem mimarisi incelenmiştir. Kompresör sistemleri, depolama çözümleri ve dolum sürecinde karşılaşılan termodinamik etkiler teknik temelleriyle açıklanmıştır. Bunu takiben, CNG sistemlerinin simülasyon ve modelleme yaklaşımlarıyla birlikte çok amaçlı optimizasyon yöntemlerine dair bilgiler verilmiş, son olarak literatürdeki özgün çalışmalar ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Bu çerçevede, hem teorik altyapının sunulması hem de bu tezin dayandığı literatürün kapsamlı biçimde tanıtılması amaçlanmıştır.

2.1. Doğal Gazın Temel Özellikleri ve CNG Tanımı

Doğal gaz, esas itibariyle metan (CH_4) içeriği yüksek olan, renksiz, kokusuz ve yanıcı bir fosil yakıttır. Ham formunda etan (C_2H_6), propan (C_3H_8), bütan (C_4H_{10}), azot (N_2) ve karbondioksit (CO_2) gibi bileşenler de değişen oranlarda bulunabilir. Bileşimdeki farklılıklar, doğal gazın enerji içeriği, yoğunluğu ve termodinamik davranışı üzerinde önemli farklılıklara yol açmaktadır (Farzaneh-Gord vd., 2015b). Farklı bileşimlerdeki gaz karışımlarının kompresör performansı, çıkış sıcaklığı ve enerji tüketimi gibi parametreleri etkilediği ayrıntılı biçimde gösterilmiştir.

CNG (Compressed Natural Gas), doğal gazın yaklaşık 200 ila 250 bar arasında bir basınçla sıkıştırılmasıyla elde edilen ve genellikle içten yanmalı motorlarda kullanılan alternatif bir taşıt yakıtıdır (U.S. Department of Energy, 2015). Yüksek metan oranı sayesinde diğer fosil yakıtlara göre daha temiz bir yanma sağlar. Khan vd. (2015), CNG'nin karbon monoksit, azot oksitler ve partikül madde gibi zararlı emisyonlarını anlamlı ölçüde azalttığını ve içten yanmalı motorlarla uyumlu çalışma sağladığını belirtmiştir. Bu yönleriyle CNG, ulaşım sektöründe çevre dostu bir alternatif olarak konumlandırılmaktadır.

Doğal gaz, yakıt özelliğinin ötesinde karmaşık bir mühendislik akışkanı olarak değerlendirilmelidir. SGS Environmental Testing Corp. (2015), doğal gazın bileşimindeki değişimlerin sadece enerji içeriğini değil, aynı zamanda motorlarda yanma davranışını ve egzoz emisyon profillerini de etkilediğini ortaya koymuştur. Benzer şekilde Southwest Research Institute (2014), ABD genelinde farklı bölgelerden alınan CNG numunelerinde belirgin bileşim farklılıkları bulunduğunu ve bu farklılıkların performans üzerinde doğrudan etkili olduğunu raporlamıştır.

CNG, yalnızca teknik değil; çevresel ve ekonomik gerekçelerle de tercih edilen bir yakıttır. Carbone vd. (2025), toplu taşımada kullanılan farklı tahrik sistemlerinin ekonomik ve çevresel açıdan değerlendirilmesinde CNG sistemlerinin düşük maliyetleri ve görece düşük emisyon profilleriyle öne çıktığını ortaya koymuştur. Benzer bir şekilde, Ankara Büyükşehir Belediyesi EGO Genel Müdürlüğü (t.y.), şehir içi toplu ulaşımda CNG'li otobüs filosuna geçerek hem yakıt tasarrufu sağlamış hem de hava kirliliğiyle mücadelede somut katkılar sunmuştur.

Doğal gaz, hidrojen, biyometan ve HCNG gibi yeni nesil alternatif yakıtlarla karşılaştırıldığında da önemli bir konumda yer almaya devam etmektedir. Fan vd. (2017), hidrojenle zenginleştirilmiş CNG (HCNG) karışımlarının bazı motor parametrelerinde avantaj sağladığını ancak saf CNG'nin daha yaygın kullanım gördüğünü belirtmiştir. Chu vd. (2025) ise CNG'nin yaşam döngüsü maliyetleri açısından hidrojen gibi sistemlerle rekabet ettiğini vurgulamıştır. Aynı zamanda Prussi vd. (2021), biyometanın CNG altyapısıyla teknik uyumluluğunu ve termofiziksel benzerliğini ortaya koyarak, CNG sistemlerinin gelecekteki dönüşüm potansiyeline işaret etmiştir.

CNG'nin avantajları yalnızca laboratuvar veya teorik çalışmalara dayanmamaktadır. Gerçek saha uygulamalarında da bu yakıta olan ilgi giderek artmaktadır. Naturelgaz (2023), Türkiye'de CNG'nin taşımacılık ve sanayi gibi alanlarda kullanımının hızla arttığını ve altyapı yatırımlarının yoğunlaştığını raporlamaktadır. Ankara örneğinde olduğu gibi, yerel yönetimlerin CNG'li taşıt kullanımına yönelik stratejileri, temiz

enerji politikalarının somut bir uzantısı olarak görülmektedir (EGO Genel Müdürlüğü, t.y.).

Doğal gaz sistemlerinde numune alma teknolojileri de kritik bir başlık olarak öne çıkmaktadır. Mayeaux (t.y.), gaz bileşimindeki değişkenliğin doğru analiz edilebilmesi için uygun numune alma sistemlerinin zorunlu olduğunu vurgulamaktadır. Bu ihtiyaç, gaz bileşiminden kaynaklı sistem performansında oluşabilecek dalgalanmaların önceden tespitine imkan sağlamaktadır.

Ayrıca, Bhutani vd. (2025), elektrikli taşıt teknolojilerinin çıkış yaptığı bu dönemde, CNG'nin geçiş yakıtı olarak hala önemli bir rol oynadığını ve çevresel faydalarını koruduğunu belirtmiştir. Bu görüş, doğal gazın şehir içi ulaşımda güvenli ve temiz bir alternatif olduğuna dair Milojević vd. (2012) tarafından sunulan bulgularla da desteklenmektedir. Yalçın ve Akcan (2015) ise CNG'nin düşük emisyon salımı ve ekonomik avantajları sayesinde dizel yakıtın yerine kullanılabilecek çevreci bir alternatif olduğuna işaret etmektedir.

Bütün bu veriler bir araya getirildiğinde, doğal gaz ve CNG sistemlerinin yalnızca teknik değil, aynı zamanda çevresel, ekonomik ve politik boyutlarıyla birlikte ele alınmasının gerekli olduğu ortaya konmaktadır.

2.2. CNG Dolum İstasyonlarının Genel Yapısı

CNG dolum istasyonları, yüksek basınç altında doğal gazın güvenli ve verimli şekilde araçlara aktarılmasını sağlayan çok bileşenli ve entegre sistemlerdir. Bu istasyonların yapısında; kompresör, depolama tankları, dispenser (dağıtıcı) sistemleri, elektronik kontrol modülleri ve emniyet donanımları gibi birçok bileşen yer almaktadır. Emniyetli bir çalışma ortamı sağlamak amacıyla tahliye valfleri, basınç regülatörleri ve emniyet sensörleri gibi ekipmanlar kritik rol oynamaktadır (Berghmans ve Vanierschot, 2014). Sistemin tüm bileşenleri, aşırı basınç durumlarında sistemin zarar görmesini engellemek üzere tasarlanmıştır.

Dolum istasyonlarının yerleşimi, bileşenlerin konumlandırılması ve yangın güvenliği gibi hususlar, NFPA 52 gibi standartlara göre belirlenmektedir (Conference of Northeast Regional Fire Safety Officials, t.y.). Bu standartlar; ekipman aralıkları, boru hatları, acil durum önlemleri ve yerleşim düzeni gibi konularda kapsamlı yönlendirmeler sunmaktadır. Ayrıca, istasyon tasarımı yapılırken arazi seçimi, emniyet mesafeleri ve borulama gibi hususlar da göz önünde bulundurulmalıdır (North Carolina Solar Center, 2014).

Depolama sistemleri genellikle yüksek basınca dayanıklı çelik tanklardan oluşur. Bu tanklar, belirli test standartlarına göre üretilmiş olup güvenlik valfleriyle donatılmıştır. Tank seçimi, kapasite ihtiyacına ve istasyonun fiziksel yerleşim koşullarına ve kapasite ihtiyacına bağlı olarak belirlenmektedir (Ecotech Enerji, t.y.). Dolum sisteminde kullanılan bu tanklar, düzenli olarak test edilmeli ve ömrünü tamamlamış olanlar güvenli biçimde sistem dışına alınmalıdır (Lynch, 2021).

İstasyonun en temel bileşenlerinden biri olan kompresör, doğal gazı yüksek basınca ulaştırarak depolama tanklarına gönderir. Türkiye'de kullanılan MEPCOGAS CNG kompresörleri bu kapsamda endüstriyel ölçekte çözüm sunmaktadır (Mepsan, t.y.). Kompresörlerin verimli çalışması, gaz basınçlandırma sürelerini ve enerji tüketimini doğrudan etkileyerek sistem performansını belirleyen başlıca unsurlardan biridir.

Dolum işleminin son aşamasında görev alan dispenser sistemleri, basınç, sıcaklık ve debi gibi parametreleri elektronik kontrol modülleri aracılığıyla izlemekte ve yönetmektedir. Elektronik kontrol modülleri, dolum sürecini operatör müdahalesine gerek kalmadan güvenli biçimde yönetmektedir. Han vd. (2014), bu sistemler için yenilikçi bir kontrol tasarımı geliştirmiştir.

Dolum istasyonlarının operasyonel tasarımında sadece teknik değil, aynı zamanda ekonomik ve ergonomik faktörler de rol oynamaktadır. Titreşim ve gürültü gibi kullanıcı konforunu etkileyen faktörlerin kontrolü, sistem tasarımında göz önünde bulundurulmalıdır (Munahar vd., 2024). Türkiye örneğinde ise Çetiner (2019),

endüstriyel CNG dolum tesislerinin operasyonel maliyetler ve enerji verimliliği açısından optimize edilmesinin önemine dikkat çekmiştir.

Günümüzde, CNG sistemlerinin klasik sabit istasyonların ötesine geçerek mobil dolum çözümleri şeklinde de uygulandığı görülmektedir. Mobil CNG dolum sistemleri, sabit istasyonların mümkün olmadığı şehirlerarası taşımacılık gibi alanlarda esnek bir çözüm sunmaktadır (Naturelgaz, 2023). Ayrıca, CNG ve hidrojen gibi alternatif yakıtların birlikte sunulabildiği hibrit istasyonların planlanmasında yerleşim düzeni, güvenlik ve sistem entegrasyonu gibi faktörler öne çıkmaktadır (Wang ve Liu, 2021).

CNG dolum altyapısı sadece tasarım ve uygulama düzeyinde değil, aynı zamanda olası kaza senaryoları bakımından da analiz edilmektedir. Xu vd. (2024), entegre enerji istasyonlarında meydana gelebilecek potansiyel kazaların değerlendirilmesinin sistem güvenliğini artırdığını belirtmiştir. Türkiye'de bazı belediyeler, bu sistemleri başarıyla uygulamaya koymuştur. EGO Genel Müdürlüğü (t.y.), Ankara'daki dolum altyapısının geliştirilmesinde öncü bir rol üstlenerek belediye filosuna ait istasyonlarda kapsamlı sistemler kurmuştur.

CNG dolum istasyonlarının genel yapısına ilişkin teknik rehberlerde; bileşen seçimi, güvenlik protokolleri ve işletme esasları ayrıntılı şekilde tanımlanmıştır (U.S. Department of Energy, 2015). Bu rehberler, yeni istasyonların kurulumu ve mevcut istasyonların güncellenmesi açısından yol gösterici olmaktadır.

2.3. Doğal Gaz Kompresörleri

CNG dolum istasyonlarının temel bileşenlerinden biri olan doğal gaz kompresörleri, sistem performansını doğrudan etkileyen temel enerji dönüşüm birimlerindendir. Kompresör performansı yalnızca mekanik yapıya değil, aynı zamanda uygulanan kontrol sistemlerine de bağlıdır. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda, farklı kontrol algoritmalarının enerji tüketimi ve sistem kararlılığı üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiştir (Evstifeev ve Zaeva, 2018).

Pistonlu kompresörlerin termodinamik analizleri, sistemin farklı gaz modelleri altında nasıl davrandığını ortaya koymaktadır. Gerçek gaz ve ideal gaz varsayımlarına göre yapılan karşılaştırmalar, çıkış sıcaklığı, enerji tüketimi ve verimlilik gibi parametrelerde anlamlı farklar oluşturduğunu göstermektedir (Farzaneh-Gord vd., 2015a). Özellikle gaz kompozisyonundaki değişimlerin dolum sürecine etkisi, dolum süresinin uzaması ve dolum sırasında sıcaklık artışı gibi sonuçlara neden olmaktadır (Farzaneh-Gord vd., 2014).

Booster tipi kompresörler, dolum istasyonlarında mevcut gaz basıncını artırarak yüksek hızlı dolum koşullarını sağlamaktadır. Bu kompresörlerin teknik özellikleri, tasarım ve kapasite seçiminde önemli rol oynamaktadır. Örneğin, GOA Natural Gas Pvt. Ltd. (2023) tarafından geliştirilen 450 SCMH kapasiteli booster kompresör, hem sıcaklık hem de güç değerleri açısından detaylı veriler sunmaktadır. Türkiye'de de bu tür ekipmanlara örnek olarak MEPCOGAS CNG kompresör modeli gösterilebilir (Mepsan, t.y.).

Kompresörlerin enerji verimliliğini artırmak amacıyla zamanlama stratejileri büyük önem taşır. Kompresörlerin devreye giriş anları, enerji maliyeti ve dolum süresi üzerinde doğrudan etkilidir. Yapılan optimizasyon çalışmaları, bu zamanlamanın uygun şekilde planlanmasıyla istasyonun genel enerji tüketiminin azaltılabileceğini göstermektedir (Kagiri vd., 2017b). Ayrıca kullanım zamanına göre değişen tarife sistemleri (TOU: Time-of-Use) sayesinde maliyetlerin daha da düşürülebileceği belirtilmektedir (Kagiri vd., 2018).

Kompresör performansını etkileyen bir diğer önemli unsur ise sistem içindeki basınç dalgalanmalarıdır. Bu dalgalanmalar, gazın fiziksel özellikleri ve kullanılan termodinamik modelleme yaklaşımına göre değişkenlik göstermektedir. Yapılan karşılaştırmalı analizler, ideal ve gerçek gaz modelleri altında basınç dalgalanmalarının farklı etkiler yarattığını ortaya koymaktadır (Liu vd., 2019). Termodinamik açıdan bakıldığında, bu sistemlerdeki enerji kayıplarının belirlenmesi için ekserji analizleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu analizler, özellikle entropi üretimi üzerinden

değerlendirilerek kompresör içindeki kayıpların yerleri tespit edilmektedir (Niazmand vd., 2017).

Dolum işlemi süresince kompresör çıkış koşullarının optimize edilmesi, hem dolum güvenliği hem de araç tankı verimliliği açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle kademeli depolama sistemlerinde, dolum sırasındaki sıcaklık artışı kontrol edilmelidir (Ramoutar & Riverol, 2017). CNG dolum istasyonlarında sıklıkla tercih edilen pistonlu kompresörlerin enerji verimliliği ise doğrudan sıkıştırma sürecindeki termodinamik kayıplarla ilişkilidir. Bu kayıplar dolum süresini uzatmakta ve sistemin genel verimliliğini düşürebilmektedir (Saadat-Targhi vd., 2016).

2.4. Depolama Sistemleri

CNG dolum istasyonlarında doğal gazın depolanması, sistem performansı ve güvenliği açısından belirleyici bir unsurdur. Depolama tanklarının yerleşimi, kapasitesi ve kullanılan malzemeler, hem dolum verimliliğini hem de emniyet standartlarını doğrudan etkiler. Tankların yerleşimi, çevresel güvenlik mesafeleri ve emniyet donanımlarının konumlandırılması, NFPA 52 gibi uluslararası standartlara uygun olarak tasarlanmakta ve uygulanmaktadır (Conference of Northeast Regional Fire Safety Officials, t.y.).

Depolama sistemleri genellikle çelik veya kompozit malzemeden imal edilmiş, yatay veya dikey eksenli silindirik tanklardan oluşur. Kapasitelerine göre çap ve uzunlukları değişen bu tankların seçimi, kullanım alanı, basınç seviyesi ve yerleşim biçimi gibi faktörlere bağlıdır (Ecotech Enerji, t.y.). Doğal gazın depolama koşullarındaki davranışını anlayabilmek için özgül hacim ve sıkıştırılabilirlik faktörü (Z) gibi termodinamik parametrelerin hassas biçimde hesaplanması gerekmektedir (Farzaneh-Gord ve Rahbari, 2012).

CNG depolama yapılarının performansı, dolum süresi, enerji tüketimi ve operasyonel verimlilik açısından doğrudan etkili olmaktadır. Farklı depolama stratejilerinin karşılaştırmalı analizleri, sistemin toplam performansını optimize etmek için önemlidir (Farzaneh-Gord vd. 2011). Çok hatlı (multi-line) depolama yapılarında, tank grupları

arasındaki hacim oranlarının optimizasyonu, dolum sürelerini azaltmakta ve enerji verimliliğini artırmaktadır (Farzaneh-Gord vd., 2016).

Depolama tanklarının dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü, standartlara uygun testler ve periyodik denetimlerle sağlanmaktadır. Kullanım ömrü sonu testleri, tankların güvenliğinin korunması açısından kritik öneme sahiptir (Lynch, 2021). Özellikle hafif yapılı kompozit malzemeden üretilen Tip-4 tankların güvenli tasarımı, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan yapısal analizler ve deneysel testlerle doğrulanmaktadır (Sharma vd., 2021).

Kompozit tanklar, düşük ısı iletkenliği nedeniyle hızlı dolum sırasında ısıl dengeyi sağlamakta zorluk yaşayabilmekte ve bu durum dolum verimliliğini etkileyebilmektedir (Saferna vd., 2021). Dolum sırasında oluşan sıcaklık artışını sınırlandırmak amacıyla kullanılan soğutma sistemleri, yalnızca dolum verimliliğini değil, aynı zamanda tankların yapısal ömrünü de doğrudan etkilemektedir.

CNG altyapısının biyometan gibi yenilenebilir gazlara geçiş potansiyeli, sistemlerin teknik uyumluluğunu ve esnekliğini ön plana çıkarmaktadır. Avrupa'daki CNG altyapısının büyük bir kısmı biyometanla uyumlu çalışabilir ve bu dönüşüm için ilave teknolojik gereksinimler sınırlıdır (Prussi vd., 2021). Depolama ve dolum sistemlerinin başlangıç koşullarına duyarlılığı ise, özellikle hidrojenle zenginleştirilmiş CNG (HCNG) gibi karışım gazlarda optimum çalışma parametrelerinin belirlenmesini zorunlu kılmaktadır (Sgaramella vd., 2024).

Ayrıca, farklı gaz türlerine göre ayrıştırılmış veya entegre depolama stratejilerinin karşılaştırılması, hibrit yakıt istasyonlarının tasarımında önemli bir yer tutmaktadır (Wang ve Liu, 2021).

CNG depolama sistemleriyle ilgili olarak yangın, patlama ve diğer çoklu tehlike senaryolarının değerlendirilmesi, güvenlik planlarının oluşturulmasında hayati öneme sahiptir. Entegre enerji ikmal istasyonlarındaki potansiyel kaza senaryoları kapsamlı biçimde incelenmiş ve risk azaltma stratejileri geliştirilmiştir (Xu vd., 2024).

Türkiye ve uluslararası arenada CNG depolama sistemlerine ilişkin standartlar sürekli güncellenmekte ve iyileştirilmektedir. Bu standartlar, tank üretiminden kurulum, işletme ve bakım süreçlerine kadar tüm aşamaları kapsamaktadır. Bu nedenle, güncel yönetmeliklere ve standartlara tam uyumun sağlanması, güvenli ve sürdürülebilir işletim açısından kaçınılmazdır.

2.5. Dolum Sürecinde Termodinamik Etkiler

CNG dolum süreci, yalnızca mekanik bir transfer işlemi değil, aynı zamanda çok değişkenli ve geçici bir termodinamik olaylar zinciridir. Bu süreçte gazın basınç, sıcaklık, yoğunluk ve hacim gibi fiziksel özellikleri sürekli değişkenlik göstermektedir. Söz konusu değişkenlerin doğru biçimde modellenebilmesi, güvenilir hal denklemlerinin kullanımını gerektirir ve endüstride yaygın olarak kullanılan modellerden biri olan AGA8-DC92 hal denklemi, bu tür analizlerde tercih edilmektedir (American Gas Association, 1992).

Dolum sırasında özellikle araç tankı ve bağlantı hortumları boyunca gözlenen sıcaklık artışı, sıkıştırılabilirlik etkisi ve geçici basınç dalgalanmaları, dolum verimliliği üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bang vd. (2014), bu etkileri modelleyerek sistem performansını optimize etmek için önerilerde bulunmuştur. Bu tür analizlerde, gazın sıkıştırma sürecinde gösterdiği davranışı tanımlamak amacıyla politropik katsayı gibi parametreler de kullanılmaktadır. Luo vd. (2014), bu katsayının özellikle sıkıştırma sırasında ısı transferi ve basınç artışı gibi değişkenleri anlamada yararlı olduğunu göstermiştir.

Gazın dolum süreci boyunca sıcaklık, hacim ve entalpi gibi özelliklerinin doğru hesaplanabilmesi için termodinamik verilerin basınç ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilmesi gerekir. Bu amaçla kullanılan açık kaynaklı CoolProp kütüphanesi, sistem analizlerinde yaygın bir hesaplama aracı olarak kullanılmaktadır (CoolProp, t.y.). Gerçek gaz davranışının dolum performansı üzerindeki etkileri, özellikle hızlı dolum koşullarında daha belirgin hâle gelmektedir. Deymi-Dashtebayaz vd. (2014), hızlı

dolum sırasında meydana gelen sıkıştırılabilirlik değişimleri, sıcaklık artışları ve yoğunluk farklılıklarını detaylı bir simülasyonla analiz etmişlerdir. Bu sürecin aktarım hattı boyunca nasıl geliştiği, basınç düşüşü ve sıcaklık değişimi gibi parametreler üzerinden Deymi-Dashtebayaz vd. (2012) tarafından incelenmiştir.

Sıkıştırma sürecinde kullanılan gaz modeli, termodinamik çıktıların doğruluğunu belirleyen temel faktörlerden biridir. Farzaneh-Gord vd. (2015a), gerçek ve ideal gaz modelleriyle yapılan analizlerdeki sapmaları ortaya koyarak, model tercihinin sıcaklık artışı ve enerji tüketimi üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Gaz bileşimi de dolum performansını etkileyen bir diğer önemli değişkendir. Farzaneh-Gord vd. (2015b), metan oranı farklılaşan gaz karışımlarıyla yapılan dolumların kompresör çıkış sıcaklığı ve izotermal verim üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur.

Dolum sürecinde tankların basınç seviyelerinin seçimi, termodinamik verimlilik açısından kritik bir parametredir. Farzaneh-Gord vd. (2012), farklı basınç düzeylerinin dolum süresi ve enerji kullanımı üzerindeki etkilerini optimize etmiş; aynı yazarlar ideal gaz varsayımıyla yaptıkları başka bir çalışmada, bu modelin sınırlarını ve performansa etkisini tartışmışlardır (Farzaneh-Gord ve Deymi-Dashtebayaz, 2013). Gaz karışım bileşenlerinin dolum performansı üzerindeki etkileri ise Farzaneh-Gord vd. (2014) tarafından buffer tipi depolama sistemi özelinde detaylı biçimde ele alınmıştır.

Termodinamik analizlerde kullanılan gaz bileşimi verisinin doğruluğu büyük önem taşır. George (2014), CNG örnekleme tekniklerini ve bu alanda karşılaşılan uygulama sorunlarını irdeleyerek analiz hatalarının kaynağını ortaya koymuştur. Araç tankında gerçekleşen hızlı dolum işlemleri sırasında sıcaklık, basınç ve yoğunluk değişimlerini kapsamlı olarak modelleyen Khamforoush vd. (2014), bu değişkenlerin zamanla nasıl evrildiğini incelemiştir. Bu çalışmaların öncüllerinden olan Kountz (1994), hızlı dolum esnasında meydana gelen ısınma ve sıkışma etkilerini tanımlayan ilk kapsamlı analizlerden birini sunmuştur.

Hızlı dolum süreçlerinin kontrol edilebilmesi için dolum algoritmaları da geliştirilmektedir. Liss vd. (2005), hidrojen sistemleri için geliştirdikleri algoritmalarla

bu süreci yönetmeyi amaçlamış ve sıcaklık artışının güvenli sınırlar içinde tutulmasını sağlamışlardır. Gerçek gaz modellerinin termodinamik doğruluğu, dolum sürecinde sistem performansını artırma potansiyeli taşımaktadır. Liu vd. (2019), CNG kompresör sistemlerinde gerçek ve ideal gaz modelleri arasında anlamlı farklar gözlemlemişlerdir.

Sıkıştırma sürecine ilişkin enerji kayıplarının detaylı şekilde analiz edilmesi, sistemin genel verimliliğini belirlemede önemli bir adımdır. Niazmand vd. (2017), gerçek gaz yaklaşımıyla yapılan analizlerde entropi üretiminin ve ekserji kayıplarının daha doğru hesaplandığını ortaya koymuştur. Ramoutar ve Riverol (2017), dolum sürecinde soğutulmuş gaz kullanılarak sıcaklık artışının sınırlandırılabileceğini ve bunun dolum verimliliğini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir.

Sıkıştırma nedeniyle artan gaz sıcaklığı, özgül hacmi artırarak dolum kütlesini sınırlayabilmektedir. Bu etki, Saadat-Targhi vd. (2016) tarafından termodinamik bağlamda değerlendirilmiştir. Silindir malzemesi ve yapısı da termal davranış üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Saferna vd. (2021), Type IV kompozit silindirlerin geleneksel çelik tüplere kıyasla dolum sırasında daha belirgin sıcaklık değişimleri sergilediğini bildirmiştir. Başlangıç koşulları da süreci etkilemektedir. Sgaramella vd. (2024), silindirin başlangıç basıncı ve sıcaklığının HCNG dolum süreçlerinde önemli farklar yarattığını göstermiştir.

Bu süreçlerin deneysel olarak gözlemlenmesi, sistemlerin doğru modellenmesi açısından vazgeçilmezdir. Shipley (2002), hızlı dolum sırasında araç silindirinde meydana gelen termodinamik değişimleri deneysel verilerle ortaya koymuş; Striednig vd. (2014) ise ideal ve gerçek gaz modellerinin yüksek basınçlı dolum koşullarındaki farklılıklarını analiz etmiştir. Gazın tanklara transferi sırasında oluşan basınç kayıpları ve ısı geçişleri de dolum verimliliğini etkileyen unsurlar arasında yer almaktadır. Tsuchiya vd. (1996), bu etkileri araç yakıt hattı özelinde ayrıntılı şekilde değerlendirmiştir. Zhang vd. (2017), hızlı dolum sırasında oluşan aşırı sıcaklık artışını önlemeye yönelik aktif ısı giderimi yöntemlerini geliştirerek bu alanda yeni bir yaklaşım önermiştir.

2.6. Simülasyon ve Modelleme

CNG dolum istasyonlarının performans analizinde, gerçek zamanlı süreçlerin modellenmesi, sistem bileşenlerinin dinamik tepkilerini ve dolum koşullarının etkilerini değerlendirme açısından temel bir yöntemdir. Bu modellemelerde ilk olarak kullanılan gaz özelliklerinin doğruluğu büyük önem taşımaktadır. Termodinamik özelliklerin hassas hesaplanması, genellikle AGA8-DC92 gibi endüstri standardı hal denklemleriyle sağlanmaktadır (American Gas Association, 1992). Bununla birlikte, açık kaynaklı termofiziksel veri kütüphaneleri de giderek daha fazla tercih edilmektedir. Özellikle CoolProp kütüphanesi, gaz karışımlarının sıcaklık ve basınca bağlı özelliklerini hesaplamada yaygın biçimde kullanılmaktadır (CoolProp, t.y.).

Dolum sürecine dair ilk modelleme çalışmaları arasında, hızlı dolum sırasında araç silindirindeki geçici sıcaklık ve basınç değişimlerine odaklanan Kountz (1994) çalışması dikkat çekmektedir. Bu doğrultuda, Bang vd. (2014), konut tipi dolum sistemine ait detaylı bir dinamik model geliştirerek sıcaklık, basınç ve kütlesel akış değişimlerini analiz etmişlerdir. Gerçek gaz davranışını da dikkate alan bu çalışmalar, ideal gaz varsayımının sınırlarını göstermesi açısından önemlidir. Nitekim Striednig vd. (2014) ve Tsuchiya vd. (1996) gibi araştırmalar, tank dolumu sırasında meydana gelen hızlı sıcaklık artışlarının yalnızca gerçek gaz denklemleriyle doğru şekilde modellenebileceğini ortaya koymuştur.

Simülasyon çalışmaları sadece sistem içi akış ve ısı transferi değil, aynı zamanda kontrol yapıları ile de ilişkilidir. Örneğin, Evstifeev ve Zaeva (2018), kompresör kontrol algoritmalarının model doğruluğu üzerindeki etkisini vurgulamış; Han vd. (2014) ise dispenser sistemlerinin elektronik kontrol modüllerini simülasyon ortamına entegre etmeye yönelik bir yaklaşım sunmuştur. Bu bağlamda, dolum algoritmalarının simülasyon ortamında geliştirilmesi ve geçerliliklerinin test edilmesi çalışmaları da önemli yer tutmaktadır (Liss vd., 2005).

Zamana bağlı modelleme örnekleri, özellikle hızlı dolum süreçlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Deymi-Dashtebayaz vd. (2014), araç tankındaki sıcaklık, basınç ve

yoğunluk değişimlerini zamana bağlı biçimde incelemiş; Khamforoush vd. (2014) ise benzer şekilde matematiksel modelleme, termodinamik analiz ve optimizasyonu bir arada sunmuştur. Zhang vd. (2017), dolum sırasındaki sıcaklık artışlarını aktif ısı giderimi ile sınırlamaya yönelik entegre bir simülasyon modeli geliştirmiştir.

Modelleme doğruluğunu etkileyen bir diğer önemli unsur, sistemde kullanılan doğal gazın özelliklerinin uygun şekilde temsil edilmesidir. George (2014) ve Mayeaux (t.y.) çalışmalarında vurgulandığı üzere, gaz örnekleme teknikleri ve numunenin kalitesi simülasyon sonuçlarının doğruluğunda belirleyici rol oynamaktadır. Bu noktada, Farzaneh-Gord ve Rahbari (2012) tarafından sunulan yüksek hassasiyetli hesaplama yöntemleri, simülasyonlarda sıkça başvurulan tekniklerden biri olmuştur.

Güncel modelleme yaklaşımları, yalnızca dolum sürecini değil, aynı zamanda enerji yönetimi ve talep yanıt programlarını da kapsamaktadır. Kagiri vd. (2018), TOU (time of use) tarifelerine karşı enerji tüketimini optimize eden bir kontrol modeli sunarken; Kagiri vd. (2019), çok katmanlı bir kontrol algoritmasıyla istasyon verimliliğini artırmaya yönelik hiyerarşik bir model geliştirmiştir. Benzer şekilde Liang vd. (2021), kritik pik fiyatlandırmasını içeren ekonomik planlama modellerine odaklanmıştır. Giderek daha fazla önem kazanan yapay zekâ uygulamaları bağlamında, Seyfi vd. (2022), derin öğrenmeye dayalı bir simülasyon modeliyle hibrit CNG-elektrikli araç sistemlerinin enerji programlamasını optimize etmiştir.

Bu çalışmalar bir araya getirildiğinde, CNG dolum sistemlerinin simülasyon ve modelleme süreçlerinin yalnızca fiziksel koşulları değil; aynı zamanda kontrol stratejilerini, enerji optimizasyonunu ve dışsal piyasa etkilerini kapsayan bütünsel bir yapıya dönüştüğü görülmektedir.

2.7. Çok Amaçlı Optimizasyon

Sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) dolum sistemlerinin performans değerlendirmesinde, yalnızca teknik verimlilik değil, aynı zamanda enerji tüketimi, ekonomik maliyetler ve operasyonel uygunluk gibi farklı hedeflerin birlikte optimize edilmesi gerekmektedir.

Bu tür problemlerin çözümünde çok amaçlı optimizasyon yöntemleri yaygın biçimde kullanılmaktadır. Çok kriterli karar verme yaklaşımlarından biri olan Gri İlişki Analizi (GRA), sınırlı veri setleriyle sistem parametreleri arasındaki ilişki derecelerini belirlemeyi sağlayarak karar destek mekanizmalarında etkin bir araç sunar. Bu yöntem, Deng tarafından geliştirilen gri sistem teorisine dayanmaktadır (Deng, 1989).

CNG dolum sistemlerinde enerji tüketiminin azaltılması, sistem tasarımı ve işletme süreçlerinin optimizasyonunu zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda Kagiri vd. (2017a), tarifeye dayalı yük yönetimi yaklaşımıyla enerji maliyetlerini düşürmeyi hedefleyen çok amaçlı bir model sunmuştur. Aynı araştırma grubu, daha sonraki çalışmalarında kompresör ve ekipmanların çalışma saatlerini optimize ederek enerji verimliliğini artırmaya yönelik uygulamalar geliştirmiştir (Kagiri vd., 2017b). Kagiri vd. (2019) tarafından önerilen hiyerarşik yapıya sahip bir diğer modelde ise yalnızca enerji maliyetleri değil, aynı zamanda dolum verimliliği de optimize edilerek sistemin bütüncül performansı artırılmıştır.

CNG sistemlerine dair çok amaçlı optimizasyon uygulamaları yalnızca enerjiyle sınırlı değildir; operasyonel maliyetlerin azaltılması ve ekipman kullanım ömrünün uzatılması da bu tür modellerin hedefleri arasında yer alabilir. Bu bağlamda yerli bir çalışma olan Çetiner (2019), endüstriyel dökme CNG dolum tesislerinde maliyet esaslı optimizasyon teknikleri kullanarak örnek bir uygulama sunmuştur.

Bu yöntemlerin mühendislik tasarımı süreçlerine entegrasyonu da oldukça yaygındır. Kılıç vd. (2023), elektrikli araç batarya sistemleri için geliştirilen bir soğutma plakasının tasarımında Taguchi yöntemi ile GRA yöntemini birlikte kullanarak çoklu performans kriterlerini optimize etmişlerdir. Benzer şekilde Küçük ve Kılıç (2023), Organik Rankine Çevrimi (ORC) için eksergoekonomik analiz ve çok amaçlı optimizasyon uygulamaları gerçekleştirmiştir. Bu tür çalışmalar, farklı mühendislik disiplinlerinde çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin başarısını göstermektedir.

Yakıt altyapısının enerji sistemlerine entegrasyonu ve yeni araç tiplerinin yaygınlaşması da optimizasyon ihtiyacını artırmaktadır. Seyfi vd. (2022), plug-in hibrit CNG-elektrikli

araçlarla çalışan sanal enerji merkezleri için geliştirdikleri derin öğrenme tabanlı simülasyon modelleriyle bu sistemlerde çok amaçlı planlama yapmanın mümkün olduğunu ortaya koymuşlardır.

Çok amaçlı optimizasyonun yalnızca teknik ve ekonomik değil, aynı zamanda çevresel ve planlama kriterlerini de içermesi gerektiği literatürde sıkça vurgulanmaktadır. North Carolina Solar Center (2014) tarafından hazırlanan rehberde, CNG istasyonu kurulum sürecinde çok kriterli değerlendirme yaklaşımının benimsenmesi gerektiği ifade edilmiştir. Bu yaklaşım, sistemlerin yalnızca enerji verimliliği açısından değil, aynı zamanda yer seçimi, altyapı planlaması ve çevresel etki gibi yönlerden de optimize edilmesini mümkün kılmaktadır.

Son olarak, CNG'nin taşıtlarda yaygın olarak tercih edilmesine neden olan teknik avantajlar, örneğin yüksek oktan sayısı, düşük yakıt maliyeti, iyileştirilmiş motor performansı ve bakım ihtiyacının azalması, bu yakıt türüne yönelik çok amaçlı optimizasyon çalışmalarının artmasında etkili olmuştur (Khan vd., 2015). Bu avantajlar, sistem tasarımında yalnızca maliyet ve enerji açısından değil, kullanıcı konforu ve sistem ömrü gibi faktörlerin de dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

2.8. Literatür İncelemesi

CNG teknolojilerine ilişkin literatürdeki çalışmalar, genellikle güvenlik riskleri, çevresel katkılar, sistem performansı, kontrol stratejileri ve optimizasyon uygulamaları çerçevesinde sınıflandırılabilir. Bu başlıklar altında farklı yaklaşımlar sunan araştırmalar, hem mühendislik hem de politika geliştirme süreçlerine katkı sağlamaktadır.

CNG sistemlerinin güvenliği üzerine yapılan çalışmalar, özellikle yüksek basınç altında çalışan bileşenlerin risk analizine odaklanmaktadır. Berghmans ve Vanierschot (2014), CNG'li araçlardaki potansiyel tehlikeleri; tank yapıları, patlama senaryoları ve gaz sızıntılarına dair ayrıntılı bir değerlendirme ile ele almışlardır. Benzer şekilde, Sharma vd. (2021), Type-4 CNG depolama tanklarının güvenli tasarımı için sonlu elemanlar

analizine dayalı bir metodoloji sunmuş ve deneysel verilerle bu modeli doğrulamıştır. Gelişmekte olan ülkelerdeki riskler bağlamında ise Ali vd. (2024), mevcut altyapının tehlike azaltma kapasitesinin yetersiz olduğunu belirtmiş ve özellikle yetersiz denetim mekanizmalarına vurgu yapmıştır. Bu değerlendirmeler, sistem tasarımı kadar mevzuat ve denetim yapılarının da önemini göstermektedir.

CNG teknolojisinin çevresel etkileri ise bir diğer önemli inceleme alanıdır. Milojević vd. (2012), doğal gazın şehir içi taşımacılıkta çevreci ve güvenli bir seçenek olduğunu savunurken, SGS Environmental Testing Corp. (2015) tarafından yürütülen saha testleri yakıt bileşiminin emisyonlar üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Türkiye örneği özelinde, Yalçın ve Akcan (2015), CNG kullanımının sera gazı salınımını azalttığını belirtmiş; Ankara Büyükşehir Belediyesi'ne ait EGO filosunun dönüşüm süreci de bu kapsamda başarılı bir örnek olarak değerlendirilmiştir (EGO Genel Müdürlüğü, t.y.). Bhutani vd. (2025) ise elektrifikasyon süreçlerini incelerken, CNG'nin hâlen geçiş yakıtı olarak önemini koruduğuna dikkat çekmiştir. Carbone vd. (2025) tarafından yapılan çalışmada ise CNG sistemleri; dizel ve elektrikli sistemlerle ekonomik ve çevresel yönlerden karşılaştırılmış ve rekabetçi bir alternatif olduğu ortaya konmuştur.

CNG sistemlerinin mühendislik tasarımına ilişkin çalışmalarda özellikle dolum süreci ve depolama yapıları üzerine odaklanılmaktadır. Shipley (2002), hızlı dolum sırasında meydana gelen dinamik değişimleri deneysel ve kuramsal olarak incelemiştir. Southwest Research Institute (2014) ise kullanılan yakıtın bölgesel farklılıklarını analiz ederek motor performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Farzaneh-Gord ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalar, bu alanda önemli katkılar sunmaktadır. Örneğin, Farzaneh-Gord vd. (2011), farklı depolama türlerinin performansa etkisini incelerken; devam eden araştırmalarında (2012, 2013) rezervuar basıncının optimizasyonu ve ideal gaz varsayımının etkileri değerlendirilmiştir. Çok hatlı sistemlere yönelik olarak gerçekleştirilen Farzaneh-Gord vd. (2016) çalışması ise yüksek, orta ve düşük basınçlı tanklar arasındaki hacim oranlarının performans üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Bu çalışmalar, sistem tasarımında termodinamik analizlerin merkezi rolünü vurgulamaktadır.

Alternatif sistemlerin geliştirilmesine yönelik olarak Fan vd. (2017), hidrojen karışımlı doğal gaz (HCNG) sistemlerinin çevresel performansını saf CNG ile karşılaştırarak motor verimliliği üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Bu yaklaşım, gelecekte hibrit yakıt sistemlerinin CNG sistemleriyle nasıl entegre edilebileceğine dair ipuçları sunmaktadır. Öte yandan, Chu vd. (2025) tarafından geliştirilen güneş destekli hidrojen dolum sistemi modeli, yaşam döngüsü maliyeti temelinde değerlendirilmiş ve alternatif dolum teknolojilerinin ekonomik fizibilitesine ışık tutmuştur.

CNG sistemlerine ilişkin kontrol stratejileri ve kullanıcı deneyimi de son yıllarda önem kazanmıştır. Munahar vd. (2024), kontrol sisteminin titreşim karakteristikleri üzerinden konfor endeksini değerlendirerek, kullanıcı memnuniyetini artırmaya yönelik mühendislik stratejileri önermiştir. Sistem bileşenlerinin performansına ilişkin üretici verileri de sahadaki uygulamalar için önem taşımaktadır. GOA Natural Gas Pvt. Ltd. (2023) tarafından yayımlanan teknik doküman, 450 SCMH kapasiteli booster tipi kompresörlerin performans değerlerine ilişkin ayrıntılı bilgiler sunmaktadır.

Ekonomik analiz ve zamanlama odaklı araştırmalarda ise CNG sistemlerinin işletim maliyetleri ve enerji tüketimi ön plandadır. Liang vd. (2021), elektrik fiyatlandırma yapısına göre istasyonların çalıştırılmasını optimize eden bir zamanlama modeli geliştirmiştir. Benzer şekilde, Kagiri vd. (2017a), enerji maliyeti temelli yönetim modelleri sunarak sistemlerin ekonomik performansının iyileştirilebileceğini göstermiştir.

Son olarak, optimizasyon yöntemlerinin sistem analizlerine entegrasyonu giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle Taguchi ve GRA (Grey Relational Analysis) gibi çok amaçlı optimizasyon teknikleri, CNG dışındaki mühendislik sistemlerinde de başarıyla kullanılmaktadır. Küçük ve Kılıç (2023), ORC sistemlerinin enerji ve ekonomi temelli değerlendirmesinde bu yöntemleri uygularken; Kılıç vd. (2023), elektrikli araçlar için geliştirilen batarya soğutma sisteminin tasarımında aynı yöntemle çoklu performans kriterlerini optimize etmişlerdir. Bu çalışmalar, CNG sistemlerinin gelecekteki optimizasyon uygulamalarına da örnek teşkil etmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

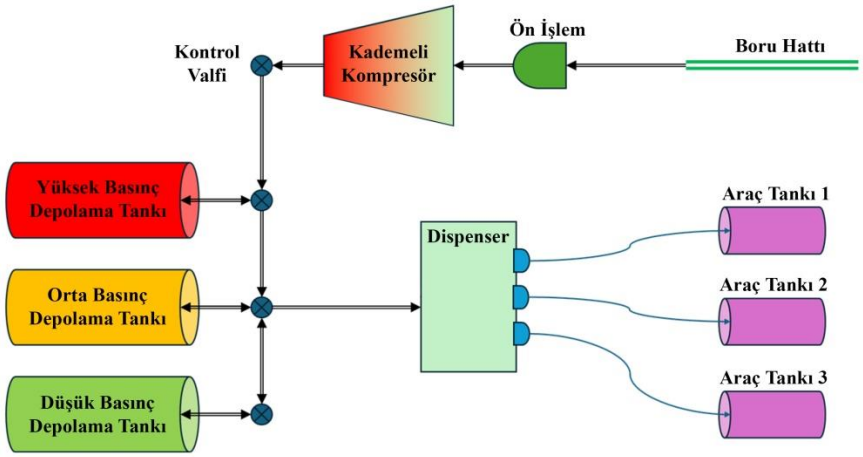
Bu bölümde, bir CNG (Sıkıştırılmış Doğal Gaz) dolum istasyonunun fiziksel ve sayısal modelleme süreci ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Model, MATLAB ve Simulink ortamında, Simscape fiziksel modelleme kütüphaneleri kullanılarak oluşturulmuştur. Sistemin boru hattı girişi, çok kademeli kompresör yapısı, kaskad depolama grubu, dispenser ünitesi ve araç tankları gibi tüm alt sistemleri fiziksel bağlantılarla temsil edilmiştir. Gerçek gaz davranışını yansıtmak amacıyla açık kaynaklı CoolProp kütüphanesi modele entegre edilmiştir. Bu kapsamda, sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişen termodinamik özellikler PropsSI fonksiyonu ile hesaplanmıştır. Ayrıca, dolum sürecinde gerçekleşen mantıksal geçişlerin modellenebilmesi için Stateflow kullanılarak davranışsal kontrol mantığı geliştirilmiştir. Elde edilen simülasyon verileri, sistemin performansını değerlendirmek ve belirli parametreleri optimize edebilmek amacıyla kullanılmıştır. Bu amaçla, çok seviyeli basınç ve hacim oranlarının etkileri Taguchi deney tasarımı yöntemi ile analiz edilmiş ve Gri İlişki Analizi yöntemi uygulanarak çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde sırasıyla modelin genel yapısı, kompresör ve dolum sistemlerinin özellikleri, termodinamik hesaplamalar, simülasyon senaryoları ve optimizasyon yaklaşımı açıklanmaktadır.

3.1. CNG İstasyonu Dinamik Modeli

Modelleme sürecinin ilk aşamasında, istasyonun fiziksel yapısı ve sayısal temsil biçimi oluşturulmuştur. Bu kapsamda sistemin tüm bileşenleri, fiziksel domain esasına dayalı olarak Simscape ortamında modellenmiştir. Ardından, dolum sürecinin adımlar halinde ilerleyebilmesi ve basınç geçişlerine göre yönlendirilebilmesi amacıyla Stateflow tabanlı mantıksal bir kontrol sistemi geliştirilmiştir. Bu alt bölümde öncelikle modelin fiziksel ve sayısal yapısı açıklanmakta, ardından dolum işlemini yöneten davranışsal kontrol mantığı sunulmaktadır.

3.1.1. Fiziksel ve sayısal model yapısı

Bu çalışmada geliştirilen CNG dolum istasyonu modeli, fiziksel süreçlerin zamana bağlı olarak izlenebildiği ve bileşenler arasında gerçekçi etkileşimlerin kurulabildiği bir yapı sunmaktadır. Model, MATLAB ortamında Simulink ve Simscape kütüphaneleri kullanılarak oluşturulmuştur. Simscape, farklı fiziksel alanları aynı model içerisinde temsil etmeye olanak tanımakta ve fiziksel bağlantı noktaları üzerinden enerji, kütle ve momentum aktarımı sağlamaktadır. Bu doğrultuda sistemin modellemesinde Simscape Gas domain birincil olarak kullanılmış, buna ek olarak ısı geçişlerinin temsil edilmesi amacıyla Thermal domain, mekanik hareketlerin aktarılması için Mechanical domain, soğutma devresinin tanımlanması için Thermal Liquid domain ve çevresel hava etkileşimlerinin modellenmesi için Moist Air domain kullanılmıştır. Moist Air domain, soğutucuların çevre ile ısı alışverişini simüle eden bir ortam olarak modellenmiştir.



Şekil 3.1. CNG dolum istasyonunun fiziksel bileşen yapısı ve gaz akış yönü

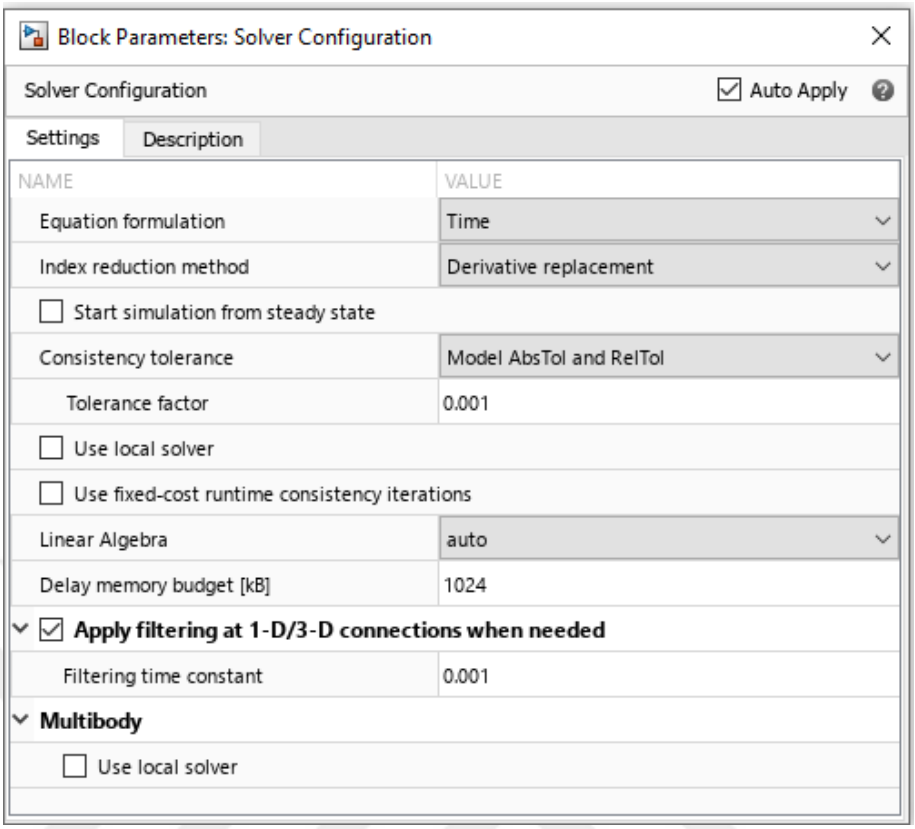
Modelin genel yapısında, doğal gazın boru hattı girişinden sonra üç kademeli pistonlu bir kompresör aracılığıyla sıkıştırılması, her bir kompresör kademesinden sonra ayrı bir ısı eşanjörü ile soğutulması ve ardından kaskad yapıda düzenlenmiş olan yüksek, orta ve düşük basınçlı depolama gruplarında tutulması süreçleri yer almaktadır. Depolardan dispenser ünitesine geçiş, mantıksal kontrol ile yönlendirilmekte ve gaz bu üniteden araç tanklarına iletilmektedir. Modeldeki tüm fiziksel bileşenler Simscape blokları kullanılarak modellenmiş ve aralarındaki bağlantılar port tabanlı olarak tanımlanmıştır.

Böylece sistem sadece sinyal akışına değil, fiziksel büyüklüklerin dinamik etkilerine dayalı olarak yapılandırılmıştır. Modelin fiziksel bileşen yapısını ve gaz akış yönünü gösteren şematik düzenleme Şekil 3.1'de sunulmuştur. Bu şekil, yazarın aynı konuda yayımladığı çalışmadan alınarak uyarlanmıştır (Özcan ve Kılıç, 2025). Modelin Simulink ortamındaki genel blok yerleşimi ise Şekil 3.2'de verilmiştir.



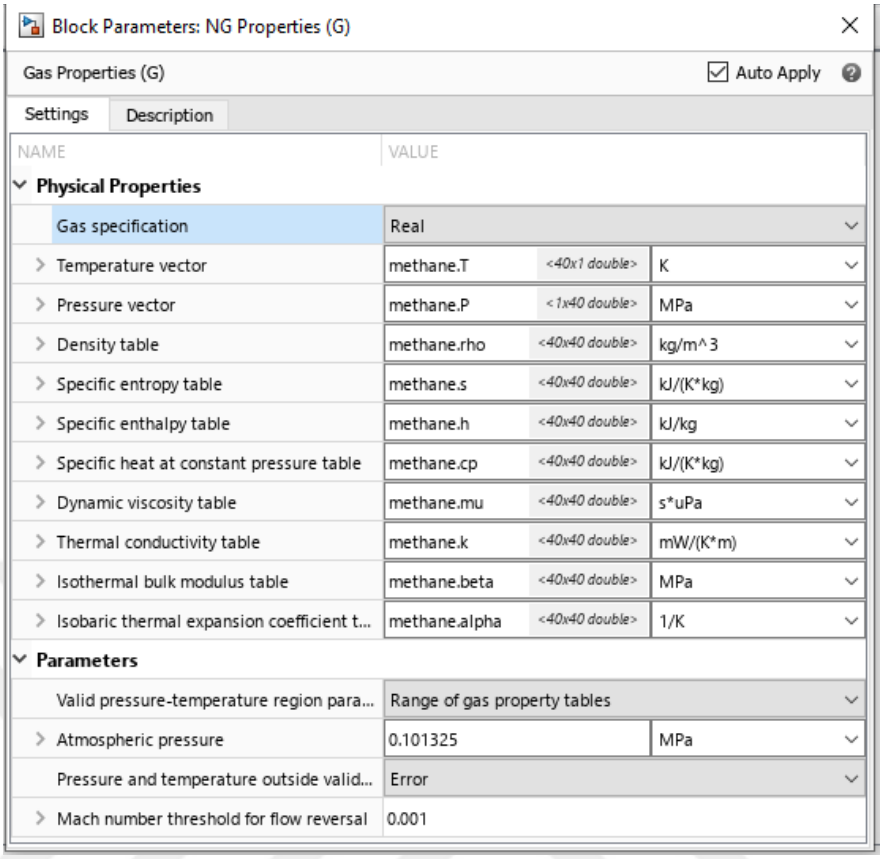
Şekil 3.2. Simscape tabanlı CNG istasyonu modelinin üst seviye blok diyagramı

Modelin sayısal çözüm yapısı, Simscape ortamında diferansiyel denklem sistemlerinin çözümüne dayanmaktadır. Bu çözümleme, fiziksel domainler için modele entegre edilen Solver Configuration bloğu aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu blok, modelin zamana bağlı çözümleme davranışını belirleyen temel parametreleri içerir. Simulink çözümleyicisinin belirlediği genel ayarlar doğrultusunda, denklemlerin zamana dayalı biçimde çözümlenmesi ve simülasyonun fiziksel süreklilik ilkelerine uygun olarak ilerlemesi sağlanmaktadır. Solver Configuration bloğuna ait parametre yapısı Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.3. Simscape Solver Configuration bloğu için tanımlanmış çözüm parametreleri

Modelde kullanılan gazın fiziksel özelliklerini temsil etmek amacıyla Simscape Gas domain içerisinde yer alan Gas Properties (G) bloğu kullanılmıştır. Bu blok, sistem içerisindeki sıcaklık ve basınca bağlı olarak doğal gazın özgül gaz sabiti, sıkıştırılabilirlik katsayısı, yoğunluğu, entalpisi, özgül ısısı, dinamik viskozitesi ve ısı iletkenliği gibi özelliklerini modelin diğer bileşenlerine iletmektedir. Bu çalışmada Real gaz modeli kullanılmış ve doğal gaz karışımı için oluşturulan sıcaklık ve basınç vektörleri ile birlikte yoğunluk, entalpi, özgül ısı ve diğer termodinamik özellikleri içeren veri tabloları bu bloğa entegre edilmiştir. Bu veriler, CoolProp kütüphanesi yardımıyla önceden oluşturulmuş ve MATLAB ortamı üzerinden modele aktarılmıştır. Böylece gazın özellikleri her simülasyon adımında güncellenmiş ve dolum sürecindeki ani değişimlerin etkileri hassas şekilde temsil edilmiştir. Gas Properties bloğuna ait parametre yapısı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Gas properties bloğunda gerçek gaz modeli için kullanılan parametre tanımları

3.1.2. Mantıksal kontrol ve dolum karar mekanizması

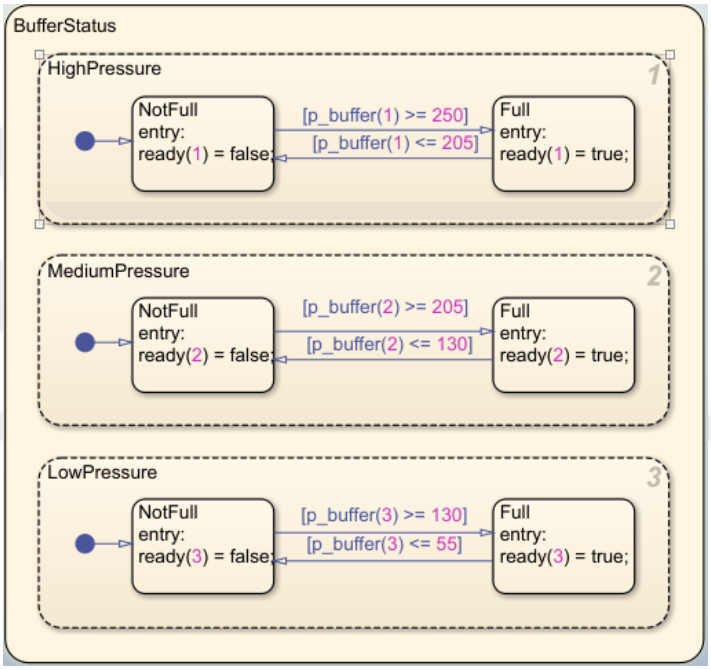
Simulink ortamında geliştirilen fiziksel modele entegre olarak, gaz akışının hangi depodan hangi sırayla yapılacağını belirleyen bir mantıksal kontrol sistemi oluşturulmuştur. Bu sistem, Stateflow arayüzü kullanılarak davranış temelli bir yapıda modellenmiştir. Kontrol mantığı üç temel bloktan oluşmaktadır: BufferStatus, ChargeBuffer ve ChargeVehicles. Bu yapı sayesinde model yalnızca fiziksel bağlantılara değil, aynı zamanda mantıksal karar süreçlerine de bağlı olarak çalışmaktadır.

BufferStatus alt sistemi, her bir depolama grubunun doluluk durumuna göre bir "hazır" (ready) sinyali üretmektedir. Bu blokta, yüksek, orta ve düşük basınçlı depolar için ayrı ayrı Stateflow alt durumları tanımlanmıştır. Depo basıncı belirli bir değerin altına düştüğünde dolum için hazır kabul edilmekte ve ilgili ready(i) sinyali true olarak

belirlenmektedir. Örneğin, yüksek basınçlı depo için bu durum aşağıdaki eşik değerlerine göre kontrol edilmektedir:

$$\text{ready(1)}=\begin{cases} true, & P_{buffer}(1) \leq 205 \\ false, & P_{buffer}(1) \geq 250 \end{cases} \tag{3.1}$$

Benzer eşik değerleri orta ve düşük basınçlı depolar için de tanımlanmıştır. BufferStatus bloğuna ait durum diyagramı Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



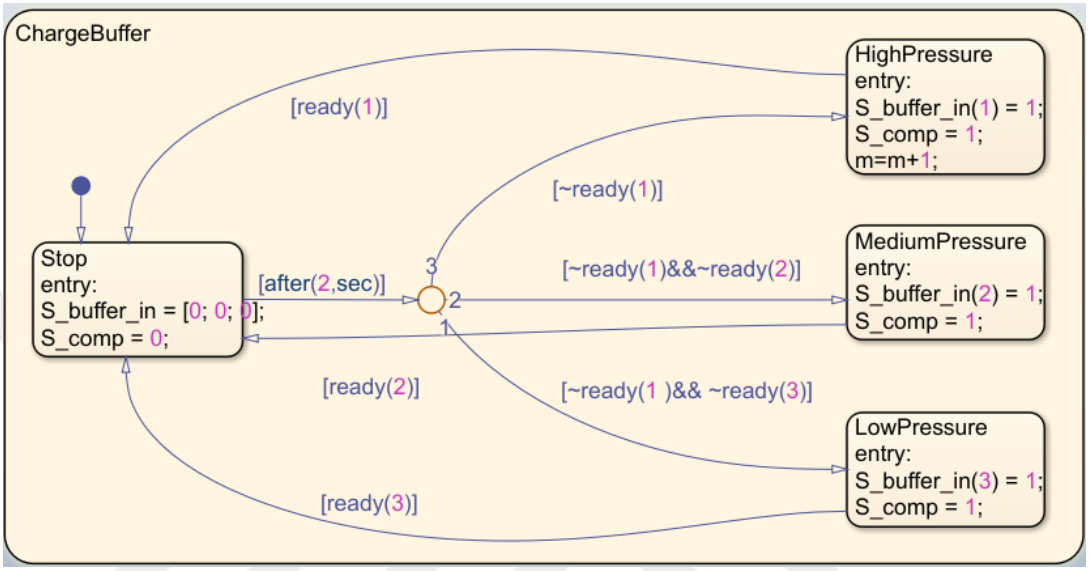
Şekil 3.5. BufferStatus bloğunda üç basınç seviyesine göre doluluk kontrol mantığı

ChargeBuffer bloğu, ilgili depoların dolum sırasını belirleyen karar mantığını içermektedir. Sistemin başlangıcında Stop durumunda beklenmekte ve her 2 saniyede bir basınç durumu kontrol edilerek dolum sırası yeniden güncellenmektedir. Eğer yüksek basınçlı depo hazır değilse ancak orta depo hazırsa, kontrol sırası otomatik olarak ikinci seviyeye geçmekte, aksi durumda üçüncü seviyeye aktarılmaktadır. Bu durumlar, mantıksal geçiş koşullarıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

Geçiş: Stop → HighPressure eğer ready(1) = false

Geçiş: Stop → MediumPressure eğer ~ready(1) && ~ready(2)

ChargeBuffer blok yapısı Şekil 3.6'da verilmiştir.

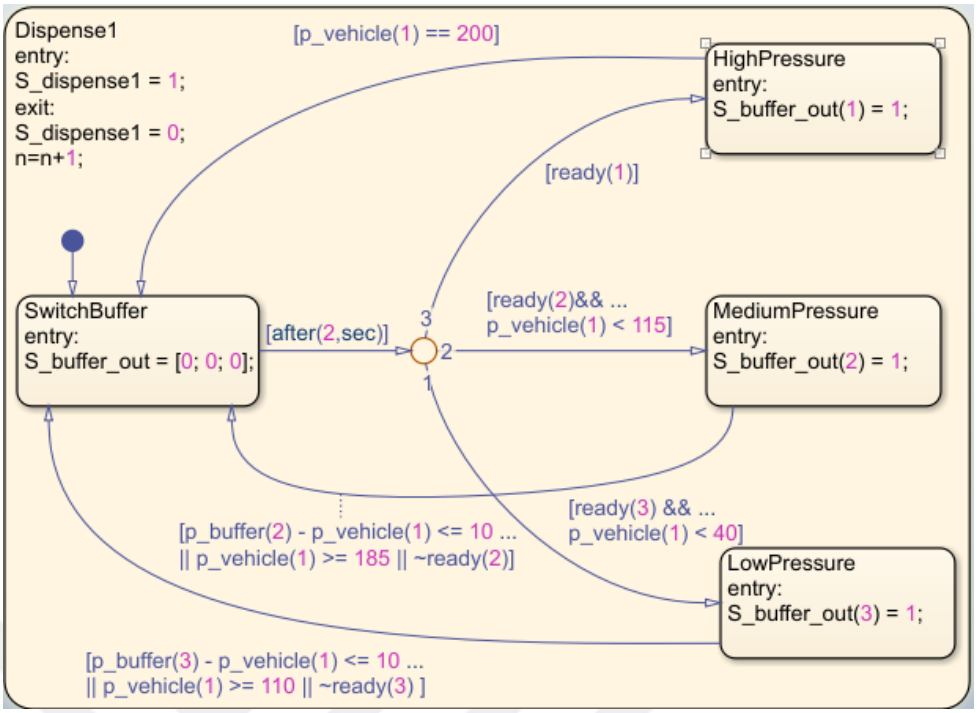


Şekil 3.6. ChargeBuffer bloğunda dolum sırasını belirleyen karar yapısı

ChargeVehicles bloğu, araç tanklarının dolum sürecini yöneten ana yapıdır. Ancak bu yapı oldukça geniş olduğu için yalnızca ilk araca ait olan Dispense1 alt bloğu örnek olarak sunulmuştur. Bu blokta, dolum sırasında aktif olan basınç seviyesi ve araç tank basıncına bağlı olarak gaz akışı farklı depolardan yönlendirilir. Geçiş koşullarında, depo basıncı ile araç basıncı arasındaki fark, ve araç tankındaki mevcut basınç seviyesi değerlendirilerek uygun valf açılır. Örneğin yüksek basınçlı dolum için temel geçiş koşulu şu şekilde tanımlanmıştır:

$P_{buffer}(2) - P_{vehicle}(1) \leq 10$ veya $P_{vehicle}(1) \geq 185$

Ayrıca, dolum tamamlandığında n sayacı bir artırılarak yeni dolum çevrimine geçilir. Dispense1 blok yapısı Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

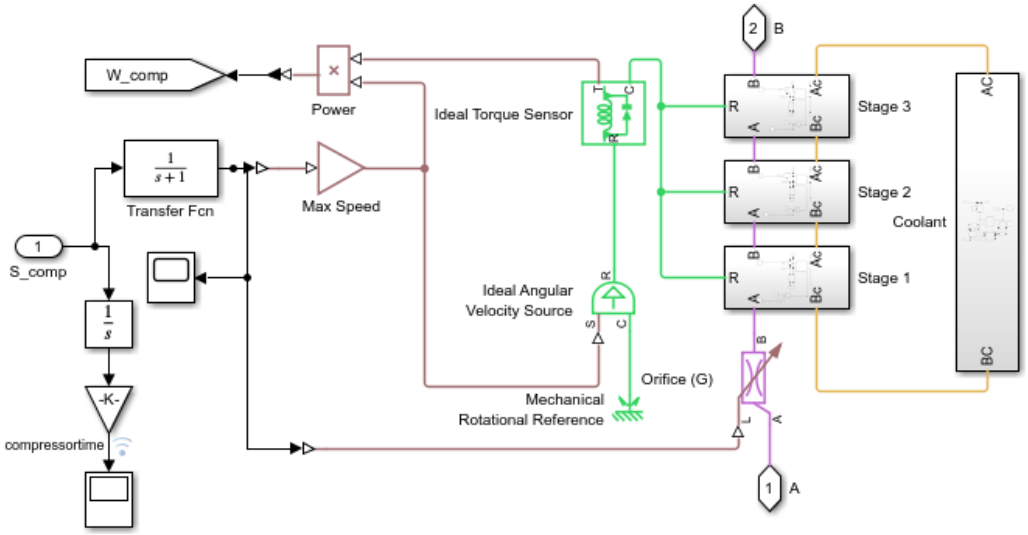


Şekil 3.7. Dispense1 alt sisteminde Stateflow tabanlı araç tankı dolum kontrolü

Bu mantıksal yapı sayesinde sistem, hem fiziksel sınır koşullarına uygun biçimde çalışmakta hem de dolum sırasını akıllı biçimde yönetmektedir. Her bir durum geçişi, fiziksel modelle doğrudan bağlantılı parametreleri kullanmakta ve zamana bağlı kontrol tepkileri üretmektedir.

3.2. Kompresör Sistemi Modeli

Bu bölümde, dolum istasyonunun üç kademeli kompresör sistemi ayrıntılı biçimde tanımlanmıştır. Kompresör sistemi, gaz akışının yönlendirilmesi ve sıkıştırılması kadar, her kademe sonrasında uygulanan soğutma süreci ile birlikte ele alınmaktadır. Şekil 3.8'de modelin Simscape ortamında oluşturulan genel blok yapısı verilmiş olup, kompresörün tüm bileşenleri bir bütün halinde gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Üç kademeli kompresör sisteminin Simscape ortamında modellenmiş genel yapısı

Modelin giriş noktasında, kompresörün devreye girmesini ve çalışmasını kontrol eden bir sinyal üreteci (S_comp) yer almaktadır. Bu sinyal, belirli bir gecikmeden sonra kompresörü çalıştırmakta ve sistemde tanımlı sabit açısal hızla dönmesini sağlamaktadır. Açısal hız, Simscape Foundation kütüphanesi altında bulunan Ideal Angular Velocity Source bloğu aracılığıyla mekanik mile iletilmekte, dönme momenti ise yine aynı kütüphanedeki Torque Sensor bloğu yardımıyla gerçek zamanlı olarak ölçülmektedir. Bu bloklar, sistemin fiziksel doğruluğunu sağlamak ve enerji aktarımını takip etmek amacıyla tercih edilmiştir. Böylece kompresöre iletilen mekanik güç, aşağıdaki ifade ile zamana bağlı olarak hesaplanmaktadır:

$$W_{\{comp\}}(t) = T(t) \cdot \omega(t) \tag{3.1}$$

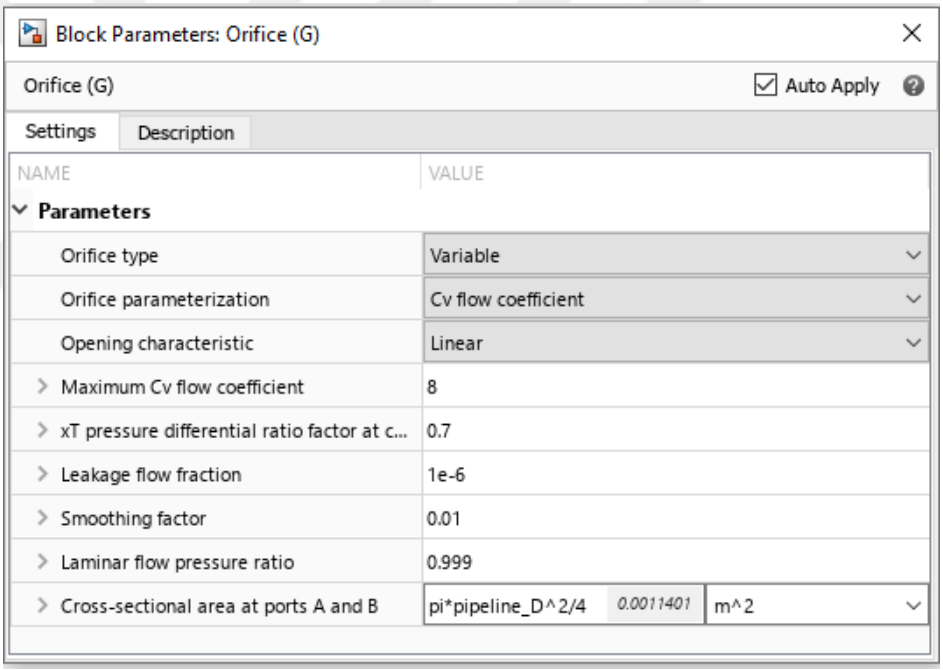
Burada $T(t)$ tork (N·m) ve $\omega(t)$ açısal hız (rad/s) olmak üzere, kompresör miline uygulanan anlık gücü tanımlar.

Sistemde, kompresör girişine uygulanan kontrol sinyalinin fiziksel sistem üzerinde oluşturduğu etkilerin dinamik doğası da modellenmiştir. Bu amaçla, sinyal yolu üzerine birinci dereceden gecikme yapısına sahip bir transfer fonksiyonu entegre edilmiştir. Bu fonksiyonun matematiksel karşılığı aşağıda verilmiştir:

$$G(s) = \frac{1}{s+1} \tag{3.2}$$

Bu yapı, sistem yanıtında zamana bağlı bir gecikme etkisi oluşturarak kompresörün ani sinyal değişimlerine karşı daha kararlı ve geçişli tepkiler vermesini sağlamaktadır.

Gaz akışı açısından bakıldığında, giriş hattında bir adet Orifice (G) bloğu kullanılmıştır. Bu blok, giriş ve çıkış noktaları arasındaki basınç farkına bağlı olarak kütlesel debi oluşturan fiziksel bir bileşen olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.9'da Simscape ortamında kullanılan Orifice (G) bloğuna ait parametre ayarları görülmektedir.



Şekil 3.9. Simscape Orifice (G) bloğuna ait parametre ayarları

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{\{2\,\rho(p_{up} - p_{down})\}} \tag{3.3}$$

Burada C_d boşluk katsayısı, A açıklık alanı, ρ yoğunluk, p_{up}ve p_{down} ise sırasıyla yukarı ve aşağı akış yönündeki basınçlardır.

Kompresör bloğunun merkezinde yer alan üç kademeli sıkıştırma yapısı, Simscape Gas domain bileşenleri kullanılarak modellenmiştir. Giriş noktasından itibaren sırasıyla 1., 2. ve 3. kademelerden geçen gaz, her aşamada hacmi azaltılarak sıkıştırılmakta ve böylece basıncı artırılmaktadır. Her sıkıştırma kademesinin çıkışında, sıcaklığı düşürmek amacıyla birer ısı eşanjörü konumlandırılmıştır. Bu ara soğutucular sayesinde, sonraki kademeye aktarılan gazın sıcaklığı düşürülerek sıkıştırma verimi artırılmaktadır. Bu eşanjörlerde dolaşan soğutucu sıvının çevre ile ısı alışverişi yaparak yeniden soğutulması işlemi ise, Coolant bloğu ile temsil edilmektedir.

3.2.1. Kompresör kademeleri

Modelin ilk sıkıştırma aşaması olan Kademe 1, Şekil 3.10'da sunulan yapı üzerinden detaylandırılmıştır. Bu yapı, gazın sisteme girişinden itibaren birinci kademe boyunca sıkıştırılması, sıcaklık ve basınç ölçümleriyle izlenmesi ve ilk ara soğutucuya yönlendirilmesi süreçlerini kapsamaktadır.

Gaz, A noktasından sisteme girerek Kademe 1 bloğuna ulaşmaktadır. Bu blok, Simscape Gas domain ortamında yer alan Positive-Displacement Compressor (G) bileşeniyle modellenmiştir. Kompresör, mekanik dönme hareketi ile çalışmakta ve gazı hacimsel olarak sıkıştırarak A1 portundan çıkış yapmaktadır. Tahrik hareketi, R portu üzerinden uygulanmakta ve C portu zemine referanslanmaktadır.

Kompresör bloğu, gerçek gaz davranışına uygun şekilde polytropik sıkıştırma modeli ile çalışmaktadır. Bu süreç, aşağıdaki denklemlerle tanımlanabilir:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n \tag{3.4}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \tag{3.5}$$

Burada n polytropik katsayı, V_1 ve V_2 ise sıkıştırma öncesi ve sonrası hacimlerdir. Ayrıca kompresör için tanımlanan volümetrik verim (η_v), aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\eta_v = \frac{V_{gerçek}}{V_{teorik}} \tag{3.6}$$

Mekanik tahrik sisteminden mile iletilen güç, daha önce açıklandığı üzere tork (τ) ve sabit açısal hız (ω) çarpımıyla hesaplanmaktadır.

Kompresör çıkış hattında yer alan iki adet sensör yardımıyla gazın anlık basınç ve sıcaklık değerleri izlenmektedir. Kademe 1 Pressure sensörü, gazın birinci kademedeki çıkış basıncını; Stage 1 T sensörü ise ara soğutucuya giren ve çıkan gaz arasındaki sıcaklık farkını ölçmektedir. Bu değerler, sistemin termodinamik davranışını izlemek ve eşanjör etkinliğini analiz etmek için kaydedilmektedir.

Sıkıştırılan gaz, B1 portu üzerinden ilerleyerek Intercooler 1 bloğuna girmektedir. Bu blok, gaz tarafında yer alan ısı eşanjörünü temsil etmektedir. Burada, gazın şıkıştırma sonucu artan sıcaklığı, soğutucu sıvı ile temas ederek azaltılmakta ve gaz, B2 portundan çıkış yapmaktadır. Eşanjör, Simscape çevresinde Heat Exchanger (G-TL) bloğu ile modellenmiştir.

Gaz tarafındaki ısı transferi, aşağıdaki enerji dengesine dayalı olarak tanımlanır:

$$\dot{Q}_{gaz} = \dot{m} c_p \left(T_{giriş} - T_{çıkış}\right) \tag{3.7}$$

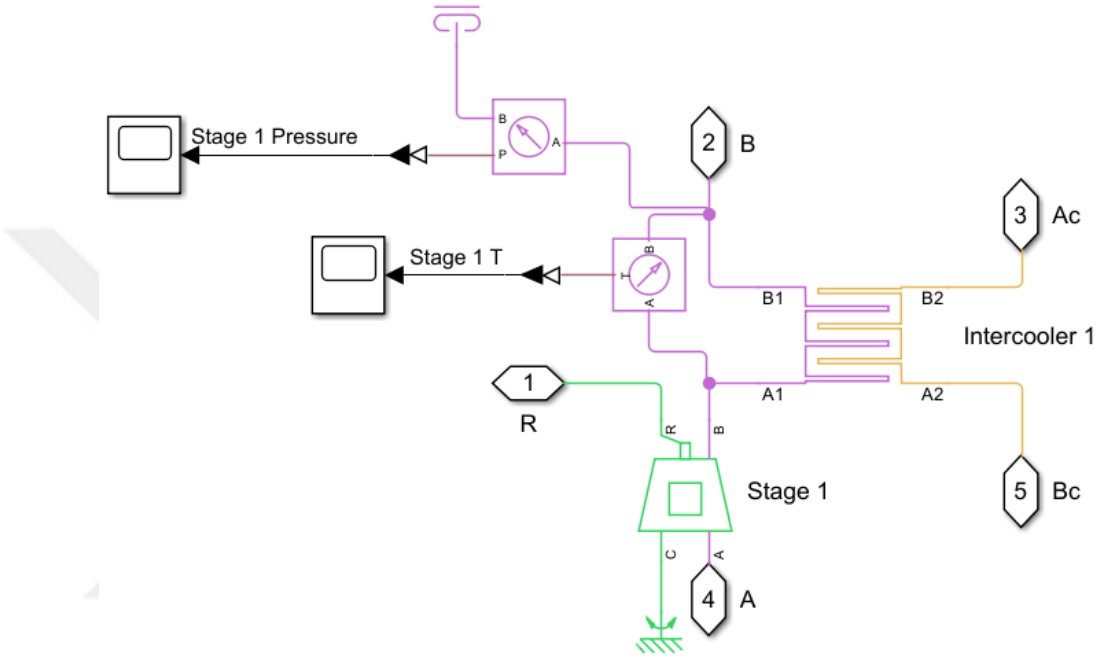
Eşanjör üzerinden iletilen toplam ısı miktarı ise logaritmik ortalama sıcaklık farkı yöntemine dayalı olarak hesaplanmaktadır:

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{LM} \tag{3.8}$$

Burada *UA* eşanjörün toplam ısı geçiş kapasitesini, ΔT_{LM} ise gaz ile sıvı fazlar arasındaki logaritmik ortalama sıcaklık farkını temsil etmektedir. Bu yapı sayesinde, sıkıştırma işlemi sırasında sıcaklığı artan gaz, bir sonraki kademeye daha uygun sıcaklık seviyesiyle aktarılabilmektedir.

Aynı yapı, Stage 2 ve Stage 3 kademelerinde de benzer biçimde uygulanmıştır. Ancak her bir kademede tanımlanan volümetrik hacim, gazın artan basınç seviyesiyle orantılı

olarak azalmaktadır. Stage 1 için bu değer 1856.6 cm³/rev iken, Stage 2'de 861.8 cm³/rev, Stage 3'te ise 400 cm³/rev olarak belirlenmiştir. Ayrıca her kademede gaz giriş-çıkış alanları, sistemin debi ve basınç oranlarına uyumlu olacak şekilde yeniden tanımlanmıştır. Bu farklılaştırma sayesinde, her kademede optimum sıkıştırma verimi sağlanmakta ve sistemin genel mekanik yükü dengelenmektedir.



Şekil 3.10. Stage 1 bloğu, çıkış sensörleri ve Intercooler 1 bağlantılarıyla birlikte birinci kompresör kademesinin genel yapısı

3.2.2. Soğutma sistemi ve soğutucu bloğu

Modelde yer alan üç kademeli kompresör sisteminde, sıkıştırma işlemi sonucunda doğal gazın sıcaklığı her aşamada önemli ölçüde artmaktadır. Bu sıcaklık artışını kontrol altına almak ve sonraki kademelerin verimini artırmak amacıyla, her kompresör çıkışına birer ısı eşanjörü (Heat Exchanger (G–TL)) yerleştirilmiştir. Bu eşanjörler, gaz tarafındaki sıcak akış ile sıvı tarafındaki soğutucu akışkan arasında ısı transferi sağlayacak şekilde modellenmiştir.

Sistemdeki tüm eşanjörler, tek bir kapalı çevrimli sıvı soğutma devresine bağlanmıştır. Soğutucu sıvı, pompa yardımıyla önce birinci kompresör kademesindeki eşanjöre, ardından sırasıyla ikinci ve üçüncü kademedeki eşanjörlere yönlendirilmekte ve bu

bölgelerde sıcak gazla ısı alışverişi yapmaktadır. Eşanjörlerden geçen sıvı her kademede belirli miktarda ısı almakta ve sıcaklığı kademeli olarak artmaktadır.

Bu çalışmada soğutucu akışkan olarak saf su kullanılmıştır. Isı transferi aşağıdaki enerji denklemi ile hesaplanmıştır:

$$Q = \dot{m}_{TL} c_{p,TL} \left(T_{çıkış} - T_{giriş} \right) \tag{3.9}$$

Sistemde kullanılan pompa, Simscape Thermal Liquid domain altındaki Fixed-Displacement Pump (TL) bloğudur. Bu blok, 200 cm^3/rev deplasmana sahip olup 1000 rpm şaft hızıyla çalışmaktadır. Volumetrik verimi %92, mekanik verimi ise %88 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerle pompanın yaklaşık hacimsel debisi 0.0033 m^3/s olarak hesaplanmıştır. Pompanın enerji tüketimi, aşağıdaki denklem yardımıyla analiz edilmiştir:

$$P_{pompa} = \frac{\dot{m}\, \Delta p}{\rho\, \eta} \tag{3.10}$$

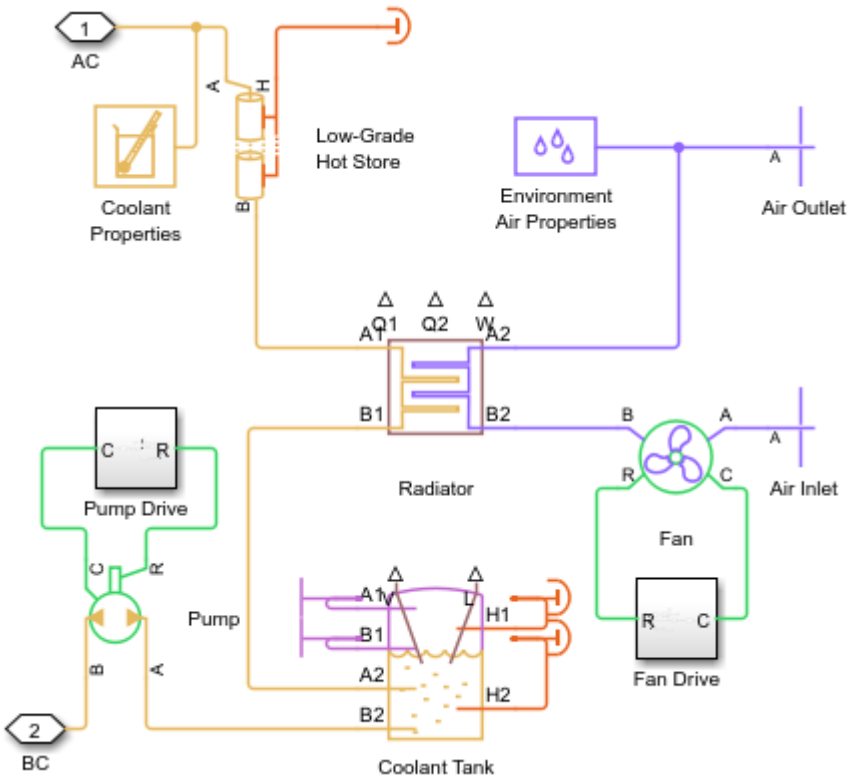
Burada Δp, pompa çıkış-giriş basınç farkını; ρ, sıvı yoğunluğunu; η, mekanik verimi ifade etmektedir.

Eşanjörlerden çıkan sıcak su, doğrudan bir radyatöre (Radiator) yönlendirilmekte ve burada çevre havası ile soğutulmaktadır. Radyatör üzerindeki ısı transferi, Simscape'te tanımlı bir Fan (MA) bloğu ile desteklenmektedir. Fan, 1000 rpm şaft hızında çalışmakta; bu hızda yaklaşık 1 m^3/s hava debisi ve 200 Pa statik basınç farkı oluşturmaktadır. Fanın mekanik gücü 500 W olarak belirlenmiştir. Radyatörde gerçekleşen hava-sıvı ısı transferi aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır:

$$Q = hA(T_{sıvı} - T_{hava}) \tag{3.11}$$

Burada h, taşınımla ısı transferi katsayısını; A, yüzey alanını; $T_{sıvı}$, sıvının sıcaklığını ve T_{hava}, ortam hava sıcaklığını göstermektedir. Bu çalışmada ortam sıcaklığı sabit olarak 20 °C kabul edilmiştir.

Radyatörden geçen ve sıcaklığı düşen su, bir Coolant Tank içinde toplanmakta, ardından pompa vasıtasıyla tekrar sisteme gönderilerek çevrim tamamlanmaktadır. Bu çevrim yapısına ait model düzenlemesi Şekil 3.11'de verilmiştir.



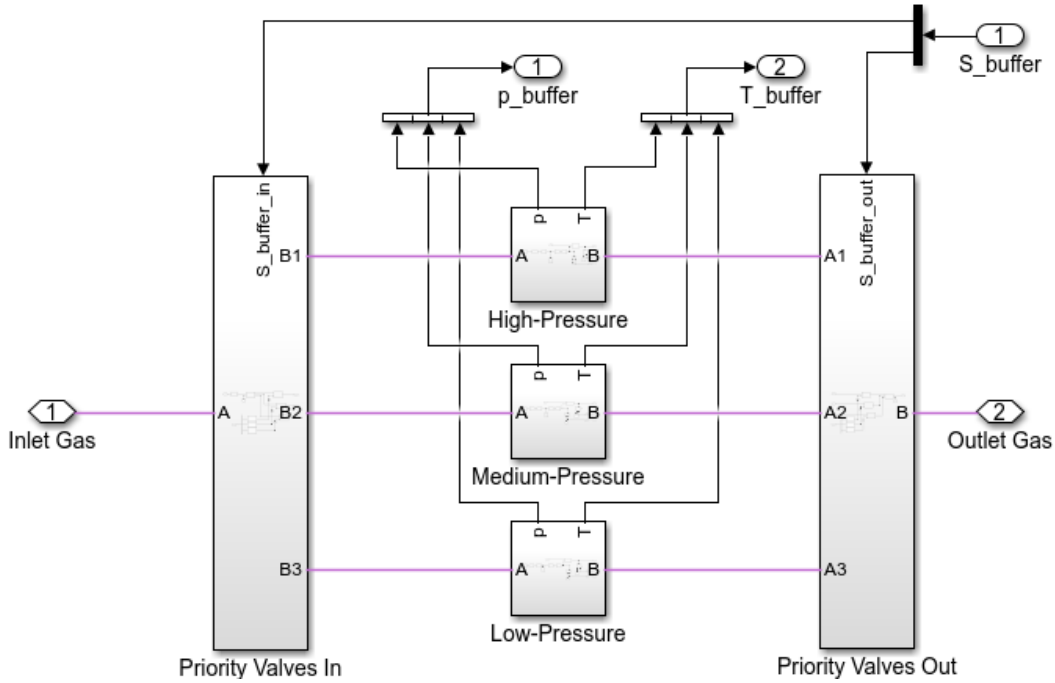
Şekil 3.11. Kompresör kademelerine seri bağlı üç eşanjör üzerinden geçen kapalı çevrimli soğutma sisteminin Simulink ortamındaki modeli.

3.3. Depolama ve Dolum Sistemi Modeli

CNG dolum istasyonunun temel işlevlerinden biri, sıkıştırılmış gazın uygun koşullarda depolanması ve talep anında araçlara güvenli şekilde iletilmesidir. Bu bağlamda, kompresör çıkışından sonra doğal gaz, üç farklı basınç seviyesinde düzenlenmiş depolama tanklarına yönlendirilmekte; ardından dağıtım birimi aracılığıyla araç tanklarına dolum işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu bölümde, depolama yapısı, öncelik vanası ve dolum sürecini yöneten dağıtım ünitesi detaylı şekilde açıklanacaktır.

3.3.1. Üç basınç seviyeli depolama tankları

Sistemde sıkıştırılan doğal gaz, dolum işlemi öncesinde üç farklı basınç seviyesinde depolanmak üzere düşük, orta ve yüksek basınçlı tanklara yönlendirilir. Bu yapı, hem kompresör performansını dengelemek hem de araç dolum işlemi sırasında basınca göre akış yönlendirmesi yapabilmek amacıyla tercih edilmiştir.

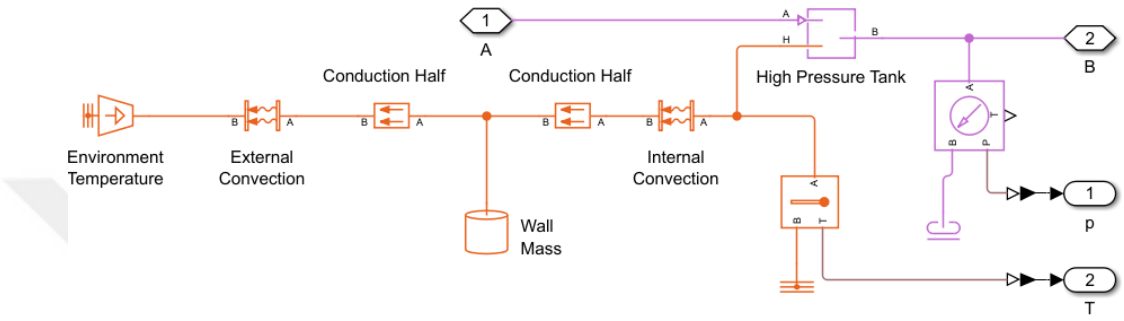


Şekil 3.12. Simulink ortamında modellenmiş üç seviyeli (yüksek, orta, düşük) basınçlı doğal gaz depolama sistemi

Modelde her bir depolama grubu, Simscape Gas domain altında yer alan Constant Volume Chamber (G) bloğu ile temsil edilmiştir. Bu bloklar, giriş ve çıkış portlarına sahip sabit hacimli birer kapalı kap gibi davranmakta ve içerdikleri gazın basınç ve sıcaklığını takip edebilmektedir. Modelde düşük basınçlı (Low-Pressure) tank grubu, ilk dolan depolama bölgesini temsil ederken; ardından orta basınçlı (Medium-Pressure) ve yüksek basınçlı (High-Pressure) tanklar sırasıyla dolmakta ve her biri farklı seviyelerde gaz basıncına sahip olmaktadır.

Şekil 3.12'de görüldüğü üzere, her bir tank grubu ayrı hatlar ile Priority Valve In ve Priority Valve Out bloklarına bağlanmıştır. Bu bağlantılar, gazın önce düşük basınçlı,

ardından orta ve son olarak yüksek basınçlı depolara dolmasını sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır. Dolum sırasında da bu sıralama devam etmekte; yani araç dolum sürecinde önce düşük basınçlı tank grubunun çıkışı aktif hale getirilmiş, ardından sırasıyla orta ve yüksek basınçlı tanklardan gaz akışı sağlanmıştır. Bu sistem, akış sırasını yöneten mantıksal yapı ile birlikte çalışmakta ve araç basıncına göre ilgili depo hattı aktif hale gelmektedir.



Şekil 3.13. Yüksek basınçlı tank için ısı geçişi ve sıcaklık modellemesi

Depolama tanklarındaki sıcaklık değişimleri yalnızca gazın sıkıştırılmasından kaynaklı olarak değil, aynı zamanda tank duvarının ısı kapasitesi ve çevresel şartlarla olan etkileşim yoluyla da belirlenmektedir. Bu nedenle modelde, tank içindeki gaz ile duvar arasında ısı alışverişi ve duvardan dış ortama ısı kaybı ayrı ayrı modellenmiştir. Tank duvarlarının termal etkileri Wall Mass, Internal Convection ve External Convection blokları ile temsil edilmiştir. Tank duvarının zamanla sıcaklık değişimini ifade eden enerji dengesi, daha önce sunulan genel ısı geçişi denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Tank duvarının ısı kapasitesi, yoğunluğu ve ısı iletim katsayısı gibi parametreler aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.1. Depolama ve araç tanklarında ısı transferine ilişkin parametreler

Özellik	Değer
Tank Yapı Malzemesi (Type I)	34CrMo4
Tek Depo Tank Hacmi	150 liter
Araç Tank Hacmi	70 liter
Boş Depo Tankı Kütlesi	125 kg
Boş Araç Tankı Kütlesi	75 kg
Depo Tankı Dış Çapı	370 mm
Depo Tankı İç Çapı	350 mm
Depo Tank Yüksekliği	1.8 m
Araç Tankı Yüksekliği	0.9 m
Tank Özgül Isısı	561 J/kgK
Tank Isıl İletkenliği	50 W/mK
İç Isı Transfer Katsayısı	300 W/m^2K
Dış Isı Transfer Katsayısı	10 W/m^2K
Toplam Depo Tankı Sayısı	48
Ortam Sıcaklığı	20^0 C

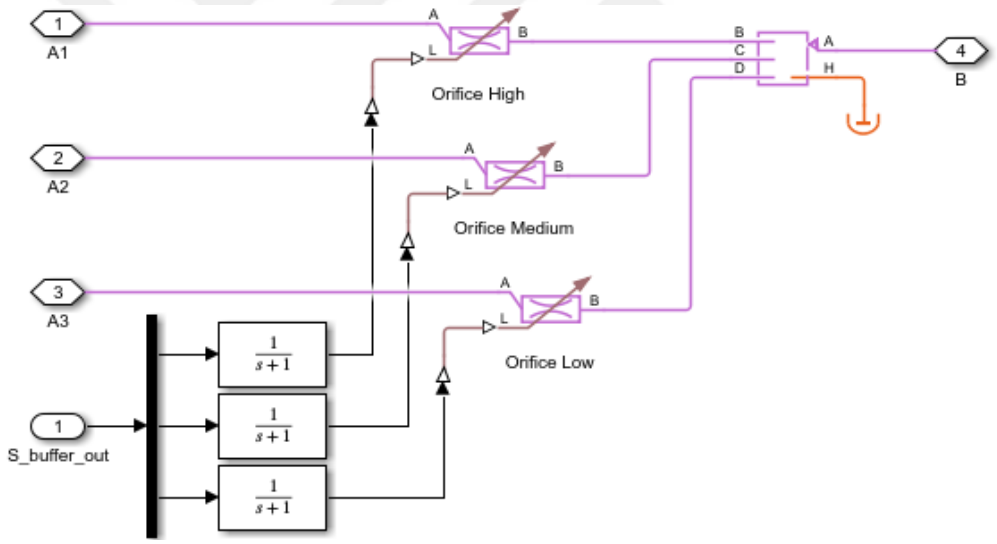
3.3.2. Öncelik vanası (priority valve)

Araç tanklarının dolum işlemi sırasında, doğal gaz akışı depolama tank grupları arasındaki basınç farkına ve kontrol sinyallerine bağlı olarak yönlendirilmektedir. Bu işlemi yöneten öncelik vanası (priority valve) sistemi, gazı sırayla düşük, orta ve yüksek basınçlı depolardan sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yapı sayesinde sistemdeki toplam enerji kapasitesi dengeli bir biçimde kullanılmakta ve basınca bağlı dolum sırasının kontrolü sağlanmaktadır.

Modelde bu yapı, Simscape Gas domain bileşenleriyle kurulan Priority Valve In ve Priority Valve Out alt sistemleriyle temsil edilmektedir. Her biri, üç farklı hat için Orifice (G) bloklarından ve bu bloklara bağlı kontrol sinyalleriyle açılıp kapanan mantıksal geçiş elemanlarından oluşmaktadır.

Priority Valve Out yapısı, araç dolum süreci sırasında aktif hale gelir. Bu blokta, düşük, orta ve yüksek basınç seviyeleri için ayrı hatlar tanımlanmıştır. Dolum başladığında önce düşük basınçlı tank grubu devreye girer, bu grup boşaldığında kontrol sinyali yardımıyla orta basınçlı hatta geçilir ve son olarak yüksek basınçlı tanklar aktif hale getirilir. Bu geçişler, s_buffer_out sinyaliyle yönetilmektedir. Şekil 3.14'te bu yapının blok diyagramı gösterilmektedir.

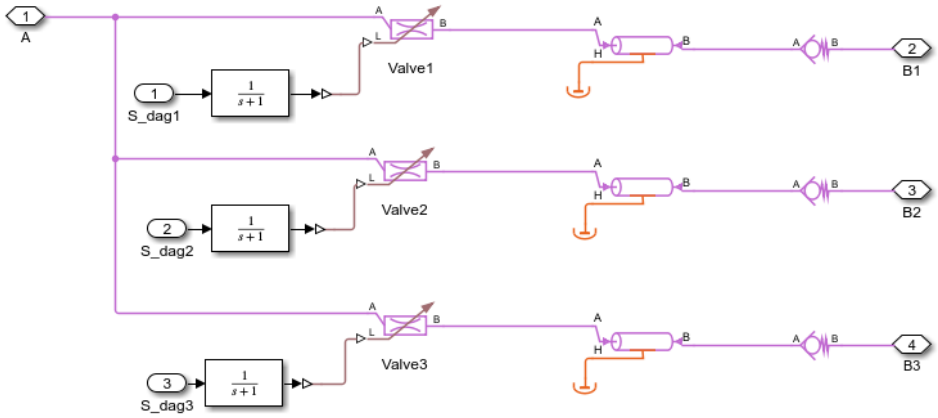
Bu fiziksel sistemin davranışı, 3.1.2 numaralı bölümde detayları sunulan Stateflow tabanlı karar mekanizması ile senkronize çalışmaktadır. Bu sayede yalnızca fiziksel bağlantılar değil, aynı zamanda tank basınç farkları ve araç dolum durumu gibi mantıksal koşullar da dikkate alınmakta; gaz akışı gerçek sistemlerde olduğu gibi basamaklı şekilde yönlendirilmektedir.



Şekil 3.14. Priority Valve Out alt sisteminde araç dolum sırası kontrolü

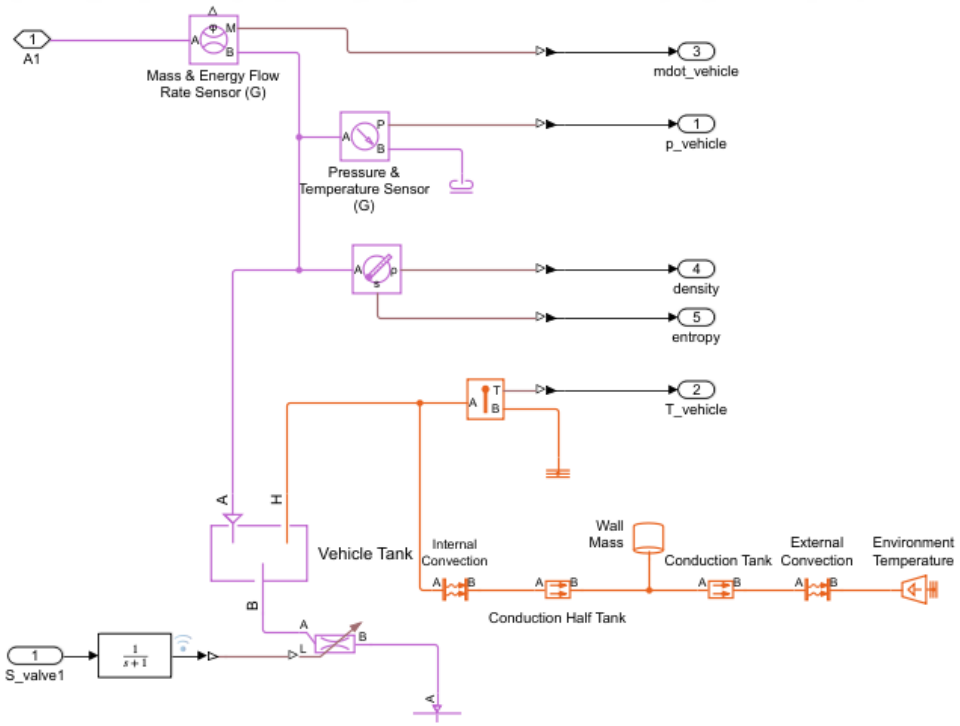
3.3.3. Dağıtım ünitesi ve araç tankı

Doğal gazın depolama tanklarından alınarak araçlara aktarılması işlemi, Simulink ortamında oluşturulan dağıtım birimi ve araç deposu alt sistemleriyle modellenmiştir. Dağıtım birimi, farklı basınç seviyelerinden gelen gaz hatlarını sırayla kontrol eden açma-kapama vanaları, bu vanaların açılmasını sağlayan denetim sinyalleri ve her hatta yerleştirilmiş akış kısıcı ağızlar (orifis) ile yapılandırılmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Dağıtım biriminde basınca bağlı çalışan vana ve akış denetim yapısı

Üç ayrı gaz hattı, sırasıyla S_dag1, S_dag2 ve S_dag3 isimli kontrol sinyalleriyle açılan vanalara bağlanmıştır. Bu sinyaller, sistemin genel mantık denetimini yürüten Stateflow yapısından (durum geçişlerine dayalı kontrol modülü) gelmektedir. Her bir hatta yer alan gaz akışı, ilgili vana açıldığında başlamakta ve akış, orifis yardımıyla belirli bir sınırda tutulmaktadır. Bu yapı, dolum sırasında gazın kontrollü ve güvenli şekilde araç deposuna aktarılmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.16. Araç deposu, sıcaklık ve basınç algılayıcıları ile ısıl davranış modeli

Araç deposu, hacmi sabit bir basınçlı kap olarak modellenmiştir. Depo hacmi 70 litre olarak tanımlanmış ve içine dolan gazın durumu farklı algılayıcılar ile sürekli olarak ölçülmüştür. Bu algılayıcılar sayesinde araç deposunun basıncı, sıcaklığı, yoğunluğu, özgül entropisi ve birim zamanda geçen gaz kütlesi (kütlesel debi) anlık olarak izlenmektedir. Algılayıcılardan elde edilen veriler, modelin diğer bölümlerine aktarılmakta ve dolum kararlarının verilmesinde kullanılmaktadır.

Araç deposunun dış gövdesi de ısıl özellikleri ile birlikte modele dâhil edilmiştir. Depo duvarı, içindeki sıcak gaz ile iç yüzey taşınım (internal convection) yoluyla ısı alışverişi yapmakta; duvarın kendisi ısı kapasitesine sahip bir kütle olarak tanımlanmakta ve bu kütle, dış ortamla olan ısı alışverişini ise dış taşınım yoluyla gerçekleştirmektedir. Dış ortam sıcaklığı sabit kabul edilmiş ve bu yapı sayesinde dolum sırasında sıcaklık değişimleri gerçekçi biçimde izlenebilmiştir (Şekil 3.16).

Dolum süreci boyunca hangi vananın açık olacağına sistemin mantık denetimi karar vermektedir. Araç deposunun iç basıncı ile depo grubunun basıncı karşılaştırılmakta, belirli bir basınç farkı eşiğinin altına düşüldüğünde mevcut hat kapatılıp bir sonraki basınç seviyesine geçilmektedir. Dolum tamamlandığında, sistemde tanımlı bir sayacın değeri bir artmakta ve sıradaki araca geçilmektedir. Böylece çoklu araç dolumu ardışık biçimde simüle edilebilmektedir.

3.4. Termodinamik Özelliklerin Hesaplanması

CNG dolum istasyonu modellemesinde doğal gazın termofiziksel özelliklerinin doğru hesaplanması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişen gaz özellikleri için CoolProp kütüphanesi kullanılmış ve her simülasyon adımında güncellenen gerçek gaz verileri esas alınmıştır. Hesaplamalar, Python–MATLAB entegrasyonu üzerinden CoolProp'un PropsSI fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

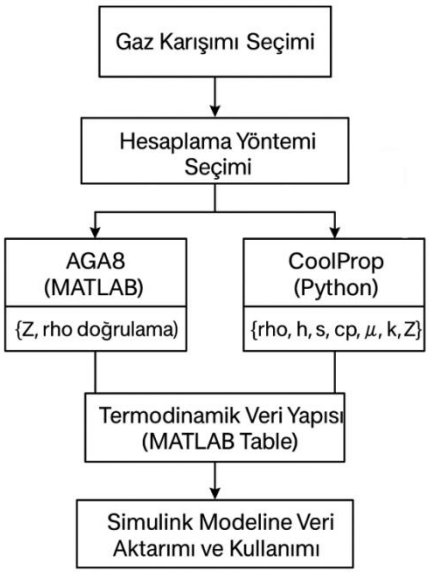
Girdi parametreleri olarak sıcaklık (T) ve basınç (P) değerleri belirlenmiş, her kombinasyon için aşağıdaki özellikler elde edilmiştir:

• Yoğunluk (ρ, kg/m^3)
• Entropi (s, kJ/kg·K)
• Entalpi (h, kJ/kg)
• Sabit basınçtaki özgül ısı (c_p, kJ/kg·K)
• Dinamik viskozite (μ, μPa·s)
• Isı iletkenliği (k, mW/(K·m))
• İzotermal sıkıştırılabilirlik katsayısı (β, MPa^{-1})
• İzobarik genleşme katsayısı (α, K^{-1})

Bu özellikler, dolum sürecinde gazın dinamik davranışını gerçekçi şekilde temsil edebilmek için kullanılmıştır.

Buna ek olarak, referans koşullarda (T_0 = 293.15 K, P_0 = 101325 Pa) tipik doğal gaz karışımı (TypicalNaturalGas.mix) ve saf metan (CH_4) için ideal gaz yaklaşımıyla bazı sabit parametreler de hesaplanmıştır. Bu kapsamda:
• Gaz sabiti (R, kJ/(kg·K))
• Mol kütlesi (M, kg/mol)
• Sıkıştırılabilirlik katsayısı (Z)
• Özgül entalpi (h, kJ/kg)
• Sabit basınçtaki özgül ısı (c_p, kJ/(kg·K))
• Dinamik viskozite (μ, μPa·s)
• Isı iletkenliği (k, mW/(K·m))
gibi sabit değerler belirlenmiştir. Bu sabit parametreler, özellikle başlangıç koşullarının tanımlanması ve bazı referans hesaplamalarda kullanılmıştır.

Son olarak, sistemde kullanılan gazların sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişen özelliklerinin elde edilmesiyle birlikte, Simulink modeline ait tüm fiziksel parametreler bir veri yapısı içinde tanımlanmış ve giriş verileri bu yapıdan alınacak şekilde modellenmiştir. Gaz özellikleri, boru ve hortum çapları, kompresör karakteristikleri, ara soğutucu tasarımı ve fan özellikleri gibi sistem bileşenlerine ilişkin tüm bilgiler bu dosyada toplanmıştır. Bu veri hazırlık süreci ve veri akışı, Şekil 3.15'te şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.17. Modelde kullanılan fiziksel verilerin hesaplanması ve Simulink'e aktarılması sürecine ait veri işleme yapısı.

3.5. Simülasyon Modelinin Girdi Parametrelerinin Belirlenmesi

CNG dolum istasyonunun dinamik simülasyon modelinin gerçeği yansıtabilmesi için, fiziksel sistemin bütün bileşenlerine ilişkin girdi parametreleri dikkatle belirlenmiştir. Bu parametreler, hem gerçek sistem tasarımlarına dayandırılmakta hem de CoolProp kütüphanesi ile hesaplanan termodinamik özelliklerle birlikte MATLAB ortamında tanımlanmaktadır.

Hortum uzunluğu 5 m olarak belirlenmiş, çap da 12 mm olarak tanımlanmıştır. Kompresöre kadar olan boru hattı için çap 38 mm, kompresör çıkışı için ise 8,52 mm olarak tanımlanmıştır. Depolama tanklarına giden boruların çapları 15,7 mm olarak modellenmiştir.

Depolama yapısı, her biri 16 tanktan oluşan yüksek, orta ve düşük basınçlı olmak üzere üç kademeli bir sistem olarak belirlenmiştir. Her tank grubunun çalışma basıncı ve hacmi, optimizasyon çalışmasında tanımlanan seviyelerde değişiklik gösterecek şekilde parametrik olarak tanımlanmıştır.

Kompresör birimi için hacimsel deplasman 400 cm^3/rev olarak alınmış, hacimsel verim %90, mekanik verim ise %95 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, literatüre dayalı ve gerçek sistemlerden alınan verilere uygun olacak şekilde kullanılmıştır. Kompresör basınç oranı varsayılan senaryolarda 10 olarak kabul edilmiştir.

Soğutma sistemini temsilen kullanılan intercooler birimi, şekilsel olarak kabuk ve boru tipi (shell-and-tube) ısı eşanjörleri tasarlanmış ve 100 borudan oluşan 15 mm çapında borular ile modellenmiştir. Kabuk çapı 0,3 m, boru uzunluğu ise 5 m olarak alınmıştır. Soğutucu sistem için kullanılan fanların çapları da 2 m ve 0,25 m olacak şekilde tanımlanmıştır.

Ayrıca ortam sıcaklığı 20 °C ve bağıl nem %50 olarak tanımlanmış, dolum yapılacak aracın tank hacmi 70 litre olarak kabul edilmiştir. Tüm bu parametreler, modeldeki gaz özellikleriyle birlikte entegre edilerek sisteme ait gerçekçi bir dinamik davranış elde edilmesi sağlanmıştır.

3.6. Simülasyon Senaryoları ve Uygulama Kısıtları

Modelin sistem dinamiklerini temsil edebilmesi amacıyla, Simulink ortamında 24 saatlik bir simülasyon süresi tanımlanmıştır. Bu süre boyunca araç tanklarının ardışık biçimde dolumu gerçekleştirilmiş, sistem her dolum sonrası kısa bir bekleme süresine geçerek yeni araca geçiş yapmıştır. Her dolum çevrimi, belirli basınç kriterlerine dayalı olarak sonlandırılmıştır. Araç dolumu, araç tankı basıncı 200 bar'a ulaştığında tamamlanmış sayılmakta; alternatif olarak, yüksek basınçlı depo tankının basıncı 205 bar'ın altına düştüğünde ve araç tankı basıncı 195 bar'ı geçmişse, dolum yine sonlanmış kabul edilmektedir. Bu iki koşuldan herhangi birinin gerçekleşmesi dolumun bitişi için yeterlidir.

Simülasyon çevrimleri arasında sistem 1 dakikalık bekleme süresi uygulamaktadır. Bu bekleme süresi, bir sonraki araç bağlantısı ve dolum hazırlığı süreci olarak değerlendirilmiştir. Her yeni dolum çevrimine, başlangıç basıncı 5 bar olan boş bir araç tankı ile başlanmaktadır. Böylece ardışık dolum döngülerinde, gerçek sistem koşullarına

benzer biçimde araç tanklarının doluluk durumu sıfırdan başlayarak yeniden şekillendirilmektedir.

Araç dolumu yalnızca depolama tanklarında biriken doğal gaz ile gerçekleştirilmektedir. Simülasyon boyunca, araç dolumu esnasında kompresör devre dışı kalmakta ve dolum işlemi sırasında sisteme müdahale etmemektedir. Kompresör yalnızca depolama tankları belirli bir basıncın altına indiğinde devreye girmekte, araç tanklarına dolum bu sırada yapılmamaktadır. Böylece, dolum işlemleri ile depolama işlemleri birbirinden fiziksel olarak ayrılmış, sistemin kaskad yapısına uygun gerçekçi bir çalışma mantığı oluşturulmuştur.

Simülasyon çıktıları doğrultusunda, 24 saatlik süre içerisinde doldurulan toplam araç sayısı belirlenmiş ve bu sayı sistem performansını değerlendirmede temel kriterlerden biri olarak kabul edilmiştir. Bunun yanı sıra, her bir araca gönderilen gazın ortalama kütlesi hesaplanmış ve dolum etkinliği bu ölçütle analiz edilmiştir. Ayrıca, kompresörün çalıştığı süre boyunca tükettiği enerji toplamı dikkate alınarak enerji verimliliği de değerlendirilmiştir. Tüm bu performans göstergeleri, sistemin farklı çalışma senaryoları altında optimizasyonuna olanak sağlayacak biçimde model yapısına entegre edilmiştir.

3.7. Taguchi Deney Tasarımı ve Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Optimizasyon Yaklaşımı

Bu çalışmada, CNG dolum istasyonunun dinamik modeline çok amaçlı bir optimizasyon süreci entegre edilmiştir. Amaç; 24 saatlik işletim süresi boyunca mümkün olan en fazla sayıda aracın doldurulması, araçlara aktarılan ortalama gaz kütlesinin artırılması ve kompresörün birim kütle başına harcadığı özgül enerjinin azaltılmasıdır. Bu hedeflere ulaşmak amacıyla iki aşamalı bir deneysel ve analitik yöntem izlenmiştir. İlk aşamada Taguchi deney tasarımı, ikinci aşamada ise Gri İlişkisel Analiz (GRA) yöntemi uygulanmıştır.

Taguchi yöntemi, sınırlı sayıda deneyle çok sayıda faktörün sistem çıktıları üzerindeki etkilerini anlamaya yönelik etkin bir deney tasarımı yaklaşımıdır. Bu çalışmada, birinci

aşamada yüksek ($P_{yüksek}$), orta (P_{orta}) ve düşük ($P_{düşük}$) basınçlı depo tanklarına ait üç kontrol faktörü için dörder düzey tanımlanarak L16 ortogonal dizi oluşturulmuştur. İkinci aşamada, sabit basınç değerleri altında düşük basınç hacim oranı (v_{low}) ve orta–yüksek basınç hacim oranı ($v_{m/h}$) kontrol faktörleri seçilmiş, her biri üç seviyede değerlendirilerek L9 ortogonal dizi yapısı kullanılmıştır.

Her deney koşulunda elde edilen üç temel çıktı parametresi şunlardır:

- 24 saatlik süre içinde doldurulan araç sayısı ($n_{araç}$)
- Araç başına iletilen ortalama gaz kütlesi ($m_{ortalama}$)
- Kompresörün birim kütle başına harcadığı özgül enerji ($w_{komp.}$)

Bu parametreler için sinyal/gürültü oranları (S/G) hesaplanmış ve her çıktı için uygun kriter uygulanmıştır. “Büyük olan iyidir” kriteri için kullanılan S/G oranı:

$$S/G = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^{\,2}}\right) \tag{3.12}$$

“ Küçük olan iyidir” kriteri ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$S/G = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i^{\,2}\right) \tag{3.13}$$

Burada y_i, i’nci deneye ait çıktı değerini, n ise tekrar sayısını ifade etmektedir.

Çok sayıda ve farklı ölçeklerde çıktının bir arada değerlendirilebilmesi için Gri İlişkisel Analiz (GRA) uygulanmıştır. GRA yöntemiyle öncelikle her çıktı parametresi normalize edilmiş ve değerler [0–1] aralığına dönüştürülmüştür. “Büyük olan iyidir” kriteri için normalizasyon:

$$y_i(k) = \frac{x_i^0(k) - min\, x_i^0(k)}{max\, x_i^0(k) - min\, x_i^0(k)} \tag{3.14}$$

“ Küçük olan iyidir” kriteri için ise:

$$y_i(k) = \frac{max\, x_i^0(k) - x_i^0(k)}{max\, x_i^0(k) - min\, x_i^0(k)} \tag{3.15}$$

Burada $x_i^0(k)$, k’ncı çıktı için i’nci deneyde elde edilen değeri; $y_i(k)$ ise normalize edilmiş karşılığını ifade etmektedir.

Daha sonra her bir çıktı için gri ilişki katsayısı hesaplanmıştır:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \phi\, \Delta_{max}}{\Delta_i(k) + \phi\, \Delta_{max}} \tag{3.16}$$

Burada ϕ = 0,5 sabit çözünürlük katsayısıdır. $\Delta_i(k) = |y_0(k) - y_i(k)|$, ideal değerle olan mutlak farkı, Δ_{min} ve Δ_{max} ise tüm değerler arasında gözlenen minimum ve maksimum farkları temsil eder.

Her senaryo için tüm çıktıların ortalama etki derecesini temsil eden gri ilişki derecesi (GRD) şu şekilde hesaplanır:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} w_k \xi_i(k) \tag{3.17}$$

Burada w_k, her bir çıktının karar sürecindeki ağırlığını ifade eden katsayıdır ve $\sum w_k = 1$ olacak şekilde normalize edilmiştir. Ağırlık katsayıları, her çıktının faktörlere karşı duyarlılığını temsil eden Delta değerlerine göre belirlenmiştir:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^{p} Delta_{i,j}}{\sum_{i=1}^{t} \sum_{j=1}^{p} Delta_{i,j}} \tag{3.18}$$

Bu ifade, i’nci çıktının j’nci faktöre karşı gösterdiği etkiyi (Delta) kullanarak göreli önem sırasını nesnel olarak tanımlar.

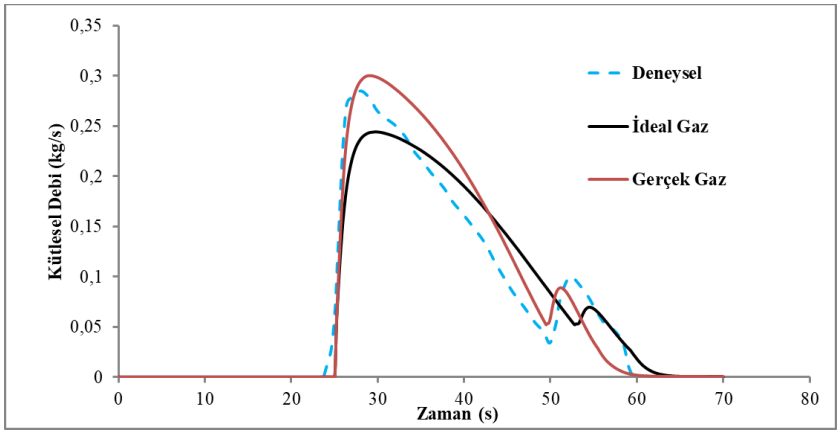
Bu bütünleşik Taguchi–GRA yaklaşımı sayesinde, dolum sisteminde çok sayıda parametrenin eşzamanlı olarak değerlendirilmesi mümkün olmuş, farklı hedeflerin dengelenerek optimum tasarım kombinasyonları belirlenmiştir. Yöntem hem sayısal etkinlik hem de mühendislik yorumu açısından güçlü bir karar destek aracı sunmaktadır.

3.8. Deneysel Verilerle Model Doğrulaması

Geliştirilen dinamik modelin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, sistem çıktıları literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırılmış ve modelin geçerliliği analiz edilmiştir. Bu kapsamda, doğal gazın hızlı dolum sürecindeki kütlesel debi (kg/s) ve araç deposu iç basıncının (bar) zamanla değişimleri, gerçek ve ideal gaz varsayımları altında ayrı ayrı simüle edilmiş ve deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır.

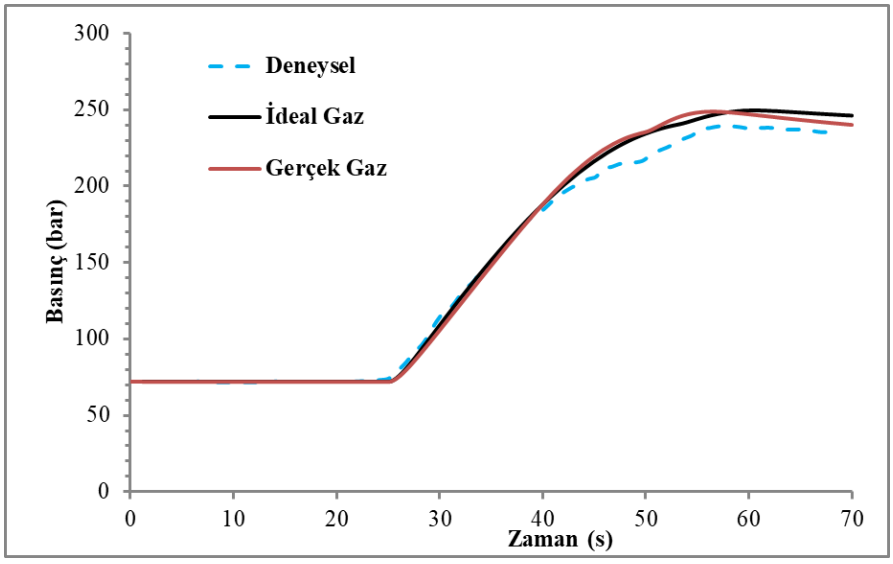
Bu karşılaştırmada, literatürde sıkça kullanılan ve George (2014) tarafından sunulan deneysel veri seti esas alınmıştır. Söz konusu veri seti daha önce Saadat-Targhi vd. (2016) ile Farzaneh-Gord vd. (2016) tarafından yapılan çalışmalarda da model doğrulama amacıyla referans alınmıştır. Deneysel çalışmada, başlangıç basıncı 72 bar olan ve hacmi 52 litre olan bir NGV (doğal gazlı araç) silindiri, kaskad dolum sistemi üzerinden doldurulmuştur.

Şekil 3.18'de sunulan eğriler; deneysel çalışma sonucu elde edilen ölçüm verilerini ("deneysel"), Simulink ortamında gerçek gaz modeliyle yapılan simülasyon çıktısını ("gerçek gaz") ve ideal gaz varsayımı ile yapılan simülasyon çıktısını ("ideal gaz") temsil etmektedir. Gerçek gaz modeliyle elde edilen simülasyon çıktısının, deneysel verilere daha yakın sonuçlar verdiği gözlenmektedir. Bu durum, ideal gaz modelinin yüksek basınçlı hızlı dolum süreçlerinde önemli sapmalar yarattığını ve gerçek gaz davranışının dikkate alınmasının model doğruluğu açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3.18. Hızlı dolum işlemi sırasında kütlesel debi değişiminin deneysel ve simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılması

Şekil 3.18'de, dolum sürecindeki kütlesel debi değişimi verilmiştir. Deneysel veri, 24. saniyede başlayan ve 60. saniyede sona eren hızlı dolum işlemi sırasında, debinin 0,29 kg/s ile 0,04 kg/s arasında değiştiğini göstermektedir. Simülasyon sonuçlarında, gerçek gaz modeli hem tepe debi değerlerinde hem de dolumun son evrelerindeki düşüş eğiliminde deneysel veriye daha yakın sonuçlar üretmiştir. İdeal gaz modeli ise maksimum debi değerini düşük tahmin etmiş ve dolumun son safhalarındaki eğilimden sapmıştır. Bu durum, gerçek gaz davranışlarının dikkate alınmasının dolum sürecinin dinamiklerini daha doğru yansıttığını ortaya koymaktadır.



Şekil 3.19. Araç silindiri iç basıncının zamanla değişiminin deneysel ve simülasyon verileriyle karşılaştırılması

Şekil 3.19'da, NGV silindiri içerisindeki basıncın zamanla değişimi sunulmuştur. Simülasyonda hem ideal hem de gerçek gaz modelleri, dolumun başlangıcından itibaren hızlı basınç artışını başarılı şekilde temsil etmektedir. Ancak, deneysel çalışmada hedeflenen dolum basıncı 240 bar iken, simülasyon modelinde bu değer 250 bar olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle dolum süresi yaklaşık 2 saniye daha uzun sürmüş ve simülasyon sonunda tahmin edilen basınç değerleri deneysel veriden yaklaşık %4,2 (10 bar) yüksek çıkmıştır.

Yapılan karşılaştırmada kütlesel debi için ortalama sapma yaklaşık ±0,015 kg/s seviyesinde; toplam dolum süresi açısından sapma yaklaşık 2 saniye (%5,5) olarak hesaplanmıştır. Bu düzeydeki sapmalar, yüksek basınçlı geçici süreçlerin modellenmesinde kabul edilebilir sınırlar içerisinde değerlendirilmektedir.

Gerçek gaz modeliyle elde edilen sonuçların deneysel verilerle daha yüksek uyum göstermesi, geliştirilen Simulink modelinde kullanılan CoolProp temelli hesaplamaların doğruluğunu ve model yapısının fiziksel gerçekliğe yakınlığını kanıtlamaktadır. Bu validasyon, modelin hem dolum süresini hem de termodinamik değişkenleri isabetli şekilde tahmin edebildiğini göstermekte olup, simülasyon tabanlı optimizasyon çalışmalarına güvenli bir temel sağlamaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Termodinamik Özellik Hesaplama Kodu ve AGA8-DC92 Hal Denklemi Uygulaması

Bu tez çalışmasının başlangıç aşamasında, farklı doğal gaz karışımları için termodinamik özelliklerin geniş bir sıcaklık ve basınç aralığında güvenilir biçimde hesaplanabilmesi amacıyla AGA8-DC92 hal denklemi temel alınarak kapsamlı bir hesaplama kodu geliştirilmiştir. Doğal gaz mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bu denklemin teorik ve ampirik bileşenleri, 21 farklı bileşene kadar tanımlanabilen gaz karışımları için ayrıntılı parametre tabloları ile birlikte kodlanmış, hesaplama süreci MATLAB ortamında yapılandırılmıştır.

Kod, kullanıcıdan gaz karışımına ait mol oranlarını, işlem sıcaklığını ve basıncını girdi olarak almakta; indirgenmiş yoğunluk ve karışım parametrelerinin hesaplanmasının ardından molar yoğunluğu Newton–Raphson yöntemi ile belirlemektedir. Hesaplamalar, Helmholtz serbest enerjisinin ideal ve artık bileşenlerinin türevlerine dayalı olarak yürütülmekte ve bu sayede çok sayıda mühendislik parametresi elde edilmektedir. Bu kapsamda hesaplanan başlıca termodinamik büyüklükler: yoğunluk, sıkıştırılabilirlik faktörü (Z), entalpi, entropi, iç enerji, sabit hacimde ve sabit basınçta özgül ısı kapasitesi (C_v ve C_p), ses hızı, Gibbs serbest enerjisi, Joule–Thomson katsayısı, izentropik oran (Kappa) ve gaz sabiti (R) olarak sıralanabilir. Geliştirilen bu hesaplama kodunun tam versiyonu Ek 1'de verilmiştir.

Kodun çalışabilirliği ve temel çıktıların değerlendirilmesi amacıyla, varsayılan bir doğal gaz karışımı ve referans ortam koşulları altında örnek bir hesaplama gerçekleştirilmiştir. Bu senaryoda, doğal gazın mol bileşimi şu şekildedir: % 96,5222 metan, % 0,2595 azot, % 0,5956 karbondioksit, % 1,8186 etan, % 0,4596 propan, % 0,0977 i-bütan, % 0,1007 n-bütan, % 0,0473 i-pentan, % 0,0324 n-pentan ve % 0,0664 n-heksan. Diğer bileşenler sıfır olarak kabul edilmiştir. Sıcaklık 0 °C (273,15 K), basınç ise 1,0156 bar (101,56 kPa) olarak seçilmiştir. Bu koşullar altında elde edilen termodinamik özellikler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. AGA8-DC92 ile hesaplanan termodinamik özellikler (T = 0 °C, P = 1,0156 bar)

Özellik	**Değer**	**Birim**
Molar kütle (M)	16,799	kg/kmol
Yoğunluk (ρ)	0,753	kg/m³
Sıkıştırılabilirlik faktörü (Z)	0,9974	–
İç enerji (U)	–3184,37	J/mol
Entalpi (H)	–919,15	J/mol
Entropi (S)	–1,536	J/(mol·K)
Sabit hacimde özgül ısı (C_v)	27,238	J/(mol·K)
Sabit basınçta özgül ısı (C_p)	35,657	J/(mol·K)
Ses hızı (W)	419,59	m/s
Gibbs serbest enerjisi (G)	–499,59	J/mol
Joule–Thomson katsayısı (JT)	0,00552	K/kPa
İzentropik oran (Kappa)	1,3057	–
Doğal gaz sabiti (R_{ng})	0,4949	kJ/(kg·K)
Özgül entalpi (h_{ng})	–54,71	kJ/kg
Özgül c_p ($c_{p\,ng}$)	2,122	kJ/(kg·K)

Çizelge 4.1'de yer alan bazı büyüklüklerin negatif çıkması, sistemin sıfır referans noktası olarak alınan durumuna göre daha düşük enerjili bir hâlde bulunmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle iç enerji (U) ve entalpi (H) gibi enerjiye dayalı terimler, tanımlanan referans duruma göre farkı yansıttığı için negatif olabilir. Bu hesaplamada, AGA8-DC92 denklemine ait ideal gaz ve artık (residual) bileşenlerin birlikte değerlendirilmesi sonucunda, düşük sıcaklık ve düşük basınç koşullarında enerji bileşenleri sıfırın altında değer alabilmektedir. Gibbs serbest enerjisi (G) ve entropi (S) için de benzer şekilde, mutlak sıfır noktası referans alındığında negatif değerler fiziken anlamlıdır ve sıkıştırılabilirlik ile ısıl potansiyel davranışlarını yansıtır. Bu durum, herhangi bir hata göstergesi değil; aksine termodinamik hesaplamaların Helmholtz enerjisi türevlerine dayalı olarak gerçekleştirilmesinin doğal bir sonucudur.

4.2. AGA8-DC92 Denklemi ile Termodinamik Özelliklerin Hesaplanması ve Yoğunluk Doğrulaması

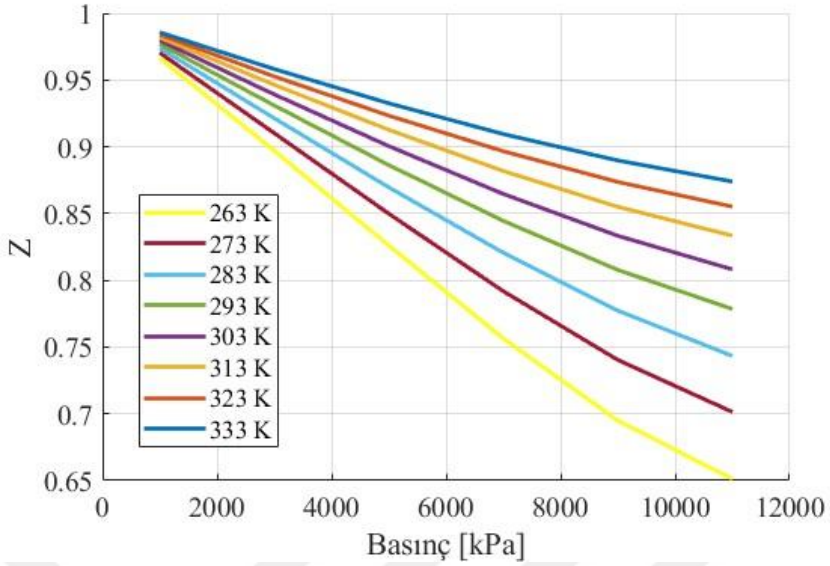
Bu bölümde, *Prediction of Thermodynamic Properties for Compressed Natural Gas Mixtures* başlıklı çalışmada geliştirilen MATLAB tabanlı hesaplama araçlarıyla, AGA8-DC92 hal denklemi kullanılarak bir doğal gaz karışımının termodinamik özellikleri değerlendirilmiştir. Hesaplamalar, Patil vd. (2007) tarafından sunulan deneysel yoğunluk verileri ile karşılaştırılmıştır.

Kullanılan doğal gaz karışımı dokuz bileşenden oluşmakta olup, bileşenlerin mol yüzde değerleri aşağıdaki çizelgede sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Deneysel çalışmada kullanılan doğal gaz karışımının bileşimi (mol %)

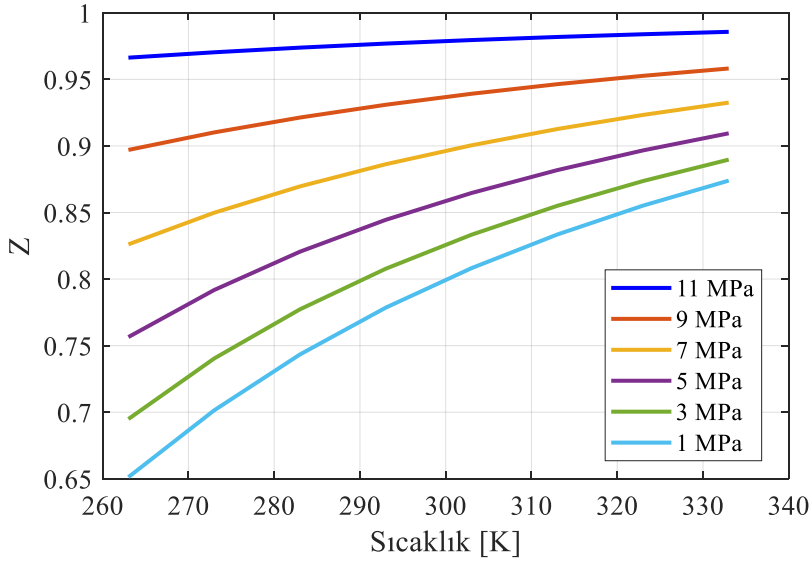
Bileşen	**Mol %**
Metan (CH_4)	90,991
Nitrojen (N_2)	2,031
Karbondioksit (CO_2)	0,403
Etan (C_2H_6)	2,949
Propan (C_3H_8)	1,513
Isobutan (i-C_4H_{10})	0,755
n-Butan (n-C_4H_{10})	0,755
Isopentan (i-C_5H_{12})	0,299
n-Pentan (n-C_5H_{12})	0,304

Doğal gaz karışımının sıkıştırılabilirlik faktörü (Z), çeşitli sıcaklık ve basınç değerlerinde hesaplanmış ve bu değerler sabit sıcaklıklarda Z–P ve sabit basınçlarda Z–T eğrileriyle görselleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Sabit sıcaklıklarda sıkıştırılabilirlik faktörünün basınca göre değişimi

Şekil 4.1'de sabit sıcaklıklarda basınca bağlı olarak Z faktöründeki değişim gözlenmektedir. Özellikle 1 bar üzerindeki basınçlarda Z değeri 1'den sapmakta; bu da ideal gaz varsayımının yüksek basınçlı dolum süreçlerinde geçerli olmadığını göstermektedir. Bu sapma, CNG sistemlerinin dinamik modellemesinde gerçek gaz davranışının dikkate alınması gerektiğini desteklemektedir.



Şekil 4.2. Sabit basınçlarda sıkıştırılabilirlik faktörünün sıcaklığa göre değişimi

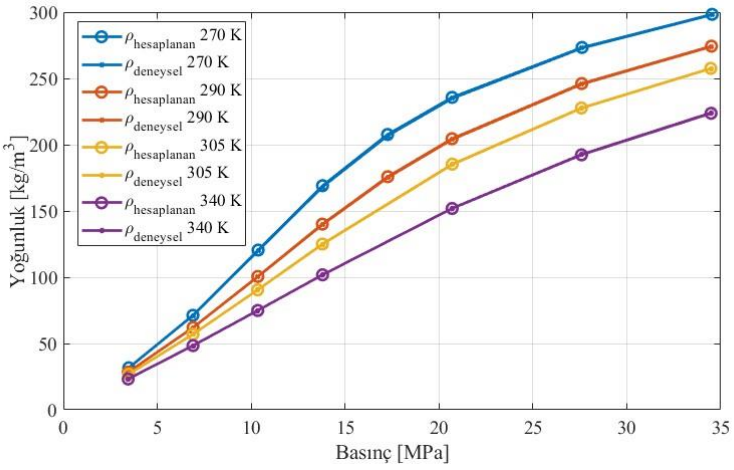
Şekil 4.2'de sabit basınçlar altında sıcaklık artışının Z faktörü üzerindeki etkisi görülmektedir. Sıcaklık arttıkça Z faktörü 1'e yaklaşmakta, yani gaz daha ideal davranmaktadır. Bu eğilim, yüksek sıcaklık koşullarında ideal gaz modelinin daha makul sonuçlar verebileceğini, ancak düşük sıcaklık ve yüksek basınç kombinasyonlarında bu yaklaşımın ciddi hata oluşturabileceğini göstermektedir.

Yoğunluk doğrulama çalışmasında, AGA8-DC92 denkleminden elde edilen hesaplamalar, Patil ve arkadaşlarının deneysel yoğunluk verileri ile karşılaştırılmıştır. Her bir deneysel veri noktası için hesaplanan bağıl hata yüzdesi aşağıdaki eşitlik kullanılarak elde edilmiştir:

$$Hata(\%) = \frac{\rho_{deneysel} - \rho_{hesaplanan}}{\rho_{deneysel}} x100 \quad (4.1)$$

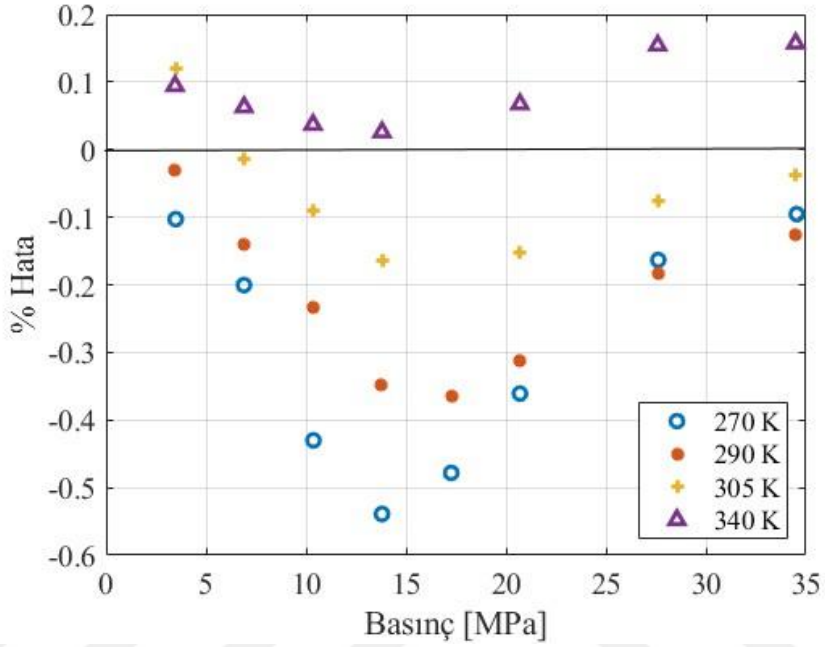
Farklı sıcaklıklarda elde edilen yoğunlukların karşılaştırılması, deneysel ve hesaplanan değerlerin oldukça iyi bir uyum gösterdiğini ortaya koymuştur.

Şekil 4.3'te hesaplanan yoğunluk değerleri, Patil vd. (2007) tarafından sunulan deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, AGA8-DC92 denkleminin farklı sıcaklık koşullarında yüksek doğrulukla sonuç verdiğini göstermektedir. Bu kıyaslama, hesaplama algoritmasının geçerliliğini ve model doğruluğunu desteklemektedir.



Şekil 4.3. Deneysel ve hesaplanan yoğunluk değerlerinin karşılaştırılması

Bağıl hata dağılımına ilişkin analiz ise aşağıda sunulmuştur. Ortalama mutlak bağıl hata (AAPD), %0.1787 olarak hesaplanmış ve bu sonuç, kullanılan denklem modelinin doğruluğunu ortaya koymuştur.



Şekil 4.4. Hesaplanan yoğunlukların bağıl hata yüzdeleri

Bu bölümde gerçekleştirilen hesaplamalar için geliştirilen MATLAB kodu Ek 2'de sunulmuştur.

4.3. Doğal Gaz Modelleme Yaklaşımlarının ve Bileşim Farklılıklarının Dolum Performansına Etkisi

Bu bölümde, hızlı dolum işlemlerinde kullanılan doğal gazın termodinamik modelleme yaklaşımı (gerçek veya ideal gaz varsayımı) ile gaz bileşimindeki farklılıkların, araç tankına aktarılan kütle, sıcaklık ve basınç değerleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Tüm analizler, yalnızca tek basınç seviyesine sahip sabit hacimli depo tanklarıyla çalışan bir dolum sistemini temel almaktadır; yani kademeli (cascade) depolama yöntemi kullanılmamış, bunun yerine sabit basınçlı buffer tipi bir depolama yapısı tercih edilmiştir. Çalışma kapsamında, önce saf metan gazı için gerçek ve ideal gaz varsayımları altında elde edilen dolum performansı karşılaştırılmış; ardından farklı

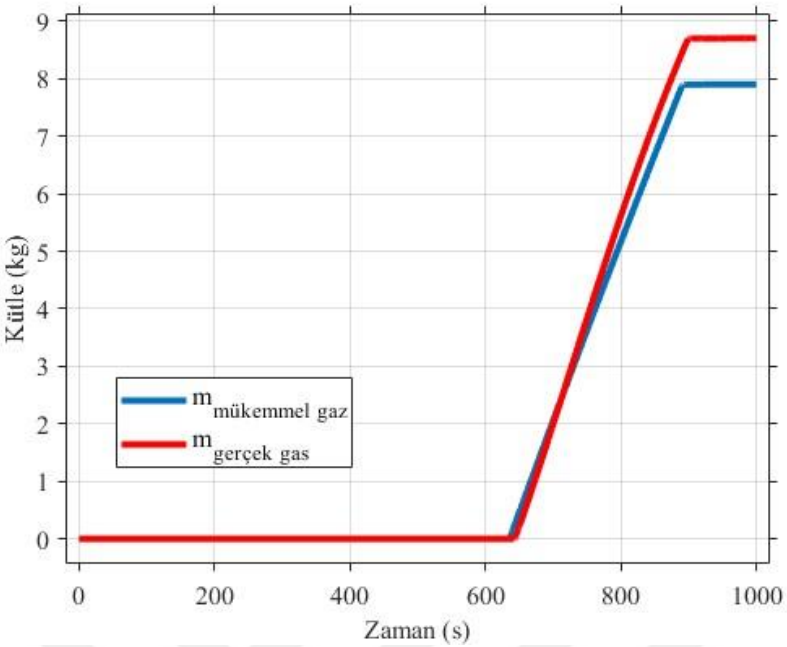
doğal gaz karışımları ile yapılan simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir. Bu analizler, CNG dolum sürecinin termodinamik açıdan güvenli, verimli ve doğru şekilde modellenebilmesi açısından kritik veriler sunmaktadır.

4.3.1. Gerçek ve ideal gaz varsayımlarının karşılaştırılması

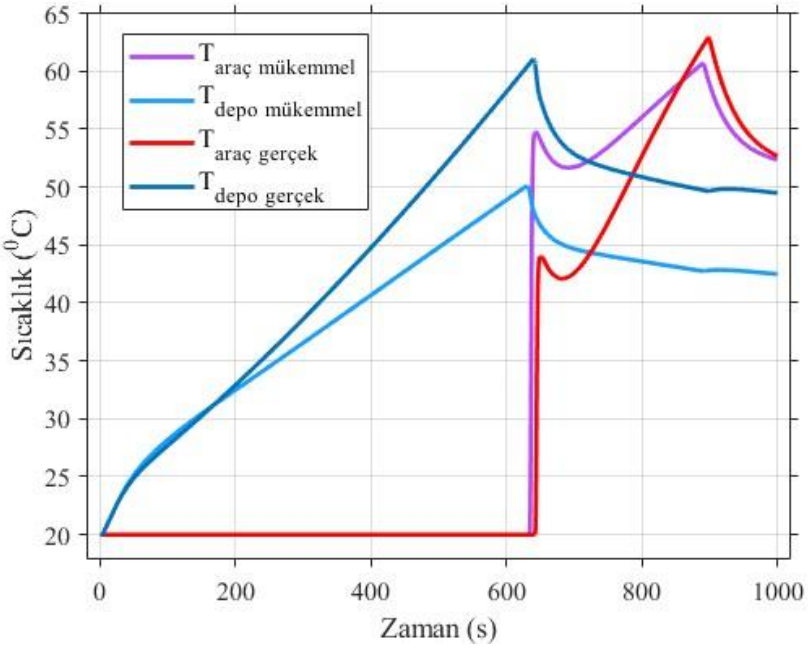
Bu bölümde, saf metan gazı ile gerçekleştirilen tek kademeli dolum işlemi için ideal gaz ve gerçek gaz varsayımlarının CNG dolum performansı üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Simülasyonlar, MATLAB/Simulink/Simscape ortamında geliştirilen dinamik model kullanılarak gerçekleştirilmiş; gerçek gaz özellikleri CoolProp kütüphanesi aracılığıyla, ideal gaz modeli ise sabit gaz sabiti ve sabit özgül ısı değerleri ile tanımlanmıştır. Simülasyon başlangıcında araç tankı basıncı 5 bar, depo (buffer) tankı basıncı ise 15 bar olarak belirlenmiştir. Dolum işlemi, yaklaşık 300 saniyede tamamlanmıştır.

Bu simülasyon senaryosunda, dolum işlemine geçilmeden önce sistemde yalnızca yüksek basınçlı deponun kompresör aracılığıyla doldurulması tanımlanmıştır. İlk 650 saniyelik sürede kompresör aktif çalışmakta, ancak araç tankına henüz gaz aktarılmamaktadır. Bu süre boyunca araç tankında doluluk artmadığı için Şekil 4.5 ve 4.6'da görülen eğriler yatay seyretmektedir. 650. saniyeden sonra kompresör durmakta ve dolu depodan araç tankına gaz aktarımı başlamaktadır.

Şekil 4.5'te araç tankına dolan toplam gaz kütlesi zamanla gösterilmektedir. Gerçek gaz modelinde araç tankına 8,7 kg, ideal gaz modelinde ise 7,9 kg doğal gaz aktarılmıştır. Bu değerler, ideal gaz varsayımının yaklaşık %9 oranında daha düşük kütle tahmini yaptığını ve yüksek basınçlı hızlı dolum senaryolarında sistemin gerçek davranışını yetersiz temsil ettiğini göstermektedir.

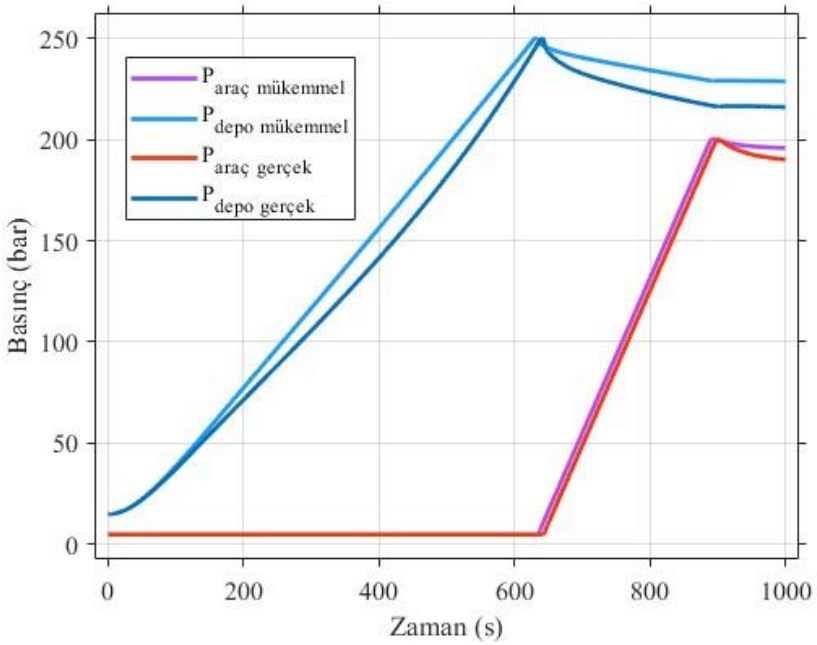


Şekil 4.5. Gerçek gaz ve ideal gaz varsayımlarına göre araç tankına dolan toplam gaz kütlesinin zamana bağlı değişimi.



Şekil 4.6. Gerçek gaz ve ideal gaz modellerine göre araç ve depo tank sıcaklıklarının zamana bağlı karşılaştırılması

Şekil 4.6'da araç ve depo tanklarının sıcaklık değişimleri karşılaştırılmıştır. Gerçek gaz modelinde araç tank sıcaklığı dolum sonunda 63 °C, ideal gaz modelinde ise 61 °C olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık artışındaki bu fark, gazın özgül ısısındaki basınca bağlı değişimlerin yalnızca gerçek gaz modelinde temsil edilebilmesinden kaynaklanmaktadır. Depo tank sıcaklıkları da benzer şekilde gerçek gaz modelinde daha yüksektir ve çevreye ısı transferi etkisiyle dolum bitiminde düşüş göstermektedir.

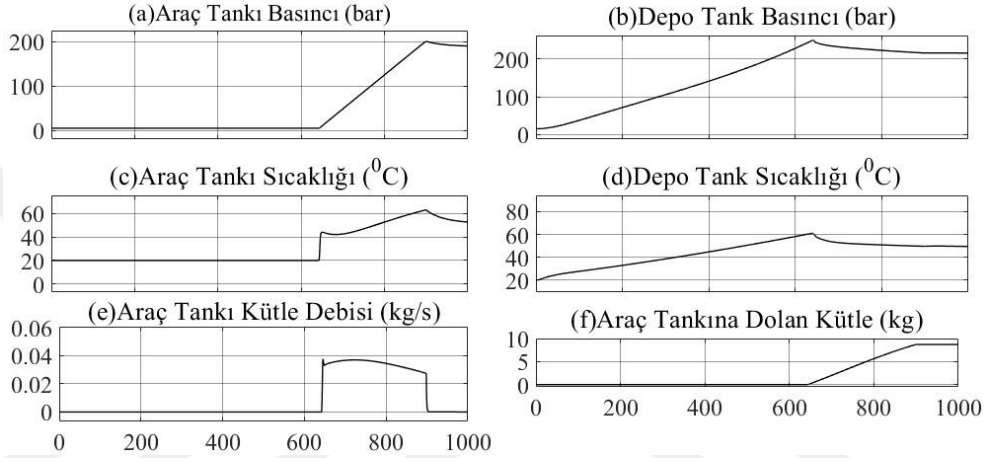


Şekil 4.7. Gerçek gaz ve ideal gaz modellerine göre araç ve depo tank basınçlarının zamana bağlı karşılaştırılması

Şekil 4.7'de ise sistemdeki basınç değişimleri gösterilmiştir. Her iki modelde araç tankı basıncı yaklaşık 200 bar seviyesine ulaşmakta, ancak gerçek gaz modelinde depo tank basıncı dolum sonuna doğru daha belirgin şekilde azalmaktadır. Bu durum, gerçek gaz etkilerinin sistem genelinde daha yüksek kütle transferine olanak tanıdığına işaret etmektedir.

Gerçek gaz modeline ait ayrıntılı sistem yanıtları Şekil 4.8'de sunulmuştur. Bu grafiklerde, zaman eksenine bağlı olarak araç ve depo tanklarına ait basınç, sıcaklık, kütle debisi ve dolan toplam kütle değerlerinin değişimi izlenmektedir. Araç tankı

sıcaklığı, dolumun başlangıcında ani bir yükselme eğilimi göstermekte; ardından ortamla olan ısı alışverişinin etkisiyle daha dengeli bir artış sürmektedir. Depo tankı sıcaklığı ise dolum süresince kararlı biçimde yükselmekte ve dolumun sonuna doğru yatay bir seyir izlemektedir. Kütle debisi, yaklaşık 0,035–0,04 kg/s aralığında sabit kaldıktan sonra dolumun tamamlanmasıyla sıfıra inmektedir. Bu grafikler, gerçek gaz davranışının zamanla sistem üzerindeki etkilerini kapsamlı şekilde ortaya koymakta ve hızlı dolum sürecinin termodinamik tepkilerini açıkça görselleştirmektedir.



Şekil 4.8. Araç ve depo tankına ait zamana bağlı sistem tepkileri: (a) araç tankı basıncı, (b) depo tankı basıncı,(c) araç tankı sıcaklığı, (d) depo tankı sıcaklığı,(e) araç tankı kütle debisi, (f) araç tankına dolan toplam kütle

Elde edilen bulgular, hızlı dolum uygulamaları için ideal gaz modelinin eksik kaldığını ve sistemin gerçek davranışının doğru tahmini için basınca ve sıcaklığa bağlı gerçek gaz özelliklerinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Özellikle yoğunluk, sıcaklık ve dolum kütlesi gibi kritik performans değişkenleri, gerçek gaz modeli ile çok daha hassas şekilde elde edilebilmiştir. Bu nedenle CNG sistem tasarımında, performans analizlerinde ve güvenlik değerlendirmelerinde gerçek gaz yaklaşımı kaçınılmazdır.

4.3.2. Farklı doğal gaz karışımları için simülasyon bulguları

Bu bölümde, sabit basınçlı buffer tipi depolama sistemine sahip bir CNG dolum istasyonunda dört farklı doğal gaz karışımı için gerçekleştirilen simülasyonların ayrıntılı termodinamik ve performans sonuçları sunulmaktadır. İncelenen karışımlar: saf metan,

Gulf Coast, Amarillo ve Ekofisk'tir. Bu karışımların bileşimleri ve fiziksel özellikleri sırasıyla Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir.

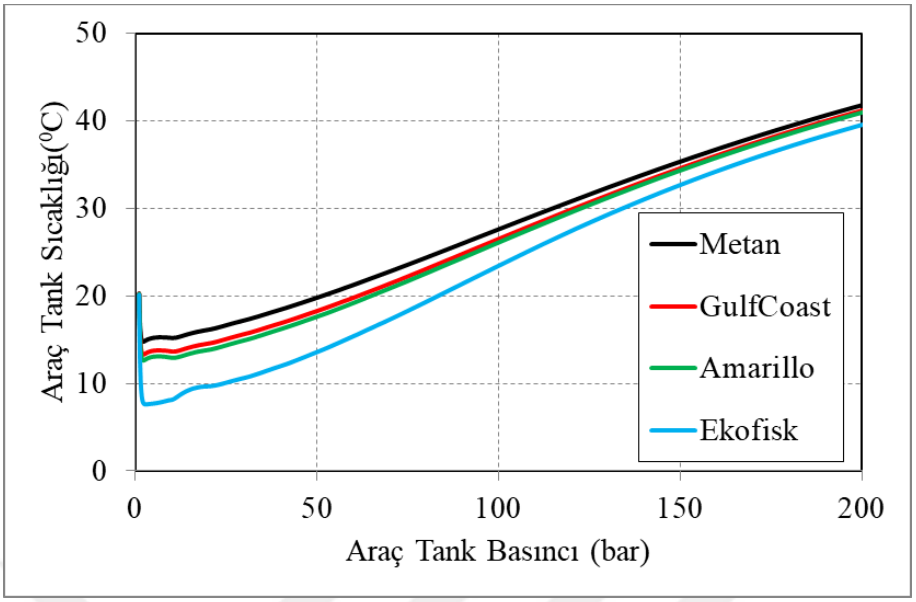
Çizelge 4.3. Doğal gaz bileşenlerinin mol yüzde değerleri (% mol)

Bileşen	Saf Metan	Gulf Coast	Amarillo	Ekofisk
Metan	100	96,5222	90,6724	85,9063
Azot (N_2)	0	0,2595	3,1284	1,0068
Karbondioksit (CO_2)	0	0,5956	0,4676	1,4954
Etan (C_2H_6)	0	1,8186	4,5279	8,4919
Propan (C_3H_8)	0	0,4596	0,828	2,3015
i-Bütan	0	0,0977	0,1037	0,3486
n-Bütan	0	0,1007	0,1563	0,3506
i-Pentan	0	0,0473	0,0321	0,0509
n-Pentan	0	0,0324	0,0443	0,048
n-Heksan	0	0,0664	0,0393	0

Çizelge 4.4. Doğal gaz örneklerine ait fiziksel özellikler (20 °C ve 1 atm koşullarında)

Gaz Özellikleri	Saf Metan	Gulf Coast	Amarillo	Ekofisk
Özgül gaz sabiti [kJ/(kg·K)]	0,5183	0,4949	0,4725	0,443
Sıkıştırılabilirlik katsayısı (Z)	0,9981	0,998	0,9979	0,9975
Yoğunluk [kg/m³]	0,6682	0,6998	0,733	0,7822
Özgül entropi [kJ/(kg·K)]	6,6368	6,457	6,4064	5,9993
Özgül entalpi [kJ/kg]	898,822	872,812	834,8373	820,0325
Sabit basınçta özgül ısı [kJ/(kg·K)]	2,2206	2,1635	2,0886	2,0435
Dinamik viskozite [μPa·s]	11,0371	10,9989	11,074	10,8493
Isıl iletkenlik [mW/(m·K)]	33,4476	32,9506	32,327	31,4966
İzotermal kütle modülü [MPa]	0,1011	0,1011	0,1011	0,1011
İzobarik genleşme katsayısı [1/K]	0,0034	0,0034	0,0034	0,0034

Simülasyonlarda araç tankı hacmi 70 litre olarak tanımlanmış ve başlangıç basıncı 0,101325 MPa alınmıştır. Dolum işlemi, araç tankı basıncının 200 bar'a ulaşmasına kadar devam ettirilmiş ve ortalama dolum süresi yaklaşık 260 saniye olarak hesaplanmıştır. Tank duvarı ile çevre arasındaki ısı geçişi ve ortam sıcaklığının etkileri de modele dahil edilmiştir.

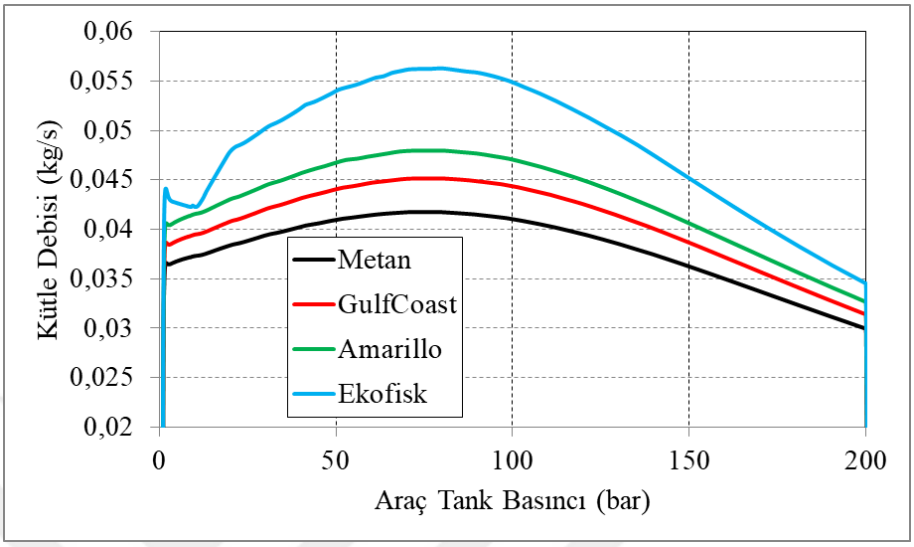


Şekil 4.9. Farklı doğal gaz karışımları için dolum süresince araç tankı sıcaklığının iç basınca bağlı değişimi

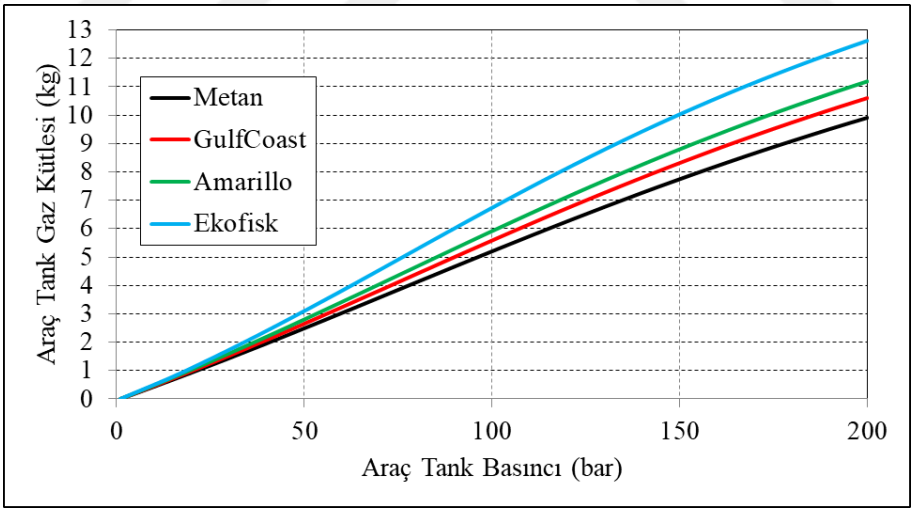
Şekil 4.9 araç tankı sıcaklığının, dolum süresince iç basınca bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir. Dolumun ilk evresinde, yüksek basınçlı gazın düşük basınçlı tanka hızla giriş yapması, Joule–Thomson etkisi ile kısa süreli bir sıcaklık düşüşüne neden olmaktadır. Bu etki, özellikle Ekofisk gazı için daha belirgin şekilde gözlenmiştir. Basınç arttıkça tank içerisindeki gazın sıkışması ile sıcaklık tekrar yükselmeye başlamaktadır. Son sıcaklık değerleri incelendiğinde, en düşük değer Ekofisk karışımına ait olup, bu durum karışımda yer alan ağır hidrokarbonların (etan, propan vb.) yüksek özgül ısı kapasitesi ve yoğunluğu ile açıklanabilir.

Şekil 4.10'da görülen kütle debisi değişimi, gaz bileşiminin yoğunluk ve sıkıştırılabilirlik özelliklerine bağlı olarak dolum sürecinde farklı akış profilleri oluşturduğunu göstermektedir. Bazı karışımlar, daha yüksek yoğunluk ve daha düşük Z faktörü sayesinde aynı iç basınçta daha fazla kütlenin aktarılmasına olanak sağlamaktadır. Bu durum, nihai olarak araç tankına dolan toplam gaz miktarının artmasına ve dolum süresinin kısalmasına neden olur. Uygulama açısından bu farklılık, daha verimli dolum, daha az kompresör çevrimi ve potansiyel olarak daha düşük enerji tüketimi anlamına gelmektedir. Bu nedenle, gaz bileşimi yalnızca motor performansı

açısından değil, dolum sistemlerinin tasarımı ve işletme maliyetleri açısından da kritik bir parametre hâline gelmektedir.



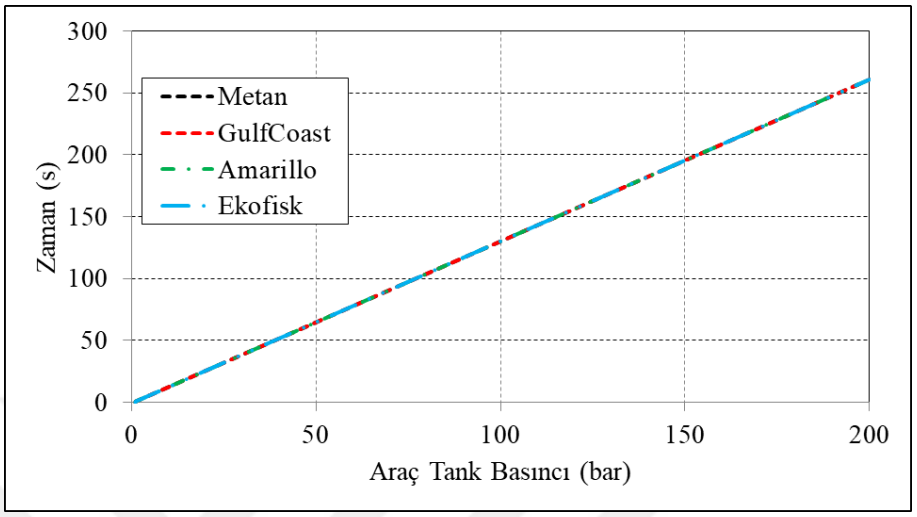
Şekil 4.10. Farklı doğal gaz karışımları için dolum süresince araç tankına iletilen kütle debisinin iç basınca bağlı değişimi



Şekil 4.11. Farklı doğal gaz karışımları için araç tankına dolan toplam gaz kütlesinin iç basınca bağlı değişimi

Şekil 4.11'de, doldurulan toplam gaz kütlesinin basınca bağlı değişimi gösterilmiştir. Her bir gaz karışımı için yaklaşık doğrusal bir artış gözlenmekte olup, Ekofisk karışımı ile 200 bar sonunda yaklaşık 12,6 kg, saf metan ile ise 9,9 kg dolum gerçekleştirilmiştir.

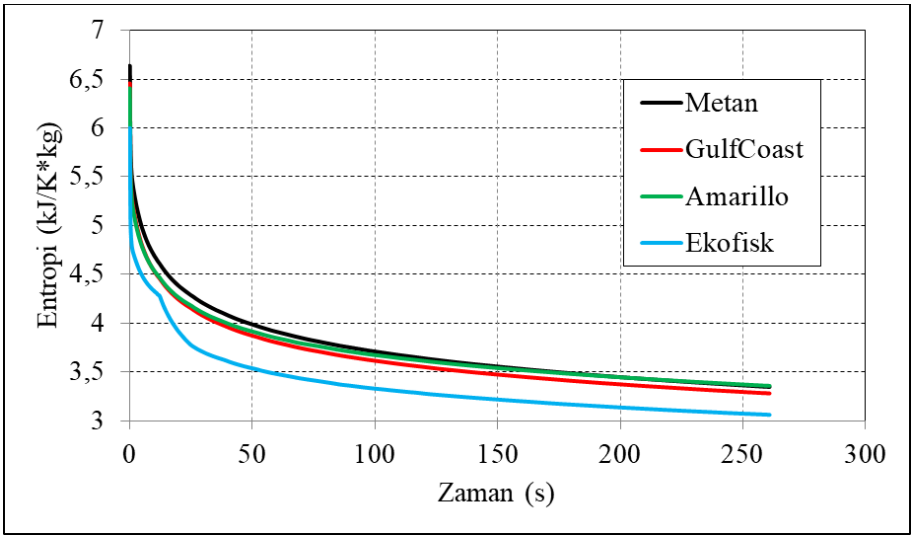
Bu %27'lik fark, sabit hacimli bir tank için yoğunluk ve sıcaklık farklarının dolum kapasitesine etkisini net biçimde ortaya koymaktadır.



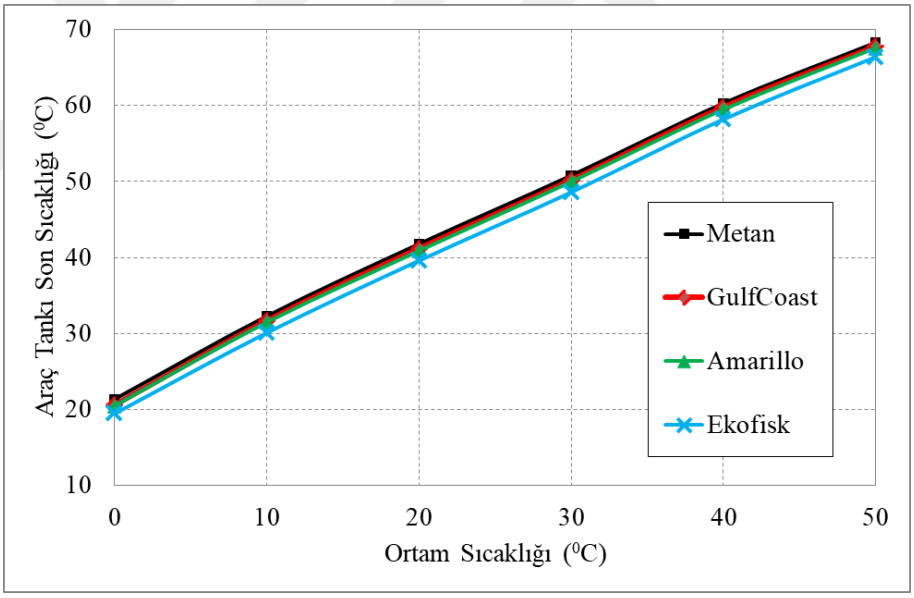
Şekil 4.12. Farklı doğal gaz karışımları için dolum süresince araç tankı iç basıncının zamana bağlı değişimi

Şekil 4.12 tüm gaz karışımları için tank iç basıncının zamana bağlı değişimini göstermektedir. Eğriler arasında belirgin bir farklılık olmamakla birlikte, dolum süresi tüm gazlar için yaklaşık olarak eşit bulunmuştur. Bu durum, sistemin dolum sürecini zaman veya kütle bazlı değil, basınç ve sıcaklık temelli kontrol algoritmalarıyla yönettiğini göstermektedir.

Şekil 4.13'te, gazların özgül entropi değişimi zamana bağlı olarak sunulmuştur. Dolum süresince entropi tüm karışımlar için monoton şekilde azalmıştır. Bu durum, sistemin başlangıçtaki daha düzensiz durumdan, dolum süreci boyunca daha kararlı bir termodinamik yapıya geçişini ifade etmektedir. Entropi değerleri en düşük olan karışım Ekofisk'tir; bu da onun dolum boyunca daha düzenli ve istikrarlı bir iç yapıya sahip olduğunu göstermektedir.



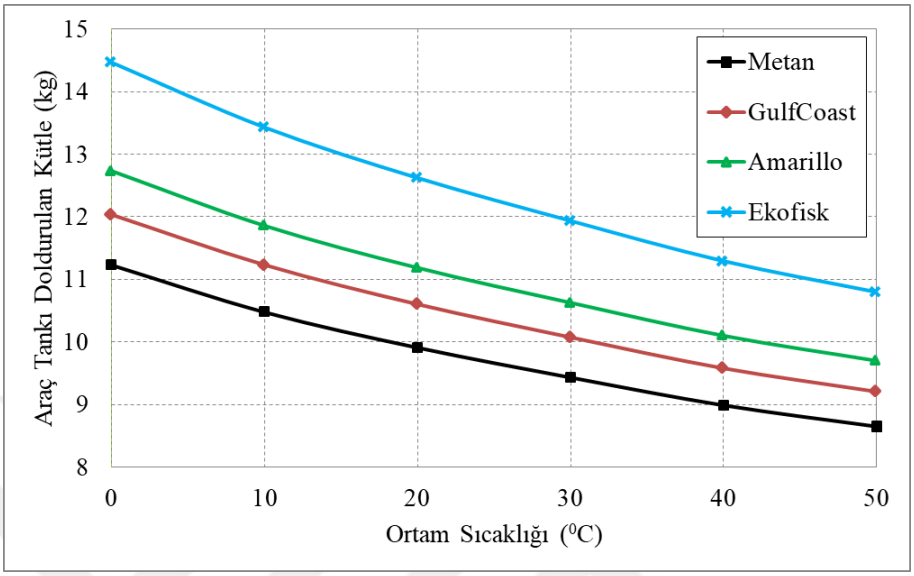
Şekil 4.13. Farklı doğal gaz karışımları için dolum süresince gazın özgül entropisinin zamana bağlı değişimi



Şekil 4.14. Ortam sıcaklığının farklı doğal gaz karışımları için araç tankı son sıcaklığı üzerindeki etkisi

Şekil 4.14, ortam sıcaklığının araç tankı son sıcaklığı üzerindeki etkisini göstermektedir. Ortam sıcaklığı arttıkça tankın dolum sonundaki sıcaklığı da lineer olarak yükselmektedir. Bu durum, dolum işlemi sonunda tank içerisindeki gazın daha yüksek sıcaklıkta ve dolayısıyla daha düşük yoğunlukta olmasına neden olmaktadır. Bu etki

özellikle saf metan gibi daha düşük yoğunluklu gazlar için daha belirgin biçimde gözlenmektedir.



Şekil 4.15. Ortam sıcaklığının farklı doğal gaz karışımları için araç tankına dolan gaz kütlesi üzerindeki etkisi

Şekil 4.15'te, ortam sıcaklığının araç tankına dolan toplam gaz kütlesi üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Tüm gaz karışımları için ortak eğilim, ortam sıcaklığı arttıkça doldurulan kütle miktarının azalması yönündedir. Bu düşüş, ortam sıcaklığının artmasıyla tank içerisindeki gazın daha yüksek sıcaklığa ulaşması ve buna bağlı olarak daha düşük yoğunlukla depolanması nedeniyle gerçekleşmektedir.

Ekofisk gazı, 0 °C ortam sıcaklığında yaklaşık 14,5 kg, 50 °C'de ise 10,8 kg gaz ile dolum tamamlamaktadır. Amarillo karışımı için bu değerler sırasıyla 12,73 kg ve 9,7 kg, Gulf Coast için ise 12 kg ve 9,2 kg olarak hesaplanmıştır. Saf metan ise en düşük dolum miktarlarına sahiptir; 0 °C'de yaklaşık 11,2 kg, 50 °C'de ise 8,7 kg dolum gerçekleşmektedir.

Sonuç olarak, bu bölümde farklı doğal gaz karışımları kullanılarak gerçekleştirilen dolum simülasyonları, gaz bileşiminin, yoğunluğun, termodinamik özelliklerin ve çevresel sıcaklık koşullarının CNG dolum performansı üzerinde belirleyici etkileri

olduğunu açık biçimde ortaya koymuştur. Özellikle metan dışı ağır hidrokarbonların bulunduğu karışımlar (örneğin Ekofisk), daha yüksek yoğunluğa sahip olmaları nedeniyle sabit hacimli tanklara daha fazla kütle dolumu sağlamış; dolum süresince daha düşük sıcaklık artışı ve daha kararlı entropi eğilimleri sergilemiştir. Buna karşılık saf metan, yüksek özgül entalpiye sahip olmasına rağmen düşük yoğunluğu nedeniyle daha az kütle ile dolum yapabilmiştir.

Ortam sıcaklığı, dolum sürecini sınırlayan önemli bir dış etkendir. Tüm karışımlar için 0 °C ile 50 °C arasında ortam sıcaklığında, dolum miktarında yaklaşık %15–25 aralığında düşüşler gözlenmiştir. Bu etki, yoğunluğu düşük karışımlarda daha belirgin olmuş ve saf metan 50 °C ortam sıcaklığında en düşük dolum kütlesi değerini göstermiştir. Grafikler, hem ortam sıcaklığına hem de gaz kompozisyonuna bağlı olarak dolum veriminde kayda değer farklılıklar oluştuğunu göstermiştir.

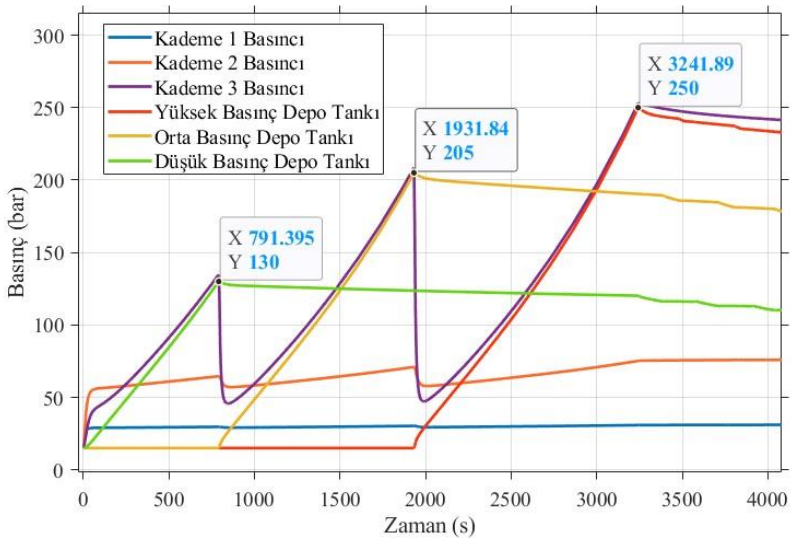
Bu nedenle, CNG istasyonlarında kullanılan gaz karışımının fiziksel özellikleri kadar, istasyonun bulunduğu bölgenin iklim koşulları da dikkate alınmalı; sıcaklık değişimlerine karşı dolum kontrol algoritmaları ve tank malzeme özellikleri optimize edilmelidir. Ayrıca, bu karışımların motor performansı, enerji içeriği ve emisyon özellikleri gibi diğer teknik parametreler de değerlendirilerek bütüncül bir yakıt yönetimi stratejisi geliştirilmesi önerilmektedir.

4.4. Kademeli Depolama Yapısı ile Dolum Performansının Dinamik Modellenmesi

Bu bölümde, kademeli basınç seviyelerine sahip bir Sıkıştırılmış Doğal Gaz (CNG) dolum istasyonunun dinamik davranışı değerlendirilmiştir. Sistem, gerçek çalışma koşullarına benzer şekilde tasarlanmış olup, MATLAB–Simulink ortamında fiziksel bileşen temelli olarak modellenmiştir. Modelleme sürecinde, çok kademeli kompresör yapısı, bu kompresörlere entegre edilen ara soğutucular, üç seviyeli (düşük, orta ve yüksek basınç) depo tankları, mantıksal akış kontrolü sağlayan öncelik vanası yapısı ve araç dolum ünitesi gibi tüm alt sistemler fiziksel bağlantılarla temsil edilmiştir. Dolum sırasında gerçekleşen ısı transferi, basınç ve sıcaklık değişimleri, sistem bileşenlerinin özelliklerine bağlı olarak zamana dayalı biçimde hesaplanmıştır. Modelin tüm

bileşenlerinde, gazın gerçek termodinamik özellikleri esas alınmış ve hesaplamalar CoolProp veri tabanından alınan sıcaklık–basınç bağımlı değerlerle gerçekleştirilmiştir.

Modelleme kapsamında ilk olarak, sabit basınç değerlerine ve eşit hacimlere sahip depo tankları içeren bir başlangıç senaryosu tanımlanmıştır. Bu senaryoda, düşük, orta ve yüksek basınç seviyeleri sırasıyla 130 bar, 205 bar ve 250 bar olarak belirlenmiş; her seviyedeki depo grubunun toplam hacmi 2400 litre olacak şekilde eşitlenmiştir. Simülasyonun başlangıcında tüm depo tanklarında yaklaşık 15 bar basınca sahip doğal gaz bulunmaktadır. Bu değer, doğal gaz şebekesinden gelen giriş basıncını ve önceki dolum döngüsünden kalan artık gazı temsil etmektedir. Modelde kompresör çalıştırıldığında, gaz üç kademeli sıkıştırma yapısı boyunca basınçlandırılarak ilgili depo tank grubuna yönlendirilmekte, dolum sırası ise mantıksal kontrol algoritması ile belirlenmektedir. Böylece, önce düşük basınçlı, ardından orta ve yüksek basınçlı tanklar sırasıyla doldurulmakta ve dolum süreci tamamlanmaktadır.

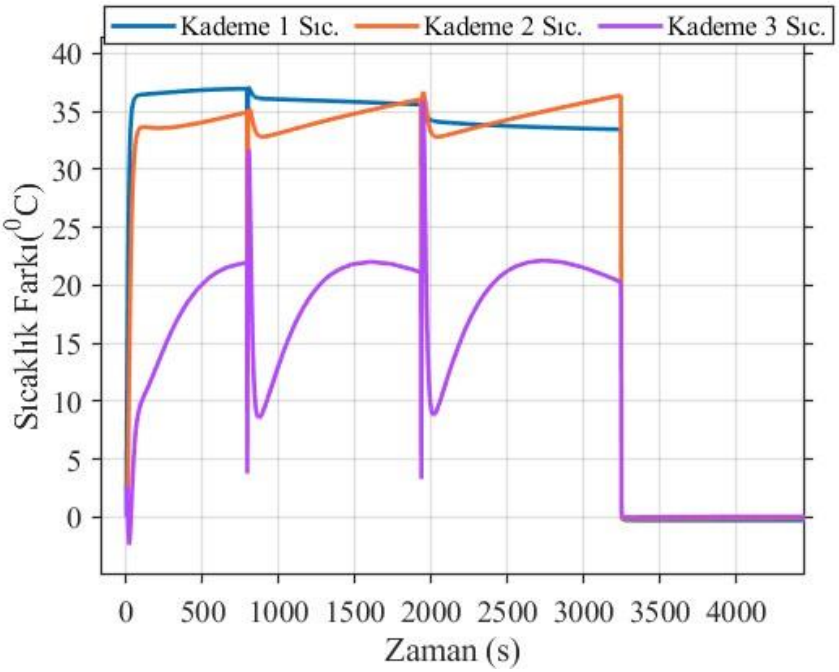


Şekil 4.16. Kompresör kademelerine ait çıkış basınçları ile düşük, orta ve yüksek basınçlı depo tanklarının dolum süresince basınç değişimleri

Şekil 4.16'da, kompresörün üç kademesinden sonra elde edilen çıkış basınçları ile birlikte, düşük, orta ve yüksek basınçlı depo tanklarının zaman içerisindeki basınç değişimleri gösterilmektedir. Kompresör çalıştırıldığında, gaz sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü kademelerden geçerek kademeli olarak sıkıştırılmakta ve ilgili basınç

seviyesindeki depo grubuna yönlendirilmektedir. Dolum sırası kontrol algoritmasıyla belirlenmekte olup, önce düşük basınçlı tankların, ardından orta ve yüksek basınçlı tankların doldurulması sağlanmaktadır.

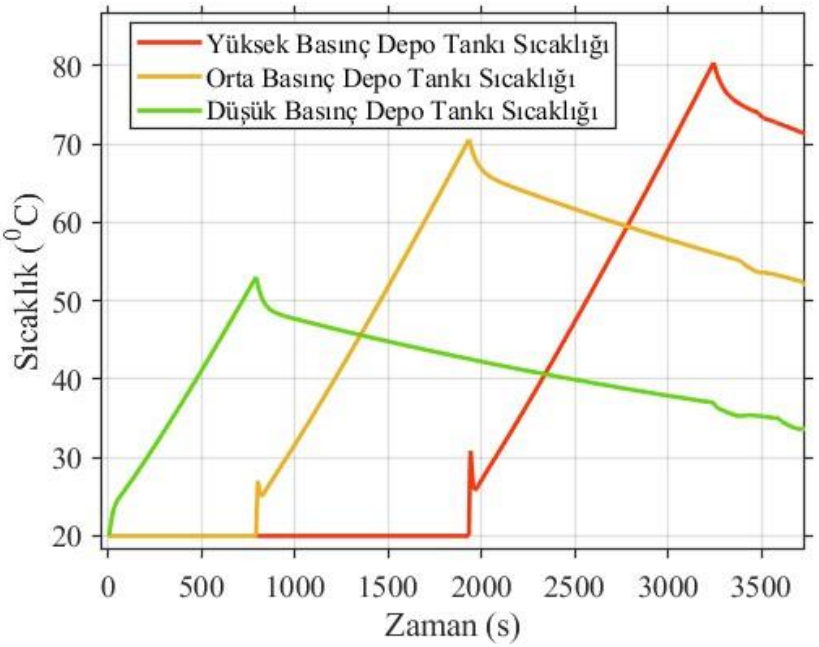
İlk dolum işleminin tamamlanması yaklaşık 3242 saniyede gerçekleşmiştir. Depolama tanklarının hedef basınçlara ulaşma süreleri incelendiğinde, düşük basınçlı tankların yaklaşık 791 saniyede 130 bar seviyesine ulaştığı; orta basınçlı tankların yaklaşık 1932 saniyede 205 bar seviyesine eriştiği ve yüksek basınçlı tankların dolumunun 3242 saniyede tamamlanarak 250 bar değerine ulaştığı görülmektedir. Bu süreç boyunca kompresör kademeleri ardışık olarak devreye girmekte; her kademeden sonra yer alan ara soğutucular, gazın sıcaklığını düşürerek sonraki kademeye daha verimli geçmesini sağlamaktadır. Basınç artışları incelendiğinde, her bir kademenin belirli bir basınç düzeyine ulaştığı ve bu artışların depo tankı dolum süreciyle senkronize şekilde ilerlediği gözlemlenmektedir.



Şekil 4.17. Kompresör kademelerine ait giriş ve çıkış sıcaklık farklarının zamanla değişimi (ilk dolum döngüsü)

Kompresörün üç kademesi arasında gerçekleşen ısı transferine ilişkin değerlendirme, her kademede gazın ısı eşanjörüne giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark üzerinden yapılmıştır. Şekil 4.17'de, ilk dolum döngüsü boyunca her bir kademeye ait sıcaklık farklarının zaman içerisindeki değişimi sunulmaktadır. Bu sıcaklık farkı, gazın her kademede sıkıştırılmasının ardından ısı eşanjöründen geçerken maruz kaldığı soğutma miktarını temsil etmektedir.

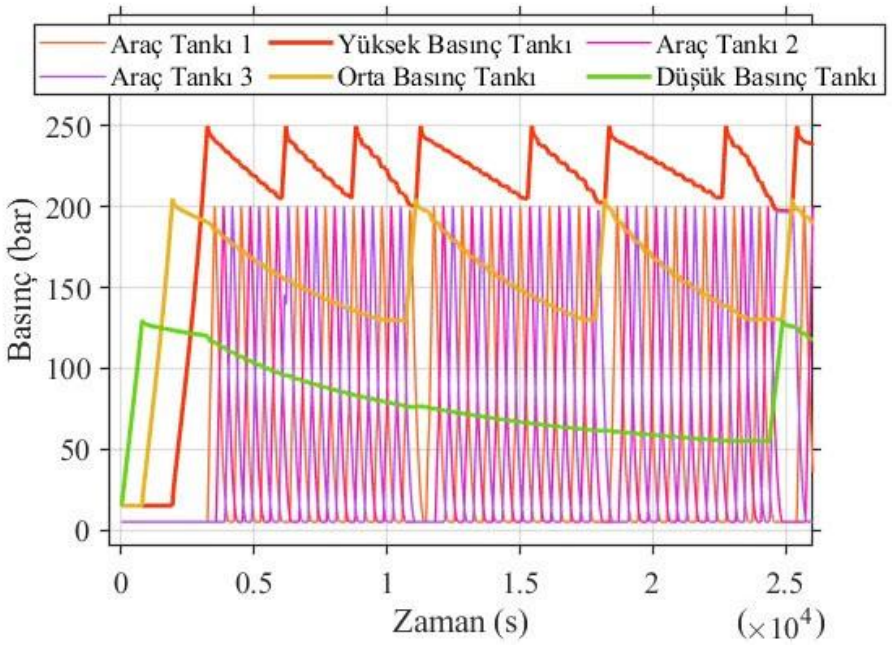
Birinci ve ikinci kademelerdeki sıcaklık farkı büyük oranda sabit bir seyir izlemekte ve 33–37 °C aralığında kalmaktadır. Bu durum, soğutma sisteminin bu kademelerde kararlı biçimde çalıştığını göstermektedir. Üçüncü kademede ise sıcaklık farkı daha düşüktür ve zamanla sınırlı değişim göstermektedir. Bu durum, sistemde kullanılan soğutma sıvısının dolaşım yapısına bağlıdır. Soğutucu akışkan, sistemde ilk olarak birinci kademeden sonra devreye girmekte, ardından sırasıyla ikinci ve üçüncü kademelerden geçerek sistemden çıkmaktadır. Bu nedenle, üçüncü kademeye ulaştığında akışkanın sıcaklığı artmakta ve soğutma kapasitesi göreli olarak azalmaktadır. Ayrıca, bu kademede gaz en yüksek basınca ulaştığı için yoğunluğu ve sıcaklığı artmakta, bu da eşanjör tarafından uzaklaştırılabilecek ısı miktarını sınırlamaktadır.



Şekil 4.18. Depolama tanklarının dolum süreci boyunca gözlenen sıcaklık değişimleri

Şekil 4.18'de, düşük, orta ve yüksek basınçlı depolama tanklarının sıcaklık değişimleri zaman ekseninde gösterilmiştir. Gazın dolumu sırasında basınç artışına ek olarak sıcaklık da önemli ölçüde artmakta, bu da hem tank malzemesi üzerindeki yükleri hem de sistemin termodinamik dengesini doğrudan etkilemektedir. Grafik, her bir tank grubunun dolum sırasına bağlı olarak sıcaklık artışının nasıl başladığını ve dolum sona erdikten sonra sıcaklıkların zamanla nasıl azaldığını ortaya koymaktadır.

Düşük basınçlı tankların dolumu sırasında sıcaklık yaklaşık 20 °C'den başlayarak 53 °C seviyesine kadar yükselmiş, ardından dolum sona erdiğinde belirgin bir soğuma eğilimi göstermiştir. Orta basınçlı tank grubunda sıcaklık 71 °C'ye kadar yükselmiş, yüksek basınçlı tanklarda ise 80,4 °C seviyelerine ulaşmıştır. Bu durum, gazın dolum sürecinde sahip olduğu basınca bağlı olarak tank sıcaklıklarının da giderek daha yüksek değerlere ulaştığını göstermektedir. Her tank grubunda dolum süreci tamamlandıktan sonra sıcaklıklar zamanla azalmaya başlamış, bu da çevreyle olan ısı transferinin etkisini yansıtmaktadır.

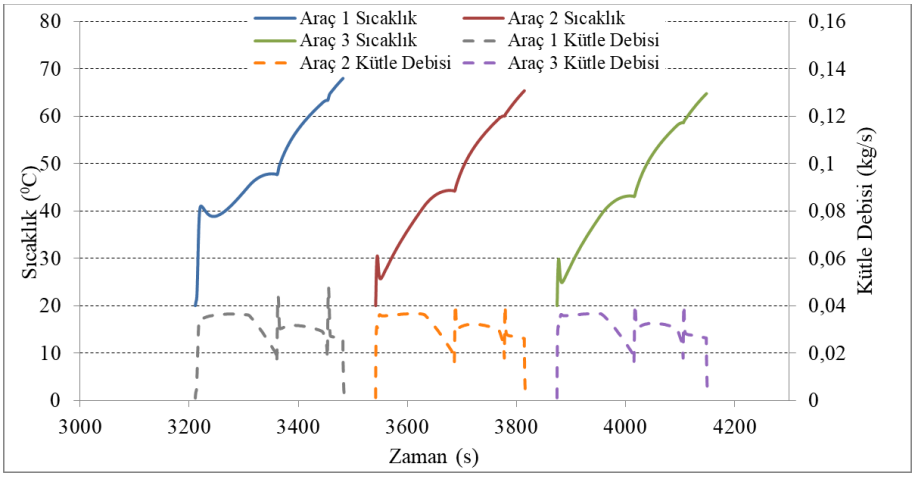


Şekil 4.19. Araç ve depo tanklarının yaklaşık ilk yedi saatlik süre boyunca gözlenen basınç değişimleri

Şekil 4.19'da, araç dolum döngüleri ile depo tanklarının basınç değişimleri birlikte gösterilmektedir. Grafik, simülasyonun yaklaşık ilk yedi saatlik kısmını kapsamaktadır. Bu süre boyunca üç araç tankı sırayla doluma alınmakta, her birinin 5 bar seviyesinden başlayan basıncı 200 bar değerine ulaştırılmaktadır. Dolumu tamamlanan araç tankı sistemden çıkarılmakta ve sıradaki araç devreye alınarak döngü devam etmektedir. Grafik üzerinde araç tanklarının basıncı hızlı bir şekilde artmakta ve dolum sona erdiğinde ani biçimde sıfırlanmaktadır. Bu döngü, araçların sırayla doldurulduğu ve sistemin sürekli çalıştığı bir yapıyı yansıtmaktadır.

Araçlara gaz aktarımı sırasında depo tanklarının basınçları ise daha yavaş ve kademeli bir değişim göstermektedir. Sistem her dolum işlemine düşük basınçlı depo tanklarından başlamakta; bu tank grubunun basıncı, dolumu yapılacak araç tankının basıncından düşükse akış, orta basınçlı tanklara yönlendirilmekte; orta basınç seviyesi de yetersiz kaldığında yüksek basınçlı tanklar devreye alınmaktadır. Bu kontrol algoritması, sistemin enerji verimliliğini artırmakta ve yüksek basınçlı tankların yalnızca gerektiğinde kullanılmasını sağlamaktadır.

Grafik dikkatle incelendiğinde, düşük basınçlı tank grubunun sistemin temel gaz kaynağı olarak daha uzun süre aktif kaldığı, orta basınçlı tankların orta yoğunlukta kullanıldığı ve yüksek basınçlı tankların ise yalnızca sınırlı sürelerde devreye girdiği görülmektedir. Her depo tankı grubunun basınç seviyeleri dolum işlemleri sırasında kademeli olarak düşmekte ve belirli bir eşik değerinin altına inildiğinde kompresör devreye girerek tankları yeniden doldurmaktadır. Bu davranış, sistemin dolum mantığının ve kontrol algoritmasının beklenen şekilde çalıştığını göstermektedir.



Şekil 4.20. İlk üç araç dolumu sırasında araç tankı sıcaklıkları ve anlık kütle debileri

Şekil 4.20'de, sistemin ilk üç araca yaptığı dolum işlemleri sırasında araç tankı sıcaklıklarının ve anlık kütle debilerinin zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Her bir dolum işlemi belirli bir zaman aralığında gerçekleşmekte olup, gaz akışı ve ısı transferine ilişkin karakteristik davranış bu grafik üzerinden izlenebilmektedir.

Dolum işlemleri sırasında araç tankı sıcaklıklarında belirgin bir artış gözlenmiştir. Birinci araçta sıcaklık yaklaşık 68 °C'ye, ikinci araçta 65 °C'ye, üçüncü araçta ise 64 °C'ye kadar yükselmiştir. Başlangıç sıcaklıklarının tüm araçlarda yaklaşık olarak ortam sıcaklığı olan 20 °C civarında olduğu kabul edilmektedir. Sıcaklık artışları yalnızca gazın dolum sırasında sıkıştırılmasından değil, aynı zamanda kullanılan gazın henüz soğumamış, yüksek sıcaklıklı depo tanklarından geliyor olmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle ilk araç dolumlarında, kompresör tarafından yeni doldurulan ve çevreye ısı kaybı yaşamamış depo tanklarındaki sıcak gaz, araç tankı sıcaklıklarında yüksek artışlara neden olmaktadır. Sistem çalışmaya devam ettikçe ve depo tanklarının sıcaklığı çevreyle etkileşim sonucu düştükçe, sonraki dolumlarda bu artış daha sınırlı düzeyde kalmaktadır.

Kütle debisi, dolumun başlangıcında yüksek olup zamanla azalan bir eğilim sergilemektedir. Bu tipik profil, dolum sırasında basınç farkının giderek azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, araç tankı basıncının yükselmesiyle birlikte depo tankıyla olan basınç farkının azalmasına ve dolayısıyla gaz akış hızının düşmesine

bağlanmaktadır. Dolum süreci boyunca kütle debisi değerlerinde zaman zaman kısa süreli dalgalanmalar gözlenmektedir. Bu dalgalanmalar, dolum hattındaki basınç farklarının anlık değişimlerinden, kontrol vanalarının açılma–kapanma hareketlerinden ve akış yönünün değiştiği geçiş anlarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, sistemdeki valflerin ve akış denetim birimlerinin tepki süreleri ile sinyal gecikmeleri de bu tür salınımları tetiklemektedir. Bu davranışlar, fiziksel dolum sistemlerinde doğal olarak ortaya çıkan geçici durumlar olarak değerlendirilmelidir.

4.5. Kademeli Depolama Sistemi için Çok Amaçlı Optimizasyon

Kademeli basınç yapısına sahip CNG dolum sisteminin başlangıç konfigürasyonunda, düşük, orta ve yüksek basınçlı depo tankları sırasıyla 130 bar, 205 bar ve 250 bar basınç seviyelerine ve eşit hacimlere (her biri 2400 litre) sahiptir. Simülasyon, bu yapı altında 24 saatlik süre boyunca işletilmiş ve sistemin temel performans parametreleri değerlendirilmiştir. Bu süre zarfında kompresör, düşük basınçlı tankları 4 kez, orta basınçlı tankları 12 kez ve yüksek basınçlı tankları 24 kez yeniden doldurmak üzere devreye girmiştir. Depolama tanklarının bu kadar sık doldurulması, kompresörün daha uzun süre çalışmasına neden olmakta ve enerji tüketimini artırmaktadır. Ayrıca, valfler ve diğer mekanik bileşenlerin daha sık devreye girmesi, ekipmanlarda aşınma ve arıza riskini artırarak bakım ihtiyacını sıklaştırmaktadır.

Aynı süre boyunca toplamda 218 araç tankı doldurulmuş, her araç için ortalama 9,46 kg gaz aktarılmış ve kompresörün birim kütle başına yaptığı özgül iş 0,1938 kWh/kg olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, sistemin çalıştığını ve tanımlanan dolum işlevlerini yerine getirdiğini göstermektedir. Ancak simülasyon sonuçları, toplam dolum süresi, kompresör çevrim sıklığı ve enerji tüketimi açısından değerlendirildiğinde, sistemin daha yüksek verimle çalışabileceğine işaret etmektedir. Bu nedenle, daha az kompresör çevrimiyle daha fazla araç doldurulması ve ortalama dolum miktarının artırılması gibi hedefler doğrultusunda iyileştirme çalışmaları yapılabilir. Mevcut yapılandırma, tanımlanan modelleme koşulları altında işlevini yerine getirmektedir. Ancak sistemin enerji tüketimi, dolum süresi ve araç başına aktarılan gaz miktarı gibi parametreler üzerinden değerlendirilerek, bu yapılandırmada iyileştirme yapılmasının mümkün olup

olmadığını araştırmak amacıyla çok hedefli bir optimizasyon süreci yürütülmüştür. Bu kapsamda, sistemin temel yapılandırma parametreleri olan depo basınç seviyeleri ve hacim oranları yeniden ele alınmış, performans ölçütleri olarak da dolumu tamamlanan araç sayısı, araç başına ortalama dolum kütlesi ve kompresörün özgül enerji tüketimi esas alınmıştır. Değişken sayısının fazla olması ve sistemin dinamik yapısı nedeniyle, deneysel tasarım yaklaşımı olarak Taguchi yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem sayesinde çok sayıda senaryo, az sayıda simülasyonla sistematik biçimde test edilebilmiş; ardından elde edilen çoklu çıktılar Gri İlişki Analizi yöntemiyle birleştirilerek en uygun parametre kombinasyonu belirlenmiştir.

4.5.1. Depolama basınçlarının optimizasyonu

Çizelge 4.5. Kontrol faktörleri ve seviyeleri (depo basınçları)

Kontrol Faktörleri	**Yüksek Basınç ($P_{yüksek}$) [bar]**	**Orta Basınç (P_{orta}) [bar]**	**Düşük Basınç ($P_{düşük}$) [bar]**
Seviye 1	250	205	130
Seviye 2	240	185	110
Seviye 3	230	165	90
Seviye 4	220	145	70

Depolama sisteminde yer alan yüksek, orta ve düşük basınçlı tanklara ait basınç seviyelerinin dolum performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla, Taguchi deney tasarımı yaklaşımı uygulanmıştır. Bu kapsamda üç kontrol faktörü belirlenmiş ve her biri dört seviyede tanımlanmıştır. Seçilen faktörler, kademeli dolum sürecinin fiziksel karakterini doğru biçimde yansıtacak şekilde belirlenmiş; her bir basınç düzeyinin sistem davranışına etkisi bağımsız olarak gözlemlenmek istenmiştir. Çizelge 4.5'te analizde kullanılan kontrol faktörleri ve bu faktörlere ait seviyeler ayrıntılı olarak verilmiştir. Deney kombinasyonlarının oluşturulmasında dört seviyeli faktörler için uygun olan L16 ortogonal dizi tercih edilmiştir. Bu yapı sayesinde, çok sayıda olası senaryo arasından yalnızca 16 tanesi test edilerek sistematik ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.6. L16 ortogonal diziye göre deney koşulları ve çıktılar

	Kontrol Faktörleri ve Seviyeleri			Sonuçlar		
Simülasyon No	$P_{yüksek}$	P_{orta}	$P_{düşük}$	$n_{araç}$	$m_{ortalama}$ (kg)	$w_{komp.}$ (kWh/kg)
1	250	205	130	218	9,46	0,1938
2	250	185	110	214	9,43	0,1946
3	250	165	90	221	9,41	0,1887
4	250	145	70	229	9,43	0,1898
5	240	205	110	217	9,43	0,1910
6	240	185	130	219	9,41	0,1879
7	240	165	70	217	9,36	0,1930
8	240	145	90	217	9,43	0,1881
9	230	205	90	214	9,42	0,1875
10	230	185	70	220	9,39	0,1898
11	230	165	130	213	9,41	0,1923
12	230	145	110	216	9,40	0,1859
13	220	205	70	216	9,41	0,1904
14	220	185	90	210	9,42	0,1862
15	220	165	110	218	9,39	0,1835
16	220	145	130	221	9,39	0,1856

Çizelge 4.6'da, L16 ortogonal dizisine göre oluşturulan 16 farklı deney koşuluna ait kontrol faktörleri ve bu koşullarda elde edilen performans çıktıları sunulmuştur. Her bir simülasyon, 24 saatlik işletim süresi boyunca dinamik olarak değerlendirilmiş; sistemden doldurulan toplam araç sayısı, araç başına ortalama dolum miktarı ve kompresörün birim kütle başına harcadığı özgül enerji değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.7. L16 ortogonal diziye göre sinyal/gürültü (S/G) oranları

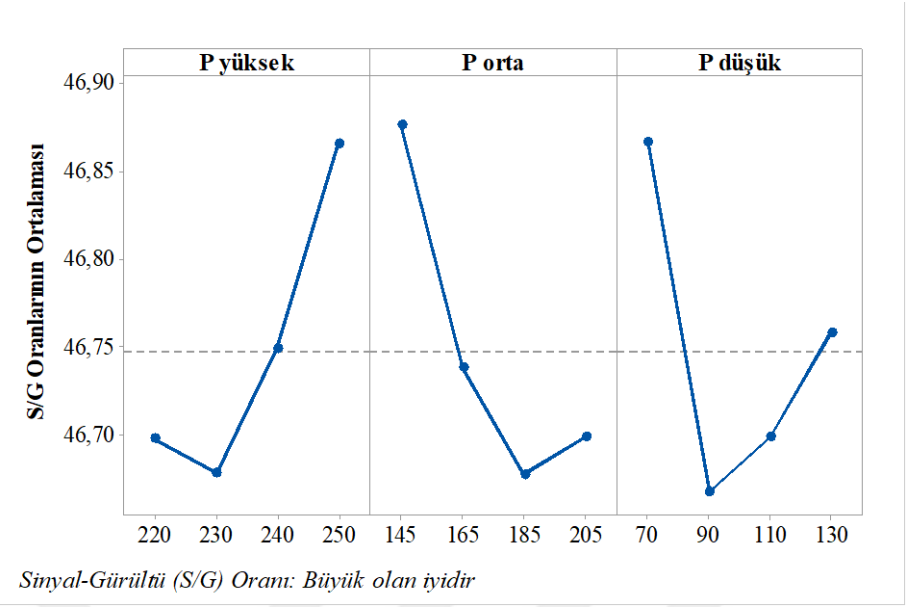
	Sinyal Gürültü Oranları		
Simülasyon No	$n_{araç}$	$m_{ortalama}$	$w_{komp.}$
1	46,77	19,52	14,25
2	46,61	19,49	14,22
3	46,89	19,47	14,49
4	47,20	19,49	14,43
5	46,73	19,49	14,38
6	46,81	19,48	14,52

7	46,73	19,43	14,29
8	46,73	19,49	14,51
9	46,61	19,48	14,54
10	46,85	19,46	14,43
11	46,57	19,47	14,32
12	46,69	19,46	14,61
13	46,69	19,47	14,41
14	46,44	19,48	14,60
15	46,77	19,45	14,73
16	46,89	19,45	14,63

Sinyal/gürültü (S/G) oranları ise Çizelge 4.7'da verilmiştir. Araç sayısı ve ortalama dolum miktarı için "en büyük en iyidir", özgül kompresör enerjisi için ise "en küçük en iyidir" yaklaşımı esas alınarak hesaplanan bu oranlar, her bir performans ölçütünün istatistiksel kararlılığını değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

Çizelge 4.8. Araç sayısı performans ölçütüne göre S/G oranlarının seviye ortalamaları

Seviye	**$P_{yüksek}$**	**P_{orta}**	**$P_{düşük}$**
1	46,7	46,88	46,87
2	46,68	46,74	46,67
3	46,75	46,68	46,7
4	46,87	46,7	46,76
Delta	0,1871	0,1982	0,1984
Rank	3	2	1
∑ Delta	0,5837		
w (%)	48,82		



Şekil 4.21. Araç sayısı için S/G oranı ortalamalarının faktör seviyelerine göre değişimi

Araç dolum sayısı performans ölçütü açısından kontrol faktörlerinin seviyelerine göre ortalama S/G oranları Çizelge 4,8'de sunulmuş ve bu değerlere ilişkin eğilim grafiği Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Şekil ve çizelge birlikte değerlendirildiğinde, sistem performansı üzerinde en belirgin etkiye sahip faktörün düşük basınç seviyesi ($P_{düşük}$) olduğu görülmektedir. Bu faktörde en yüksek ortalama S/G oranı, 70 bar seviyesinde elde edilmiştir. Benzer şekilde, orta basınç faktörü (P_{orta}) için en yüksek performans 145 bar seviyesinde gözlenmiş, yüksek basınç faktörü ($P_{yüksek}$) açısından ise en uygun değer 250 bar olarak belirlenmiştir.

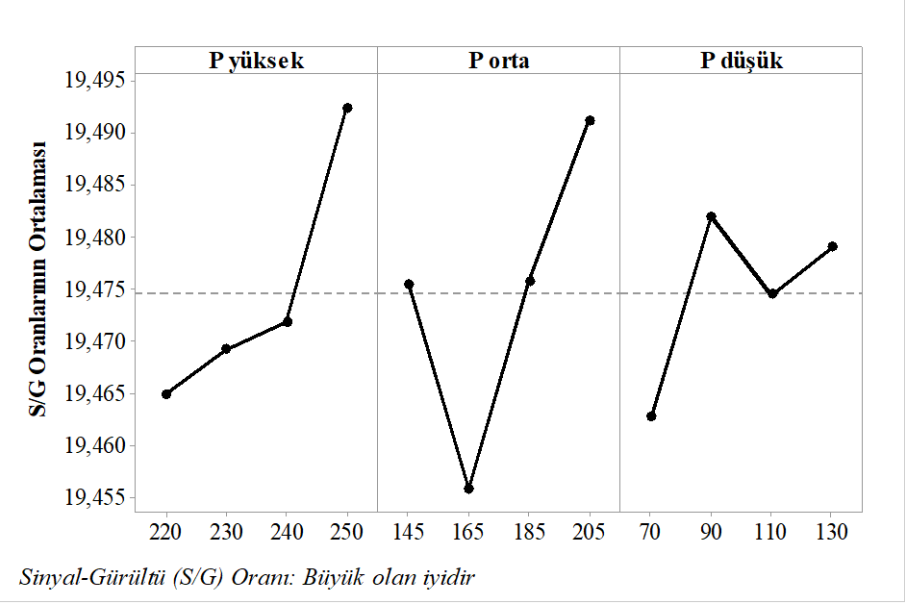
Çizelgede yer alan Δ (delta) değerleri, her bir faktörün araç dolum sayısına olan etkisini nicel olarak ortaya koymaktadır. Buna göre, düşük basınç faktörü 0,1984 ile en yüksek delta değerine sahip olup sistem çıktısı üzerindeki etkisinin en fazla olduğunu göstermektedir. Orta basınç faktörünün delta değeri 0,1982, yüksek basınç faktörünün delta değeri ise 0,1871 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre kontrol faktörlerinin araç dolum performansı üzerindeki etki sıralaması şu şekildedir: $P_{düşük} > P_{orta} > P_{yüksek}$.

Sinyal/gürültü oranlarının "büyük olan iyidir" kriterine göre yorumlandığı bu analizde, en yüksek ortalamaların elde edildiği seviye kombinasyonu $P_{yüksek}$= 250 bar, P_{orta}= 145

bar, $P_{düşük}$= 70 bar olarak belirlenmiş ve bu yapı, araç dolum sayısının artırılmasına en fazla katkıyı sağlayan konfigürasyon olarak öne çıkmıştır.

Çizelge 4.9. Ortalama dolum miktarı performans ölçütüne göre S/G oranlarının seviye ortalamaları

Seviye	$P_{yüksek}$	P_{orta}	$P_{düşük}$
1	19,46	19,48	19,46
2	19,47	19,46	19,48
3	19,47	19,48	19,47
4	19,49	19,49	19,48
Delta	0,0274	0,0353	0,0192
Rank	2	1	3
∑ Delta	0,0819		
w (%)	6,85		



Şekil 4.22. Ortalama Dolum Miktarı İçin S/G Oranı Ortalamalarının Faktör Seviyelerine Göre Değişimi

Araç başına aktarılan ortalama gaz kütlesi performans ölçütüne göre, kontrol faktörlerinin seviye ortalamalarına ait S/G oranları Çizelge 4.9'da sunulmuş, bu verilere karşılık gelen değişim eğrisi ise Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde, en

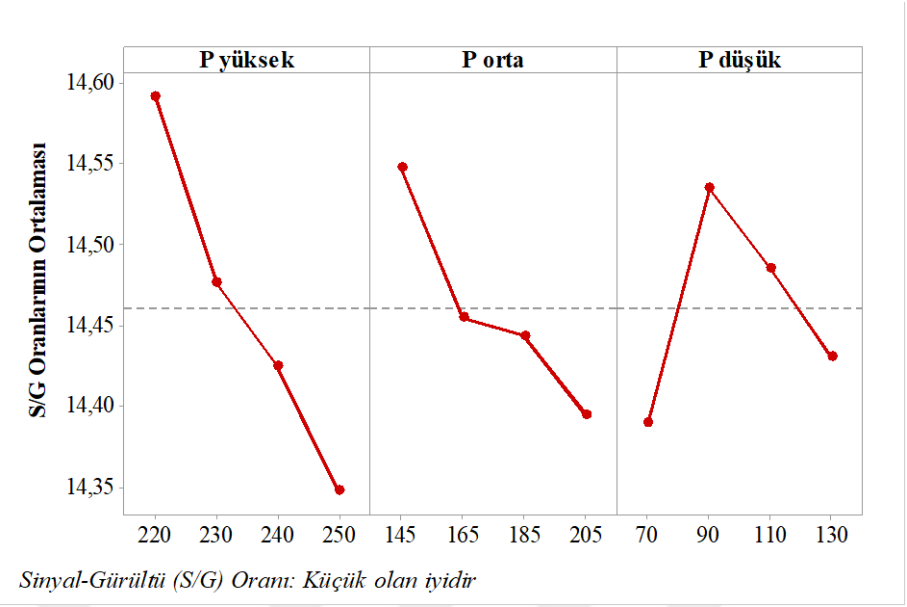
yüksek ortalama S/G oranları yüksek basınç faktöründe 250 bar, orta basınç faktöründe 205 bar ve düşük basınç faktöründe 90 bar seviyelerinde elde edilmiştir. Özellikle orta basınç faktöründe 165 bar seviyesinin belirgin bir performans düşüşüne neden olduğu; diğer seviyelerde ise görece yüksek performansın sürdürüldüğü görülmektedir.

Her bir faktörün dolum miktarı üzerindeki göreli etkisini belirlemek amacıyla hesaplanan delta (Δ) değerleri sırasıyla 0,0353 (P_{orta}), 0,0274 ($P_{yüksek}$) ve 0,0192 ($P_{düşük}$) olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre ortalama dolum performansı üzerinde en etkili parametrenin orta basınç seviyesi olduğu, bunu yüksek ve düşük basınç faktörlerinin izlediği anlaşılmaktadır. Şekil 4.21'deki grafik eğilimleri de bu sıralamayı desteklemektedir.

Bu verilere göre, ortalama dolum miktarı performansına en fazla katkıyı sağlayan kontrol faktörü kombinasyonu, $P_{yüksek}$ = 250 bar, P_{orta} = 205 bar ve $P_{düşük}$ = 90 bar olarak belirlenmiştir. Bu seviye kombinasyonu, Taguchi yöntemiyle elde edilen "büyük olan iyidir" yaklaşımıyla hesaplanan sinyal/gürültü oranlarına göre, sistemin araçlara aktardığı ortalama gaz miktarını maksimize eden yapı olarak öne çıkmaktadır.

Çizelge 4.10. Özgül kompresör enerjisi performans ölçütüne göre S/G oranlarının seviye ortalamaları

Seviye	**$P_{yüksek}$**	**P_{orta}**	**$P_{düşük}$**
1	14,59	14,55	14,39
2	14,48	14,45	14,53
3	14,42	14,44	14,49
4	14,35	14,4	14,43
Delta	0,24	0,15	0,14
Rank	1	2	3
∑ Delta	0,53		
w (%)	44,33		



Şekil 4.23. Özgül Kompresör Enerjisi İçin S/G Oranı Ortalamalarının Faktör Seviyelerine Göre Değişimi

Özgül kompresör enerjisi ($w_{komp.}$) performans ölçütüne göre, kontrol faktörlerine ait seviye ortalamalarının S/G oranları Çizelge 4.10'da verilmiş, bu verilerin eğilimleri ise Şekil 4.23'te sunulmuştur. Bu değerlendirmede "küçük olan iyidir" kriteri esas alınmış ve enerji tüketiminin azaltılması hedeflenmiştir. Grafik incelendiğinde, yüksek basınç faktöründe ($P_{yüksek}$) seviye arttıkça S/G oranı düşmekte; en düşük değer 220 bar seviyesinde elde edilmiştir. Bu durum, kompresörün birim kütle başına daha az enerji harcadığı yapılandırmanın $P_{yüksek}$ = 220 bar olduğunu göstermektedir.

Orta basınç faktörü (P_{orta}) için en düşük ortalama S/G değeri 145 bar seviyesinde gözlenmiştir. Bu faktörde seviye arttıkça S/G oranının artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Düşük basınç faktörü ($P_{düşük}$) açısından ise en düşük değer 70 bar seviyesinde elde edilmiştir. Bu durum, dolum sistemi açısından enerji verimliliğini artırmak için düşük basınçlı tank grubunda daha düşük seviyelerin tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Delta (Δ) değerleri incelendiğinde, özgül enerji tüketimi üzerinde en belirgin etkinin yüksek basınç faktöründe olduğu, orta ve düşük basınç faktörlerinin ise daha sınırlı etkiler gösterdiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, özgül kompresör enerjisini en aza indiren

optimum seviye kombinasyonu $P_{yüksek}$ = 220 bar, P_{orta} = 145 bar ve $P_{düşük}$ = 70 bar olarak belirlenmiştir.

Gri İlişkisel Analiz (GRA) yöntemi, çok sayıda performans ölçütünün eş zamanlı olarak değerlendirilmesine olanak tanıyan çok amaçlı bir karar verme tekniğidir. Bu çalışmada, L16 ortogonal dizi ile elde edilen 16 farklı deney koşuluna ait üç temel performans ölçütü olan sistemden doldurulan araç sayısı, araç başına ortalama dolum kütlesi ve kompresörün özgül enerji tüketimi birlikte analiz edilmiştir. Amaç, bu kriterlerin tümünü aynı anda optimize eden en uygun basınç konfigürasyonunu belirlemektir.

Gri İlişkisel Analiz'in ilk aşamasında, araç dolum sayısı, ortalama dolum miktarı ve özgül kompresör enerjisi ölçütlerine ait tüm deneysel sonuçlar normalize edilmiştir. Bu işlemde araç sayısı ve ortalama dolum miktarı için "büyük olan iyidir", özgül kompresör enerjisi için ise "küçük olan iyidir" yaklaşımı benimsenmiştir. Normalize edilmiş değerlerin hesaplanmasında Denklem (3.14) ve (3.15) kullanılmıştır.

Normalize edilen değerler Çizelge 4.11'de sunulmuştur. Bu tablo, her bir performans ölçütü için 16 deney kombinasyonuna ait karşılaştırılabilir boyutsuz değerleri göstermekte ve sonraki analiz basamaklarında kullanılmak üzere temel oluşturmaktadır.

Çizelge 4.11. Normalize edilmiş performans ölçütleri

	Normalizasyon		
Simülasyon No	$\mathbf{n_{araç}}$	$\mathbf{m_{ortalama}}$	$\mathbf{w_{komp.}}$
1	0,4211	1	0,0726
2	0,2105	0,6774	0
3	0,5789	0,4524	0,5345
4	1	0,7350	0,4290
5	0,3684	0,6972	0,3258
6	0,4737	0,5287	0,6026
7	0,3684	0	0,1397
8	0,3684	0,7211	0,5814

9	0,2105	0,6338	0,6367
10	0,5263	0,3208	0,4296
11	0,1579	0,4793	0,2015
12	0,3158	0,3916	0,7829
13	0,3158	0,4828	0,3766
14	0	0,5942	0,7591
15	0,4211	0,2965	1
16	0,5789	0,2601	0,8141

Genel gri ilişki derecesi (GRG), her bir performans ölçütünün gri ilişki katsayısına belirli ağırlıklar atanarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada araç dolum sayısı, ortalama dolum miktarı ve özgül enerji tüketimi kriterlerine sırasıyla %48,82, %6,85 ve %44,33 ağırlık verilmiştir. Bu doğrultuda genel gri ilişki derecesi Denklem (4.2) ile hesaplanmıştır:

$$GRG = 0.4882\ GRC_{n_{araç}} + 0.0685\ GRC_{m_{ortalama}} + 0.4433\ GRC_{w_{Komp.}} \quad (4.2)$$

Çizelge 4. 12. Gri ilişki katsayıları, genel gri ilişki dereceleri ve sıralamalar

	Gri İlişki Katsayısı			**Gri İlişki Derecesi**	**Sıralama**
Sim. No	$\mathbf{n_{araç}}$	$\mathbf{m_{ortalama}}$	$\mathbf{w_{komp.}}$		
1	0,4634	1,0000	0,3503	0,4500	11
2	0,3878	0,6078	0,3333	0,3787	16
3	0,5429	0,4773	0,5179	0,5273	5
4	1,0000	0,6536	0,4669	0,7399	1
5	0,4419	0,6228	0,4258	0,4471	12
6	0,4872	0,5148	0,5572	0,5201	6
7	0,4419	0,3333	0,3676	0,4015	14
8	0,4419	0,6419	0,5443	0,5010	7
9	0,3878	0,5773	0,5792	0,4856	10
10	0,5135	0,4240	0,4671	0,4868	9

11	0,3725	0,4899	0,3851	0,3861	15
12	0,4222	0,4511	0,6973	0,5461	4
13	0,4222	0,4915	0,4451	0,4371	13
14	0,3333	0,5520	0,6748	0,4997	8
15	0,4634	0,4154	1,0000	0,6980	2
16	0,5429	0,4033	0,7290	0,6158	3

Gri İlişki Katsayısı ve Gri İlişki Derecesi analizlerine göre en iyi performansı gösteren konfigürasyon, 4 numaralı senaryo olmuştur. Bu konfigürasyonda yüksek basınç tank seviyesi 250 bar, orta basınç 145 bar, düşük basınç ise 70 bar olarak belirlenmiştir. Bu deney koşullarında sistemden dolum yapan araç sayısı 229, araç başına ortalama dolum miktarı 9,43 kg ve kompresörün birim kütle başına harcadığı özgül enerji 0,1898 kWh/kg olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, dolum performansı ile enerji tüketimi arasında dengeli bir yapı sunmakta ve en yüksek genel gri ilişki derecesi olan 0,7399 değeriyle sistem optimizasyonu açısından en uygun konfigürasyonu temsil etmektedir.
Buna karşılık en düşük performansa sahip konfigürasyon ise 2 numaralı senaryo olarak belirlenmiştir. Bu senaryoda yüksek basınç 250 bar, orta basınç 185 bar ve düşük basınç 110 bar olarak tanımlanmıştır. İlgili deneyde araç sayısı 214, ortalama dolum miktarı 9,43 kg ve özgül enerji tüketimi 0,1946 kWh/kg olarak hesaplanmıştır. Bu senaryo için elde edilen genel gri ilişki derecesi 0,3787 olup, GRA yöntemi açısından sistem performansının en zayıf olduğu konfigürasyon olarak değerlendirilmektedir.

4.5.2. Depo hacimlerinin oranına göre optimizasyon

Bu aşamada gerçekleştirilen hacim optimizasyonu, bir önceki adımda yapılan basınç optimizasyonu sonucunda elde edilen en uygun basınç konfigürasyonu temel alınarak yürütülmüştür. Araç dolum sayısı, ortalama dolum kütlesi ve özgül enerji tüketimi gibi performans ölçütlerinin birlikte değerlendirildiği bu konfigürasyon altında, tank hacimlerinin sistem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu sayede, kademeli depolama yapısına sahip istasyonlar için yalnızca basınç seviyeleri değil, aynı zamanda hacim dağılımı açısından da en verimli yapı belirlenmiştir.

Analizde, toplam depo hacmi V_{toplam} sabit tutulmuş; bu toplam hacim, düşük, orta ve yüksek basınç seviyelerine sahip tanklar arasında farklı oranlarda paylaştırılmıştır. Toplam depo hacmi V_{toplam}, 150 litrelik 48 tanktan oluşmakta olup 7200 litredir. Hacim dağılımını tanımlamak amacıyla dört farklı boyutsuz parametre tanımlanmıştır. Bunlardan ilk üçü, her bir basınç seviyesindeki tank hacminin toplam hacme oranını göstermektedir. Bu oranlar sırasıyla Denklem (4.3), (4.4) ve (4.5) ile ifade edilmektedir:

$$\overline{v}_{düşük} = \frac{V_{düşük}}{V_{düşük} + V_{orta} + V_{yüksek}} = \frac{V_{düşük}}{V_{toplam}} \tag{4.3}$$

$$\overline{v}_{orta} = \frac{V_{orta}}{V_{düşük} + V_{orta} + V_{yüksek}} = \frac{V_{orta}}{V_{toplam}} \tag{4.4}$$

$$\overline{v}_{yüksek} = \frac{V_{yüksek}}{V_{düşük} + V_{orta} + V_{yüksek}} = \frac{V_{yüksek}}{V_{toplam}} \tag{4.5}$$

Dördüncü boyutsuz parametre ise, orta basınçlı tank hacminin yüksek basınçlı tank hacmine oranını tanımlar ve Denklem (4.6) ile verilir:

$$\overline{v}_{o/y} = \frac{\overline{v}_{orta}}{\overline{v}_{yüksek}} = \frac{V_{orta}}{V_{yüksek}} \tag{4.6}$$

Çizelge 4.13. Depo hacmi analizi için kontrol faktörleri ve seviyeleri

Kontrol Faktörleri	$\overline{v}_{düşük}$	$\overline{v}_{o/y}$
Seviye 1	0,25	0,5
Seviye 2	0,5	1
Seviye 3	0,75	2

Yapılan analizde, $\overline{v}_{düşük}$ ve $\overline{v}_{o/y}$ parametreleri kontrol faktörleri olarak seçilmiş ve her biri için üç seviye tanımlanmıştır. Bu seviyeler, toplam hacim sabit kalmak koşuluyla farklı hacim dağılım senaryolarını sistematik biçimde değerlendirmeye olanak

sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri Çizelge 4.13'te sunulmuştur.

Çizelge 4.14. Hacim optimizasyonu deney sonuçları

	Kontrol Faktörleri		**Sonuçlar**		
Sim. No	$\overline{v}_{\text{düşük}}$	$\overline{v}_{o/y}$	$n_{araç}$	$m_{ortalama}$ **(kg)**	$w_{komp.}$ **(kWh/kg)**
1	0,25	0,5	231	9,511	0,200
2	0,25	1	227	9,456	0,194
3	0,25	2	229	9,358	0,185
4	0,5	0,5	226	9,335	0,188
5	0,5	1	224	9,290	0,184
6	0,5	2	229	9,209	0,177
7	0,75	0,5	231	9,021	0,175
8	0,75	1	229	8,979	0,173
9	0,75	2	229	8,941	0,170

Çizelge 4.14'de, depo hacmi optimizasyonuna yönelik Taguchi deney düzeni kapsamında yürütülen simülasyonlara ait sonuçlar sunulmaktadır. Bu analizde, düşük basınçlı depo hacminin toplam hacme oranı $\overline{v}_{\text{düşük}}$ ve orta–yüksek basınçlı depo hacimlerinin oranı $\overline{v}_{o/y}$ olmak üzere iki kontrol faktörü ele alınmıştır. Her iki faktör için üç seviye belirlenmiş ve bu seviyeler, L9 ortogonal dizisine uygun şekilde 9 farklı deney koşulu oluşturacak şekilde kombinasyonlanmıştır.

Her simülasyon koşulu altında, sistem performansını değerlendirmek amacıyla üç temel ölçüt hesaplanmıştır: 24 saat içinde doldurulan araç sayısı ($n_{araç}$), her araç için ortalama dolum kütlesi ($m_{ortalama}$, kg), ve kompresörün özgül enerji tüketimi ($w_{komp.}$, kWh/kg). Sonuçlar incelendiğinde, özellikle $\overline{v}_{\text{düşük}}$= 0,75 değerinde sistemin daha yüksek performans gösterdiği gözlemlenmektedir.

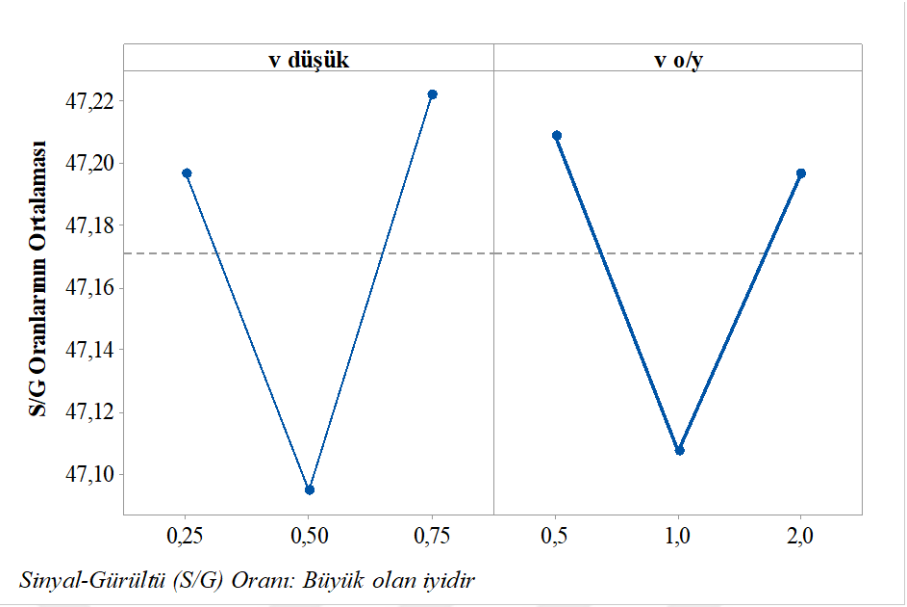
Çizelge 4. 15. L9 ortogonal diziye göre sinyal/gürültü (S/G) oranları

	Sinyal Gürültü Oranları		
Simülasyon No	$\mathbf{n_{araç}}$	$\mathbf{m_{ortalama}}$	$\mathbf{w_{komp.}}$
1	47,272	19,564	13,989
2	47,121	19,514	14,263
3	47,197	19,424	14,638
4	47,082	19,402	14,502
5	47,005	19,360	14,708
6	47,197	19,284	15,024
7	47,272	19,105	15,127
8	47,197	19,065	15,262
9	47,197	19,027	15,413

Çizelge 4.15'te sunulan sinyal ve gürültü oranları, her bir deney koşuluna karşılık gelen üç performans ölçütü için hesaplanmıştır. Bu oranlar, farklı hacim dağılımlarının sistem yanıtları üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Bu sayede hacim konfigürasyonlarının, performans parametreleri üzerindeki etkileri daha sistematik biçimde analiz edilebilmektedir.

Çizelge 4. 16. Araç dolum sayısı için kontrol faktörlerine ait seviye ortalamaları, delta ve ağırlık değerleri (S/G oranları)

Seviye	$\mathbf{\bar{v}_{düşük}}$	$\mathbf{\bar{v}_{o/y}}$
1	47,2	47,21
2	47,09	47,11
3	47,22	47,2
Delta	0,13	0,1
Rank	1	2
∑ Delta	0,23	
w (%)	10,31%	



Şekil 4.24. Araç dolum sayısı için kontrol faktörlerinin seviyelerine göre ortalama S/G oranlarının değişimi

Araç dolum sayısı performans ölçütü açısından hacim oranlarına karşılık gelen ortalama sinyal-gürültü (S/G) oranları Çizelge 4.16'da verilmiş; bu değerlere ilişkin eğilim grafiği ise Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Sistem performansı üzerinde en fazla etkiye sahip kontrol faktörünün düşük basınçlı depo hacminin toplam hacme oranı $\overline{v}_{düşük}$ olduğu görülmektedir. Bu faktörde en yüksek ortalama S/G oranı, $\overline{v}_{düşük}$=0,75 seviyesinde elde edilmiştir. Benzer biçimde, $\overline{v}_{o/y}$ oranı için en yüksek performans değeri $\overline{v}_{o/y}$ =0,5 seviyesinde gözlenmiştir.

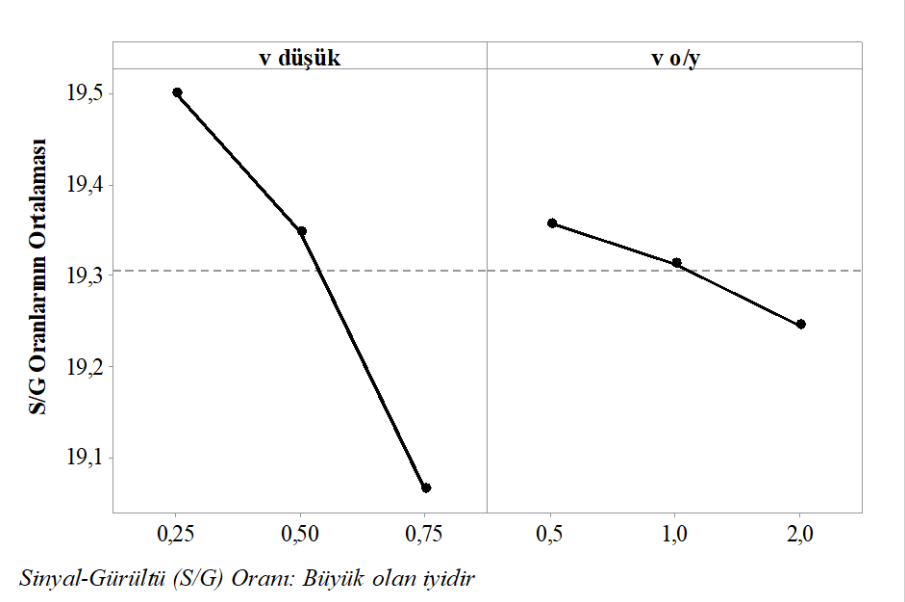
Çizelgede sunulan Δ (delta) değerleri, her bir kontrol faktörünün araç dolum sayısına olan göreli etkisini nicel olarak yansıtmaktadır. Buna göre, $\overline{v}_{düşük}$ faktörüne ait delta değeri 0,13 olarak hesaplanmış ve bu değer, analizde en yüksek etkiyi temsil etmektedir. $\overline{v}_{o/y}$ faktörü ise 0,10'luk delta değeri ile ikinci sırada yer almıştır. Bu sonuçlara göre kontrol faktörlerinin araç dolum performansına etkisi şu sırayla ifade edilebilir: $\overline{v}_{düşük} > \overline{v}_{o/y}$.

"Büyük olan iyidir" yaklaşımına göre yapılan bu değerlendirme sonucunda, araç dolum sayısını en fazla artıran konfigürasyonun $\overline{v}_{düşük}$= 0,75 ve $\overline{v}_{o/y}$= 0,5 olduğu

anlaşılmaktadır. Bu yapı, sistemin dolum kapasitesi açısından en avantajlı hacim dağılımını temsil etmektedir.

Çizelge 4.17. Ortalama dolum kütlesi için kontrol faktörlerine ait seviye ortalamaları, delta ve ağırlık değerleri (S/G oranları)

Seviye	$\bar{v}_{\text{düşük}}$	$\bar{v}_{\text{o/y}}$
1	19,5	19,36
2	19,35	19,31
3	19,07	19,25
Delta	0,43	0,11
Rank	1	2
∑ Delta	0,54	
w (%)	24,22%	



Şekil 4.25. Ortalama dolum kütlesi için kontrol faktörlerinin seviyelerine göre ortalama S/G oranlarının değişimi

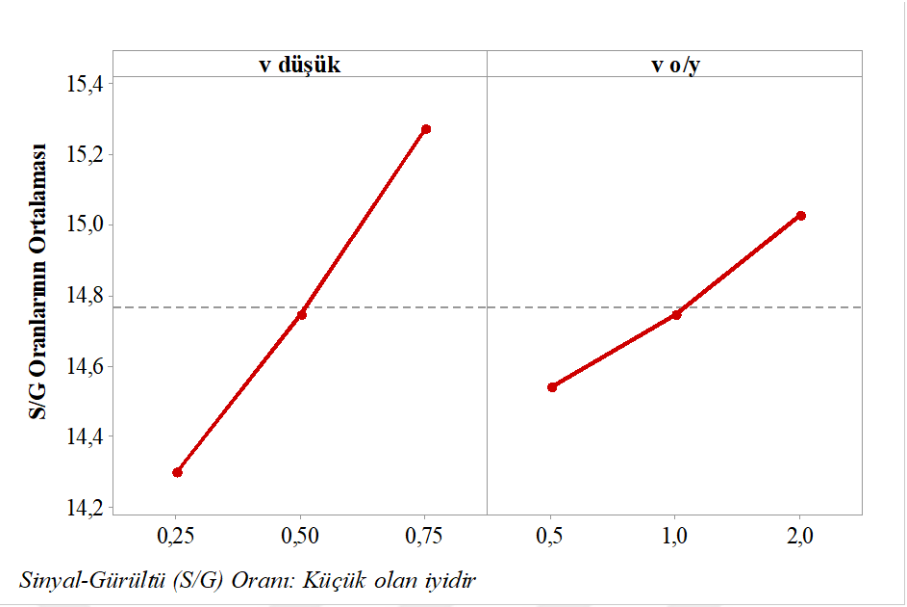
Ortalama dolum kütlesi ($m_{\text{ortalamam}}$) performans ölçütü açısından kontrol faktörlerinin seviye bazlı ortalama S/G oranları Çizelge 4.17'de verilmiş, bu oranlara karşılık gelen eğilimler ise Şekil 4.25'te grafiksel olarak gösterilmiştir. Sistem performansı üzerinde

en fazla etkiye sahip değişkenin yine düşük basınçlı depo hacminin toplam hacme oranı ($\overline{v}_{düşük}$) olduğu görülmektedir. Bu faktörün 0,25 seviyesinde ortalama S/G oranı en yüksek düzeye ulaşırken, 0,75 seviyesinde en düşük değere gerilemiştir. Diğer yandan, $\overline{v}_{o/y}$ oranı da ortalama kütle üzerinde etkili olmakla birlikte, delta değeri açısından ikinci sırada yer almıştır.

Çizelgede verilen Δ (delta) değerlerine göre, $\overline{v}_{düşük}$ faktörü 0,43 ile en yüksek etkiyi oluştururken, $\overline{v}_{o/y}$ faktörünün etkisi 0,11 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, ortalama dolum miktarının artırılmasında düşük basınç hacminin belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir.

Çizelge 4.18. Özgül kompresör enerjisi performans ölçütüne göre S/G oranlarının seviye ortalamaları

Seviye	$\overline{v}_{düşük}$	$\overline{v}_{o/y}$
1	14,3	14,54
2	14,74	14,74
3	15,27	15,02
Delta	0,97	0,49
Rank	1	2
∑ Delta	1,46	
w (%)	65,47%	



Şekil 4.26. Özgül enerji tüketimi için kontrol faktörlerinin seviyelerine göre ortalama S/G oranlarının değişimi

Kompresörün özgül enerji tüketimi ($W_{komp.}$) açısından kontrol faktörlerine göre elde edilen ortalama sinyal-gürültü oranları Çizelge 4.18'de verilmiş, buna ait eğilim grafiği ise Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Küçük olan iyidir kriterine göre yorumlanan bu analizde, her iki kontrol faktöründe de artan seviyeler daha yüksek S/G oranlarına karşılık gelmektedir. Bu durum, enerji tüketimi açısından daha düşük değerlere işaret etmektedir.

Çizelge incelendiğinde, düşük basınç hacmi oranı ($\overline{v}_{düşük}$) için ortalama S/G oranı en düşük seviyede 14,30 iken, bu oran en yüksek seviyede 15,27'ye ulaşmıştır. Orta-yüksek basınç hacmi oranı ($\overline{v}_{o/y}$) için ise benzer bir eğilim gözlemlenmekte, 0,50 seviyesinde en düşük değer (14,54), 2,00 seviyesinde ise en yüksek değer (15,02) elde edilmektedir.

Çizelgede yer alan Δ (delta) değerlerine göre, $\overline{v}_{düşük}$ faktörü 0,97 ile özgül enerji tüketimi üzerinde en yüksek etkiye sahiptir. İkinci sırada gelen $\overline{v}_{o/y}$ faktörünün delta değeri ise 0,49'dur. Bu veriler doğrultusunda, enerji performansını iyileştirmek açısından düşük basınç hacmi oranı belirleyici bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

Çizelge 4.19. Hacim optimizasyonu için normalizasyon sonuçları

	Normalizasyon		
Simülasyon No	$n_{araç}$	$m_{ortalama}$	$w_{komp.}$
1	1	1	0
2	0,4286	0,9030	0,2051
3	0,7143	0,7321	0,4762
4	0,2857	0,6908	0,3790
5	0	0,6123	0,5254
6	0,7143	0,4710	0,7429
7	1	0,1414	0,8123
8	0,7143	0,0674	0,9016
9	0,7143	0	1

Çizelge 4.20. Gri ilişki katsayıları, gri ilişki dereceleri ve sıralamalar

	Gri İlişki Katsayısı			**Gri İlişki Derecesi**	**Sıralama**
Sim. No	$n_{araç}$	$m_{ortalama}$	$w_{komp.}$		
1	1	1	0,3333	0,5635	5
2	0,4667	0,8375	0,3861	0,5037	8
3	0,6364	0,6511	0,4884	0,5431	6
4	0,4118	0,6179	0,4460	0,4841	9
5	0,3333	0,5632	0,5130	0,5066	7
6	0,6364	0,4859	0,6604	0,6157	4
7	1	0,3680	0,7270	0,6683	3
8	0,6364	0,3490	0,8356	0,6972	2
9	0,6364	0,3333	1	0,8011	1

Bu çalışmada uygulanan Taguchi–Gri İlişkisel Analiz (GRA) yönteminde, ilk olarak araç dolum sayısı, ortalama dolum kütlesi ve özgül enerji tüketimine ait performans verileri normalize edilmiştir. Normalizasyon işlemi Denklem (3.14) ve Denklem (3.15) uyarınca gerçekleştirilmiş; ardından her bir performans ölçütü için Gri İlişki Katsayısı

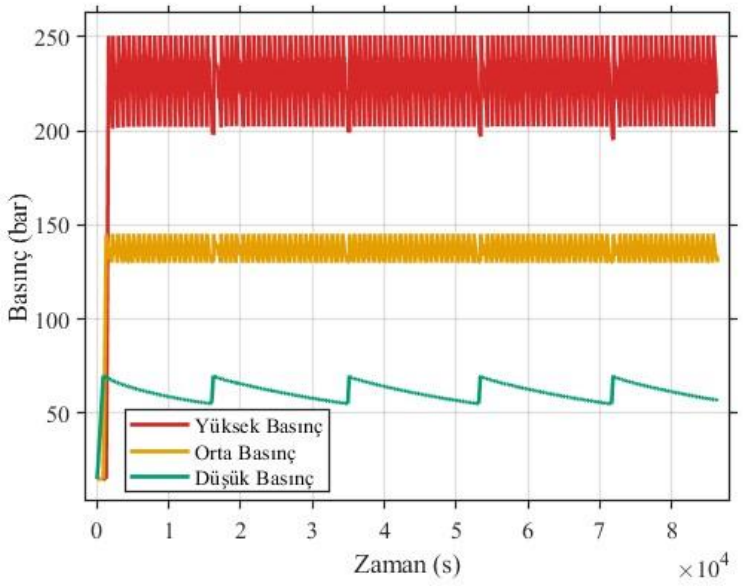
(GİK) Denklem (3.16) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu katsayılar Çizelge 4.19'da sunulmuştur.

Sonrasında, ağırlıklı gri ilişki dereceleri (GRG) Denklem (4.7) ile hesaplanmış ve nihai karar kriteri olarak değerlendirilmiştir. Bu denklemde, her bir performans ölçütüne ait GRC değerleri belirli ağırlıklarla birleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ağırlıklar sırasıyla araç dolum sayısı için 0,1031, ortalama dolum kütlesi için 0,2422 ve özgül enerji tüketimi için 0,6547 olarak belirlenmiştir. Buna göre gri ilişki derecesi aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

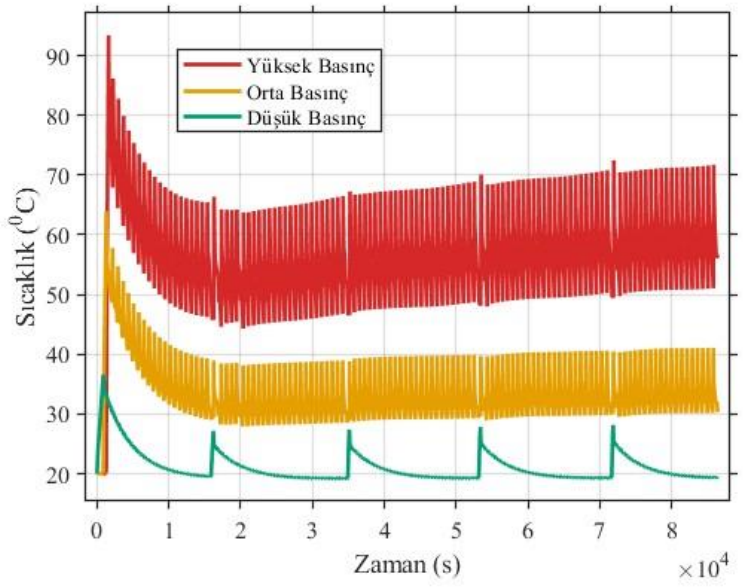
$$GRG = 0.1031\ GRC_{n_{araç}} + 0.2422\ GRC_{m_{ortalama}} + 0.6547\ GRC_{w_{komp.}} \quad (4.7)$$

Gri ilişki dereceleri (GRG) ve sıralamaları Çizelge 4.20'de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre, en yüksek GİD değerine sahip olan 9 numaralı simülasyon $\overline{v}_{düşük}$= 0,75 ve $\overline{v}_{o/y}$= 2 parametrelerine karşılık gelmektedir. Bu konfigürasyonda araç dolum sayısı n_{arac}= 229, ortalama dolum miktarı $m_{ortalama}$= 8,941 kg ve özgül enerji tüketimi w_{komp}= 0,170 kWh/kg olarak hesaplanmıştır.

Bu konfigürasyon, enerji verimliliğini artırırken sistemin dolum kapasitesini de yüksek düzeyde koruduğu için hacim optimizasyonu açısından en uygun yapı olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.27. Hacim ve basınç optimizasyonu sonrasında çok kademeli depo tanklarında basınç değişimi (24 saat)



Şekil 4.28. Hacim ve basınç optimizasyonu sonrasında çok kademeli depo tanklarında sıcaklık değişimi

Basınç ve hacim optimizasyonlarının tamamlanmasının ardından, çok kademeli depolama tanklarının 24 saatlik çalışması boyunca basınç ve sıcaklık değişimleri Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de sunulmuştur. Yüksek basınçlı depolama tanklarının basıncı,

yapılan optimizasyon sonucunda 250 bar seviyesine kadar ulaşmakta ve dolum sürecinde araç tanklarının 200 bar seviyesine kadar doldurulabilmesi amacıyla bu tank grubunun minimum basınç değeri 205 bar olarak belirlenmiştir. Hacim optimizasyonuna göre, toplam 48 tanktan yalnızca 4'ü yüksek basınçlı grup olarak tanımlanmış, bu nedenle bu tankların basıncı kısa sürede alt sınıra ulaşmakta ve kompresör yaklaşık her 12,5 dakikada bir devreye girerek basıncı üst sınıra geri getirmektedir. Kompresörün sık ve kısa süreli çalışması nedeniyle, bu tanklardaki sıcaklık seviyesi sürekli olarak yüksek kalmaktadır. İlk dolum sürecinde, sırasıyla düşük, orta ve yüksek basınçlı depolama tanklarının dolması sonucunda en yüksek sıcaklık değeri bu aşamada gözlenmektedir.

Orta basınçlı depolama tankları için, optimizasyon sonrası maksimum basınç değeri 145 bar, minimum değer ise 130 bar olarak belirlenmiştir. Toplam tank sayısının yalnızca 8'i bu gruba ait olup hem hacim payı düşük hem de basınç aralığı dar olduğundan, bu tanklar da kısa zaman aralıklarında kompresör tarafından tekrar doldurulmaktadır. Bu durum, orta basınçlı tank grubunda da belirgin sıcaklık artışlarına neden olmaktadır.

Düşük basınçlı depolama tanklarında ise maksimum basınç 70 bar, minimum basınç 55 bar olarak sınırlandırılmıştır. Ancak toplam depo hacminin dörtte üçlük kısmı bu gruba ayrıldığı için, basınç düşümü daha yavaş gerçekleşmekte ve bu tankların yalnızca beş kez doldurulması yeterli olmaktadır. Bu daha seyrek dolum aralıkları, sıcaklığın zamanla ortam sıcaklığına yaklaşmasını sağlamaktadır.

Çizelge 4.21'de, istasyon performansının her bir optimizasyon aşaması öncesi ve sonrası değerlendirildiği özet veriler yer almaktadır. Başlangıç konfigürasyonuna kıyasla, yalnızca basınç seviyelerinin optimize edilmesiyle araç dolum sayısı 218'den 229'a yükselmiş, özgül enerji tüketimi ise 0,1938 kWh/kg'dan 0,1898 kWh/kg'a düşmüştür. Hacim oranlarının da optimize edildiği son aşamada, araç dolum sayısı sabit kalırken ortalama dolum kütlesi 9,43 kg'dan 8,94 kg'a düşmüş, kompresörün özgül enerji tüketimi ise 0,17 kWh/kg seviyesine gerileyerek en düşük değerine ulaşmıştır.

Çizelge 4.21. Optimizasyon öncesi, basınç optimizasyonu sonrası ve hacim optimizasyonu sonrası CNG istasyonu performansı

Performans Göstergesi	**Başlangıç Konfigürasyonu**	**Basınç Optimizasyonu Sonrası**	**Hacim Optimizasyonu Sonrası**
Doldurulan araç sayısı ($n_{araç}$)	218	229	229
Araç başına ortalama kütle ($m_{ortalama}$, kg)	9,46	9,43	8,94
Kompresör özgül işi ($w_{komp.}$, kWh/kg)	0,1938	0,1898	0,1700

5. SONUÇ

Bu tezde, CNG (Sıkıştırılmış Doğal Gaz) dolum istasyonlarında dolum süreci Simulink ortamında dinamik olarak modellenmiş, termodinamik olarak değerlendirilmiş ve çok amaçlı olarak optimize edilmiştir. Geliştirilen fiziksel temelli model, farklı doğal gaz karışımları, ortam koşulları, dolum stratejileri ve depolama yapıları altında sistem davranışlarını zamana bağlı olarak analiz edebilmektedir.

İlk aşamada geliştirilen AGA8-DC92 tabanlı MATLAB kodu ile, doğal gaz karışımlarının yoğunluk, entalpi, entropi, özgül ısı kapasiteleri ve ses hızı gibi özellikleri başarılı şekilde hesaplanmıştır. Orta yoğunluklu çok bileşenli bir doğal gaz karışımı için yapılan doğrulama analizinde, dört sıcaklık seviyesinde (270 K, 290 K, 305 K, 340 K) ortalama mutlak yüzde hata %1'in altında kalmış, modelin yüksek doğrulukla gerçek gaz davranışını yansıttığı görülmüştür. Sıkıştırılabilirlik faktörü (Z) üzerindeki analizlerde ise, 290 K ve 305 K sıcaklıklarında ideal gaz varsayımına en yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Doğrulanan termodinamik model, Simulink ortamında sistem simülasyonlarında temel veri kaynağı olarak kullanılmıştır. Gerçek ve ideal gaz modelleri karşılaştırıldığında, araç başına dolum kütlesinde %7,6 artış gözlenmiştir (ideal gazla 8,0 kg, gerçek gazla 8,7 kg). Ayrıca, sıcaklık değerleri gerçek gazda 63 °C'ye kadar yükselirken ideal gaz modelinde 61 °C civarında kalmıştır. Bu farklar, gerçek gaz modelinin dolum sürecini daha doğru temsil ettiğini göstermektedir.

Tek basınç seviyeli depolama sistemine sahip istasyon modeli ile yapılan simülasyonlarda, daha yoğun bileşen içeren çok bileşenli doğal gaz karışımı ile araç başına 9,0 kg dolum yapılırken, saf metanla bu değer 8,1 kg olmuştur. Yaklaşık %11,1 oranında bir fark oluşmuş, gaz yoğunluğunun dolum performansı üzerindeki doğrudan etkisi vurgulanmıştır. Ayrıca, yoğun gaz karışımlarında sıcaklık artışı daha sınırlı kalmış; dolayısıyla dolum entropisi daha düşük gerçekleşmiştir.

Aynı modelde ideal ve gerçek gaz davranışları tekrar karşılaştırıldığında, çok bileşenli doğal gaz karışımıyla yapılan dolumda ortalama dolum kütlesinde %3,3 fark (gerçek gaz: 9,0 kg, ideal gaz: 8,7 kg) tespit edilmiştir. Gerçek gaz modelinde sıcaklık ve basınç artışları daha belirgin olduğu için ideal gaz varsayımının geçersiz kaldığı ve performans tahminlerinde sapmalara yol açtığı anlaşılmıştır.

Kademeli depolama yapısına sahip istasyonun optimizasyon öncesi senaryosunda, üç farklı basınç seviyesinde depolama tankları tanımlanmıştır. Bu yapıda, düşük, orta ve yüksek basınç gruplarına ait başlangıç basınçları sırasıyla 130 bar, 205 bar ve 250 bar olarak belirlenmiş; her grup için eşit hacme sahip tanklar atanmıştır. Dolum sıralaması ise düşük basınç grubundan yüksek basınca doğru yapılandırılmıştır. Yirmi dört saatlik simülasyon sonucunda sistem 218 aracı başarıyla doldurmuş, araç başına ortalama 9,46 kg gaz aktarımı sağlanmış ve kompresörün birim kütle başına harcadığı özgül enerji 0,1938 kWh/kg olarak hesaplanmıştır. Bu yapılandırmada, her bir tank grubunun benzer hacme sahip olması, dolum sıklıkları ve sıcaklık profillerinin birbirine yakın gerçekleşmesine neden olmuş; sistemin genel performansı dengeli bir seyir izlemiştir. Ancak, toplam dolum sayısının ve enerji verimliliğinin daha ileri düzeyde artırılabilmesi için hacim oranlarının yeniden yapılandırılması gerekmiştir.

Optimizasyon çalışmasında, tank gruplarının hacim oranları yeniden tanımlanarak sistem performansı üç temel ölçüte göre değerlendirilmiştir: 24 saatte doldurulan araç sayısı, araç başına ortalama gaz kütlesi ve kompresörün özgül enerji tüketimi. Yapılan çok amaçlı değerlendirme sonucunda en uygun senaryo, toplam 48 tankın %75'inin düşük basınç, %16,7'sinin orta basınç ve %8,3'ünün yüksek basınç seviyesinde yapılandırılmasıyla elde edilmiştir. Bu yapılandırma ile sistem, toplamda 229 aracı doldurmuş, araç başına ortalama 8,94 kg gaz aktarımı sağlamış ve kompresörün özgül enerji tüketimi 0,17 kWh/kg düzeyine gerilemiştir.

Yeni hacim dağılımı sonucunda, yüksek basınç grubunda yalnızca 4 tank yer almış ve bu gruptaki basınç kısa sürede minimum düzeye ulaşarak kompresörün yaklaşık her 12,5 dakikada bir devreye girmesine neden olmuştur. Bu sık devreye girişler, tank içi sıcaklığın diğer gruplara kıyasla daha yüksek seyretmesine yol açmıştır. Orta basınç

grubunda 8 tank bulunmuş, bu grup 145–130 bar arasında çalışmış ve sık dolum ihtiyacı doğurmuştur. Buna karşılık, düşük basınç grubuna 36 tank atanmış, bu grup 70–55 bar basınç aralığında çalışmış ve gün içinde yalnızca beş kez doldurulmuştur. Bu yapı, dolum sıklığının azalması ve sıcaklıkların zamanla çevre koşullarına yaklaşması gibi olumlu etkiler yaratmıştır.

Optimizasyon sonrası yapılandırma ile önceki duruma göre araç dolum sayısı %5 oranında artarken (218 → 229), kompresörün enerji tüketimi %12,3 azalmış (0,1938 → 0,17 kWh/kg), ancak ortalama dolum kütlesi %5,5 oranında azalarak 9,46 kg'dan 8,94 kg'a düşmüştür. Buna rağmen, daha fazla aracın daha düşük enerji ile doldurulması sayesinde sistemin toplam verimliliği artmıştır. Hacim oranlarının bu şekilde optimize edilmesiyle, yalnızca enerji verimliliği değil, aynı zamanda sistemin termal dengesi ve dolum süreleri açısından da belirgin iyileşmeler sağlanmıştır.

Bu tez kapsamında elde edilen bulgular doğrultusunda, CNG dolum istasyonlarının tasarımı, işletilmesi ve gelecekteki araştırmalara yönelik olarak aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

CNG istasyonlarında depolama tanklarının hacim oranlarının dikkatli biçimde belirlenmesi, sistem performansı açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu oranların yalnızca sabit tasarım kriterlerine göre değil, dinamik işletme koşulları göz önünde bulundurularak optimize edilmesi önerilmektedir. Özellikle çok kademeli yapıya sahip sistemlerde, yüksek basınç grubuna sınırlı hacim ayrılması, kompresörün çalışma frekansının kontrol altında tutulmasını ve termal dengenin korunmasını sağlayarak enerji verimliliğine katkı sunmaktadır.

Araç dolum performansının artırılması amacıyla, dolum sürecindeki sıcaklık ve basınç değişimlerine yanıt verebilecek esnek kontrol algoritmalarının geliştirilmesi önerilmektedir. Bu bağlamda Simulink ortamında geliştirilen fiziksel temelli modellerin farklı istasyon yapıları ve işletme senaryoları için uyarlanması, tasarım ve kontrol stratejilerinin çeşitlendirilmesi açısından yararlı olacaktır.

Enerji tüketimi, CNG istasyonlarının en önemli işletme maliyet kalemlerinden biridir. Bu nedenle gelecekteki çalışmaların enerji birim maliyetine dayalı daha kapsamlı optimizasyon yaklaşımlarına yönelmesi tavsiye edilmektedir. Bu analizlere, farklı kompresör tiplerinin karşılaştırılması, ısı geri kazanım sistemlerinin entegrasyonu ve alternatif soğutma çözümlerinin değerlendirilmesi gibi unsurlar da dâhil edilebilir.

Ayrıca, gelecekteki çalışmalarda biyometan ve hidrojen gibi alternatif yakıtların dolum karakteristiklerinin modellenmesi, mevcut sistem bileşenlerine olan etkilerinin araştırılması ve çok amaçlı optimizasyon yaklaşımları ile değerlendirilmesi önerilmektedir. Bu tür çalışmalar, düşük karbonlu enerji sistemlerine geçiş sürecinde mühendislik uygulamaları açısından değerli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Ali, Y., Younus, A., Khan, A. U., Alrefai, A. H. (2024). Compressed natural gas (CNG) as a fuel and the associated risks: A quantitative analysis in the scenario of a developing country. *Journal of Safety Science and Resilience, 5,* 306–316. https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2024.05.001

American Gas Association. (1992). *Compressibility and super compressibility for natural gas and other hydrocarbon gases: AGA8-DC92 equation of state* (Transmission Measurement Committee Report No. 8, AGA Catalog No. XQ1285). American Gas Association.

Bang, H. J., Stockar, S., Muratori, M., & Rizzoni, G. (2014). *Modeling and analysis of a CNG residential refueling system*. In Industrial Applications; Modeling for Oil and Gas, Control and Validation, Estimation, and Control of Automotive Systems; … *(ASME 2014 Dynamic Systems and Control Conference, DSCC 2014; Vol. 3, pp. 1–9)*. American Society of Mechanical Engineers. https://doi.org/10.1115/DSCC2014-6160

Berghmans, J., & Vanierschot, M. (2014). Safety aspects of CNG cars. *Procedia Engineering, 84*, 33–46. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.407

Bhutani, S., Prabakaran, D., & Gupta, N. (2025). Electrification of light commercial vehicles in urban areas. *Transportation Research Procedia, 82*, 2425–2443. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.12.196

Carbone, C., Sanzò, N., Dorsini, R., Nigliaccio, G., Di Florio, G., Cigolotti, V., & Agostini, A. (2025). An economic and environmental assessment of different bus powertrain technologies in public transportation. *Cleaner Environmental Systems, 16*, 100250. https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100250

Chu, Y., Wu, Z., & Yin, Y. (2025). Development of a solar-assisted hydrogen-from-power refueling station: A financial incentive model under the well-to-wheel and life cycle cost analyses. *International Journal of Hydrogen Energy, 103*, 288–299. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.178

Conference of Northeast Regional Fire Safety Officials. (n.d.). *A recommended permitting guide for compressed natural gas fueling stations: Based on NFPA 52-98*.

CoolProp. (n.d.). *CoolProp: Open-source thermophysical property database*. http://www.coolprop.org

Çetiner, İ. (2019). *Endüstriyel dökme CNG dolum tesisi operasyonlarının maliyet esaslı optimize edilmesi* (Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı).

Deng, J. (1989). Introduction to grey system theory. *The Journal of Grey System, 1*(1), 1–24.

Deymi-Dashtebayaz, M., Farzaneh-Gord, M., Nooralipoor, N., & Rastgar, S. (2014). The full simulation of rapid refueling of a natural gas vehicle on-board cylinder. *Journal of Natural Gas Science and Engineering, 21*, 1099–1106. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.11.001

Deymi-Dashtebayaz, M., Farzaneh-Gord, M., & Rahbari, H. R. (2012). Studying transmission of fuel storage bank to NGV cylinder in CNG fast filling station. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 34*(4), 475–483.

Ecotech Enerji. (n.d.). *CNG tank & tüp sistemleri*. https://www.ecotechenerji.com/cng-tank-tup

EGO Genel Müdürlüğü. (n.d.). *EGO araçları egzoz emisyon kirliliğinin giderilmesi çalışmaları*. Ankara Büyükşehir Belediyesi. https://m.ego.gov.tr/sayfa/1076/ego-araclari-egzoz-emisyon-kirliliginin-giderilmesi-calismalari

Evstifeev, A. A., & Zaeva, M. A. (2018). Analysis of compressor control structures and algorithms for compressor drives for automobile gas filling compressor stations. *Procedia Computer Science, 145*, 652–655. https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.11.067

Fan, Z., Ma, T., Li, W., Wang, S., Mao, Z., & Xie, X. (2017). A comparison of hydrogen-enriched natural gas (HCNG) and compressed natural gas (CNG): Based on ANOVA models. *International Journal of Hydrogen Energy, 42*(47), 28274–28284. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.187

Farzaneh-Gord, M., Niazmand, A., Deymi-Dashtebayaz, M., & Rahbari, H. R. (2015a). Thermodynamic analysis of natural gas reciprocating compressors based on real and ideal gas models. *International Journal of Refrigeration, 56*, 186–197. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.11.008

Farzaneh-Gord, M., Niazmand, A., Deymi-Dashtebayaz, M., & Rahbari, H. R. (2015b). Effects of natural gas compositions on CNG (compressed natural gas) reciprocating compressors performance. *Energy, 90*, 1152–1162. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.056

Farzaneh-Gord, M., & Rahbari, H. R. (2012). Numerical procedures for natural gas accurate thermodynamic properties calculation. *Journal of Engineering Thermophysics, 21*(4), 213–234. https://doi.org/10.1134/S1810232812040017

Farzaneh-Gord, M., Deymi-Dashtebayaz, M., & Rahbari, H. R. (2011). Studying effects of storage types on performance of CNG filling stations. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *3*(3), 334–340. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2011.02.001

Farzaneh-Gord, M., Deymi-Dashtebayaz, M., & Rahbari, H. R. (2012). Optimising compressed natural gas filling stations reservoir pressure based on thermodynamic analysis. *International Journal of Exergy*, *10*(3), 299–320.

Farzaneh-Gord, M., & Deymi-Dashtebayaz, M. (2013). Optimizing natural gas fueling station reservoirs pressure based on ideal gas model. *Polish Journal of Chemical Technology*, *15*(1), 88–96. https://doi.org/10.2478/pjct-2013-0015

Farzaneh-Gord, M., Rahbari, H. R., & Deymi-Dashtebayaz, M. (2014). Effects of natural gas compositions on CNG fast filling process for buffer storage system. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles, 69*(2), 319–330. https://doi.org/10.2516/ogst/2012010

Farzaneh-Gord, M., Saadat-Targhi, M., & Khadem, J. (2016). Selecting optimal volume ratio of reservoir tanks in CNG refueling station with multi-line storage system. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*, 23109–23119. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.050

George, D. (2014). CNG sampling. In *Proceedings of the Natural Gas Sampling Technology Conference*, New Orleans, Louisiana (pp. 72–80).

GOA Natural Gas Pvt. Ltd. (2023). *Technical Volume II: 450 SCMH booster CNG compressor specification*. https://www.goanaturalgas.com

Han, Y., You, X., Zhang, X., Wang, H., & Deng, C. (2014). A novel design of the CNG dispenser electronic control system. *Applied Mechanics and Materials*, *448–453*, 3119–3122. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.448-453.3119

Kagiri, C., Zhang, L., & Xia, X. (2017a). Optimal energy cost management of a CNG fuelling station. *IFAC PapersOnLine*, *50*(2), 94–97. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.12.017

Kagiri, C., Zhang, L., & Xia, X. (2017b). Optimization of a compressed natural gas station operation to minimize energy cost. *Energy Procedia*, *142*, 2003–2008. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.402

Kagiri, C., Wanjiru, E. M., Zhang, L., & Xia, X. (2018). Optimized response to electricity time-of-use tariff of a compressed natural gas fuelling station. *Applied Energy*, *222*, 244–256. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.017

Kagiri, C., Zhang, L., & Xia, X. (2019). A hierarchical optimisation of a compressed natural gas station for energy and fuelling efficiency under a demand response program. *Energies*, *12*(11), 2165. https://doi.org/10.3390/en12112165

Khamforoush, M., Moosavi, R., & Hatami, T. (2014). Compressed natural gas behavior in a natural gas vehicle fuel tank during fast filling process: Mathematical modeling, thermodynamic analysis, and optimization. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *20*, 121–131. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.06.009

Khan, M. I., Yasmin, T., & Shakoor, A. (2015). Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *51*, 785–797. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.053

Kılıç, M., Gamsız, S., & Alınca, Z. N. (2023). Comparative evaluation and multi-objective optimization of cold plate designed for the lithium-ion battery pack of an electrical pickup by using Taguchi–Grey relational analysis. *Sustainability*, *15*, 12391. https://doi.org/10.3390/su151612391

Kılıç, M., & Yiğit, A. (2018). *Isı transferi* (6. bs.). Dora Yayıncılık.

Kountz, K. (1994). *Modeling the fast fill process in natural gas vehicle storage cylinders*. 207th ACS National Meeting, Division of Fuel Chemistry, San Diego, CA.

Küçük, E. Ö., & Kılıç, M. (2023). Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of ORC via Taguchi-Grey relational methods. *Heliyon*, *9*, e15007. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15007

Liang, Y.-L., Guo, C.-X., Li, K.-J., & Li, M.-Y. (2021). Economic scheduling of compressed natural gas main station considering critical peak pricing. *Applied Energy*, *292*, 116937. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116937

Liss, W. E., Richards, M. E., Kountz, K., & Kriha, K. (2005). *Development and validation testing of hydrogen fast-fill fueling algorithms*. Gas Technology Institute.

Liu, Z., Jia, W., Liang, L., & Duan, Z. (2019). Analysis of pressure pulsation influence on compressed natural gas (CNG) compressor performance for ideal and real gas models. *Applied Sciences*, *9*(5), 946. https://doi.org/10.3390/app9050946

Luo, Q.-h., Sun, B.-g., & Tian, H.-y. (2014). *The characteristic of polytropic coefficient of compression stroke in hydrogen internal combustion engine*. *International Journal of Hydrogen Energy*, *39*(25), 13787–13792. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.035

Lynch, L. (2021). *CNG codes & standards considerations and end-of-life tank testing*. Sunulmuştur: NGVTF – Natural Gas Vehicle Technology Forum, NREL.

Mayeaux, D. (t.y.). *Advances in natural gas sampling technology* (Beyaz bülten). A+ Corporation, LLC.

Mepsan. (t.y.). *MEPCOGAS CNG kompresör*. https://www.mepsan.com.tr/mepcogas-cng-kompresor-1-768x768/

Milojević, S., Gordić, D., & Pešić, R. (2012). *Natural gas as a safe technology for clean urban vehicles*. Sunulmuştur: Motor Vehicles & Motors (MVM) Conference, Sırbistan.

Munahar, S., Setiyo, M., Saudi, M. M., Ahmad, A., Dhimas R, A. A., & Hardiansyah, M. (2024). Assessment of Comfort Index (CI) based on vibration characteristics in CNG control system development. *Results in Engineering*, *21*, 101840. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101840

Naturelgaz. (2023). *2. Çeyrek 2023 yatırımcı sunumu*. https://naturelgaz.com/wp-content/uploads/2023/08/Naturelgaz-2.-Ceyrek-2023-Yatirimci-Sunumu.pdf

Niazmand, A., Farzaneh-Gord, M., & Deymi-Dashtebayaz, M. (2017). Exergy analysis and entropy generation of a reciprocating compressor applied in CNG stations. *Applied Thermal Engineering*, *124*, 1279–1291. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.035

North Carolina Solar Center. (2014). *Planning and installation guide: North Carolina compressed natural gas fueling stations*. Clean Transportation Program.

Özcan, F. & Kılıç, M. (2025). Dynamic modeling of a compressed natural gas refueling station and multi-objective optimization via gray relational analysis method. *Applied Sciences*, 15(9), 4908. https://doi.org/10.3390/app15094908

Patil, P., Ejaz, S., Atilhan, M., Cristancho, D., Holste, J. C., & Hall, K. R. (2007). Accurate density measurements for a 91% methane natural gas-like mixture. *Journal of Chemical Thermodynamics*, *39*(8), 1157–1163. https://doi.org/10.1016/j.jct.2007.01.002

Prussi, M., Julea, A., Lonza, L., & Thiel, C. (2021). Biomethane as alternative fuel for the EU road sector: Analysis of existing and planned infrastructure. *Energy Strategy Reviews*, *33*, 100612. https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100612

Ramoutar, S., & Riverol, C. (2017). A thermodynamic analysis of refueling a natural gas vehicle cylinder from a cascade reservoir using chilled natural gas. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *38*, 298–322. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.12.019

Saadat-Targhi, M., Khadem, J., & Farzaneh-Gord, M. (2016). Thermodynamic analysis of a CNG refueling station considering the reciprocating compressor. *Journal of Natural Gas Science and Engineering, 28*, 128–136. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.01.027

Saferna, A., Saferna, P., Kuczyński, S., Łaciak, M., Szurlej, A., & Włodek, T. (2021). Thermodynamic analysis of CNG fast filling process of composite cylinder type IV. *Energies, 14*(17), 5568. https://doi.org/10.3390/en14175568

Seyfi, M., Mehdinejad, M., Mohammadi-Ivatloo, B., & Shayanfar, H. A. (2022). Deep learning-based scheduling of virtual energy hubs with plug-in hybrid compressed natural gas-electric vehicles. *Applied Energy, 321*, 119318. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119318

Sgaramella, A., Lo Basso, G., & de Santoli, L. (2024). How the cylinder initial conditions affect the HCNG refuelling process: A thermodynamic analysis to determine the most effective filling parameters. *International Journal of Hydrogen Energy, 51*, 559–575. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.323

SGS Environmental Testing Corp. (2015). *Effect of fuel composition on the emissions and performance of modern, light-duty natural gas vehicles (CRC Report No. E-109).* Coordinating Research Council.

Sharma, P., Chugh, P., & Neogi, S. (2021). Study to methodize the design of a safe Type-4 CNG storage vessel using finite element analysis with experimental validation. *International Journal of Pressure Vessels and Piping, 192*, 104425. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104425

Shipley, E. P. (2002). *Study of natural gas vehicles (NGV) during the fast fill process* (Yüksek lisans tezi). West Virginia University. https://researchrepository.wvu.edu/etd/1264

Southwest Research Institute. (2014). *Compressed natural gas vehicle fuel survey – Final report (CRC PC-2-12).* Coordinating Research Council.

Striednig, M., Brandstätter, S., Sartory, M., & Klell, M. (2014). Thermodynamic real gas analysis of a tank filling process. *International Journal of Hydrogen Energy, 39*(16), 8495–8509. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.028

Tsuchiya, M., Ogasa, H., Matsuura, H., Shimanuki, H., & Fujii, I. (1996). Thermodynamic behavior of supply gas and influence on vehicle fuel fill line during CNG fast fill (SAE Technical Paper No. 961173). *SAE International.* https://doi.org/10.4271/961173

U.S. Department of Energy. (2015). *How to implement: Compressed natural gas*. Alternative Fuel Tool Kit.

Wang, X., & Liu, N. (2021). Research on the construction plan layout of the combined hydrogen and CNG refueling station. *E3S Web of Conferences, 245*, 01006. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124501006

Xu, Y., Xu, H., Qi, M., Li, B., Feng, W., Zhang, T., Chen, M., Hu, M., & Liu, Y. (2024). Accident scenarios screening for integrated energy supply stations. *International Journal of Hydrogen Energy, 51*(2), 1038–1054. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.203

Yalçın, Y., & Akcan, Ş. (2015). Toplu taşımada sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) kullanımının sera gazı emisyonlarına etkisi. *ICCI 2015 – Uluslararası Enerji ve Çevre Fuarı ve Konferansı, Bildiriler Kitabı* (ss. 182–184). İstanbul, Türkiye.

Zhang, G., Brinkerhoff, J., Li, R., Forsberg, C., & Sloan, T. (2017). Analytical and numerical study on the fast refill of compressed natural gas with active heat removal. *Journal of Natural Gas Science and Engineering, 45*, 552–564. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.06.023

EKLER

EK 1 Aga8-Dc92 Hal Denklemi ile Termodinamik Özelik Hesaplaması için Geliştirilen Matlab Kodu

EK 2 Aga8-Dc92 Denklemi ile Sıkıştırılabilirlik Faktörü ve Yoğunluk Hatası Hesaplamaları için Matlab Kodları

EK 1 AGA8-DC92 HAL DENKLEMİ İLE TERMODİNAMİK ÖZELİK HESAPLAMASI İÇİN GELİŞTİRİLEN MATLAB KODU

```
clc % Bu kod, farklı doğal gaz karışımları için AGA8-DC92 hal denklemi temelinde
      termodinamik özelliklerin hesaplanmasını sağlar. Tezin 4.1 numaralı
      bölümünde sunulan örnek sonuçlar bu kod ile elde edilmiştir.
clear
close all
%SUBROUTINE SetupDetail
RDetail=8.31451; % (J/mol-K)
% Molar masses (g/mol)
MMiDetail(1) = 16.043;   % Methane        CH4
MMiDetail(2) = 28.0135;  % Nitrogen       N2
MMiDetail(3) = 44.01;    % Carbon dioxide CO2
MMiDetail(4) = 30.07;    % Ethane         C2H6
MMiDetail(5) = 44.097;   % Propane        C3H8
MMiDetail(6) = 58.123;   % Isobutane      C4H10
MMiDetail(7) = 58.123;   % n-Butane       C4H10
MMiDetail(8) = 72.15;    % Isopentane     C5H12
MMiDetail(9) = 72.15;    % n-Pentane      C5H12
MMiDetail(10) = 86.177;  % Hexane         C6H14
MMiDetail(11) = 100.204; % Heptane        C7H16
MMiDetail(12) = 114.231; % Octane         C8H18
MMiDetail(13) = 128.258; % Nonane         C9H20
MMiDetail(14) = 142.285; % Decane         C10H22
MMiDetail(15) = 2.0159;  % Hydrogen       H2
MMiDetail(16) = 31.9988; % Oxygen         O2
MMiDetail(17) = 28.01;   % Carbon monoxide CO
MMiDetail(18) = 18.0153; % Water          H2O
MMiDetail(19) = 34.082;  % Hydrogen sulfide H2S
MMiDetail(20) = 4.0026;  % Helium         He
MMiDetail(21) = 39.948;  % Argon          Ar
%Energy parameters
Ei(1) = 151.3183; Ei(2) = 99.73778; Ei(3) = 241.9606; Ei(4) = 244.1667;
Ei(5) = 298.1183; Ei(6) = 324.0689; Ei(7) = 337.6389; Ei(8) = 365.5999;
Ei(9) = 370.6823; Ei(10) = 402.636293; Ei(11) = 427.72263; Ei(12) = 450.325022;
Ei(13) = 470.840891; Ei(14) = 489.558373; Ei(15) = 26.95794; Ei(16) = 122.7667;
Ei(17) = 105.5348; Ei(18) = 514.0156; Ei(19) = 296.355; Ei(20) = 2.610111;
Ei(21) = 119.6299;
%Size parameters
Ki(1) = 0.4619255; Ki(2) = 0.4479153; Ki(3) = 0.4557489; Ki(4) = 0.5279209;
Ki(5) = 0.583749; Ki(6) = 0.6406937; Ki(7) = 0.6341423; Ki(8) = 0.6738577;
Ki(9) = 0.6798307; Ki(10) = 0.7175118; Ki(11) = 0.7525189; Ki(12) = 0.784955;
Ki(13) = 0.8152731; Ki(14) = 0.8437826; Ki(15) = 0.3514916; Ki(16) = 0.4186954;
Ki(17) = 0.4533894; Ki(18) = 0.3825868; Ki(19) = 0.4618263; Ki(20) = 0.3589888;
Ki(21) = 0.4216551;
%Orientation parameters
```

```
Gi(1) = 0; Gi(2) = 0.027815; Gi(3) = 0.189065; Gi(4) = 0.0793;
Gi(5) = 0.141239; Gi(6) = 0.256692; Gi(7) = 0.281835; Gi(8) = 0.332267;
Gi(9) = 0.366911; Gi(10) = 0.289731; Gi(11) = 0.337542; Gi(12) = 0.383381;
Gi(13) = 0.427354; Gi(14) = 0.469659; Gi(15) = 0.034369; Gi(16) = 0.021;
Gi(17) = 0.038953; Gi(18) = 0.3325; Gi(19) = 0.0885; Gi(20) = 0;
Gi(21) = 0; Fi =zeros(21,1); Qi =zeros(21,1); Si =zeros(21,1); Wi =zeros(21,1);
%Quadrupole parameters
Qi(3) = 0.69; Qi(18) = 1.06775; Qi(19) = 0.633276;
%High temperature parameter
Fi(15) = 1;
%Dipole parameter
Si(18) = 1.5822; Si(19) = 0.39;
%Association parameter
Wi(18) = 1;
% Coefficients of the equation of state
an(1) = 0.1538326; an(2) = 1.341953; an(3) = -2.998583; an(4) = -0.04831228;
an(5) = 0.3757965; an(6) = -1.589575; an(7) = -0.05358847; an(8) = 0.88659463;
an(9) = -0.71023704; an(10) = -1.471722; an(11) = 1.32185035; an(12) = -0.78665925;
an(13) = 0.00000000229129; an(14) = 0.1576724; an(15) = -0.4363864;
an(16) = -0.04408159; an(17) = -0.003433888; an(18) = 0.03205905;
an(19) = 0.02487355; an(20) = 0.07332279; an(21) = -0.001600573;
an(22) = 0.6424706; an(23) = -0.4162601; an(24) = -0.06689957;
an(25) = 0.2791795; an(26) = -0.6966051; an(27) = -0.002860589;
an(28) = -0.008098836; an(29) = 3.150547; an(30) = 0.007224479;
an(31) = -0.7057529; an(32) = 0.5349792; an(33) = -0.07931491; an(34) = -1.418465;
an(35) = -5.99905e-17; an(36) = 0.1058402; an(37) = 0.03431729;
an(38) = -0.007022847; an(39) = 0.02495587; an(40) = 0.04296818;
an(41) = 0.7465453; an(42) = -0.2919613; an(43) = 7.294616; an(44) = -9.936757;
an(45) = -0.005399808; an(46) = -0.2432567; an(47) = 0.04987016;
an(48) = 0.003733797; an(49) = 1.874951; an(50) = 0.002168144; an(51) = -0.6587164;
an(52) = 0.000205518; an(53) = 0.009776195; an(54) = -0.02048708;
an(55) = 0.01557322; an(56) = 0.006862415; an(57) = -0.001226752;
an(58) = 0.002850908;
% Density exponents
bn(1) = 1; bn(2) = 1; bn(3) = 1; bn(4) = 1; bn(5) = 1; bn(6) = 1; bn(7) = 1; bn(8) = 1;
bn(9) = 1; bn(10) = 1; bn(11) = 1; bn(12) = 1; bn(13) = 1; bn(14) = 1; bn(15) = 1;
bn(16) = 1; bn(17) = 1; bn(18) = 1; bn(19) = 2; bn(20) = 2; bn(21) = 2; bn(22) = 2;
bn(23) = 2; bn(24) = 2; bn(25) = 2; bn(26) = 2; bn(27) = 2; bn(28) = 3; bn(29) = 3;
bn(30) = 3; bn(31) = 3; bn(32) = 3; bn(33) = 3; bn(34) = 3; bn(35) = 3; bn(36) = 3;
bn(37) = 3; bn(38) = 4; bn(39) = 4; bn(40) = 4; bn(41) = 4; bn(42) = 4; bn(43) = 4;
bn(44) = 4; bn(45) = 5; bn(46) = 5; bn(47) = 5; bn(48) = 5; bn(49) = 5; bn(50) = 6;
bn(51) = 6; bn(52) = 7; bn(53) = 7; bn(54) = 8; bn(55) = 8;
bn(56) = 8; bn(57) = 9; bn(58) = 9; kn =zeros(58,1); un =zeros(58,1); fn =zeros(58,1);
gn =zeros(58,1); qn =zeros(58,1);  sn =zeros(58,1); wn =zeros(58,1);
% kn katsayıları
kn(13) = 3; kn(14) = 2; kn(15) = 2; kn(16) = 2; kn(17) = 4; kn(18) = 4; kn(21) = 2;
kn(22) = 2; kn(23) = 2; kn(24) = 4; kn(25) = 4; kn(26) = 4; kn(27) = 4; kn(29) = 1;
```

```
kn(30) = 1; kn(31) = 2; kn(32) = 2; kn(33) = 3; kn(34) = 3; kn(35) = 4; kn(36) = 4;
kn(37) = 4; kn(40) = 2; kn(41) = 2; kn(42) = 2; kn(43) = 4; kn(44) = 4; kn(46) = 2;
kn(47) = 2; kn(48) = 4; kn(49) = 4; kn(51) = 2; kn(53) = 2; kn(54) = 1; kn(55) = 2;
kn(56) = 2; kn(57) = 2; kn(58) = 2;
% Temperature exponents
un(1) = 0; un(2) = 0.5; un(3) = 1; un(4) = 3.5; un(5) = -0.5;  un(6) = 4.5; un(7) = 0.5;
un(8) = 7.5; un(9) = 9.5; un(10) = 6; un(11) = 12; un(12) = 12.5; un(13) = -6;
un(14) = 2; un(15) = 3; un(16) = 2; un(17) = 2; un(18) = 11; un(19) = -0.5; un(20) = 0.5;
un(21) = 0; un(22) = 4; un(23) = 6; un(24) = 21; un(25) = 23; un(26) = 22; un(27) = -1;
un(28) = -0.5; un(29) = 7; un(30) = -1; un(31) = 6; un(32) = 4; un(33) = 1; un(34) = 9;
un(35) = -13; un(36) = 21; un(37) = 8; un(38) = -0.5; un(39) = 0; un(40) = 2;
un(41) = 7; un(42) = 9; un(43) = 22; un(44) = 23; un(45) = 1; un(46) = 9; un(47) = 3;
un(48) = 8; un(49) = 23; un(50) = 1.5; un(51) = 5; un(52) = -0.5; un(53) = 4; un(54) = 7;
un(55) = 3; un(56) = 0; un(57) = 1; un(58) = 0;
% Flags
fn(13) = 1; fn(27) = 1; fn(30) = 1; fn(35) = 1; gn(5) = 1; gn(6) = 1; gn(25) = 1;
gn(29) = 1; gn(32) = 1; gn(33) = 1; gn(34) = 1; gn(51) = 1; gn(54) = 1; gn(56) = 1;
qn(7) = 1; qn(16) = 1; qn(26) = 1; qn(28) = 1; qn(37) = 1; qn(42) = 1; qn(47) = 1;
qn(49) = 1; qn(52) = 1; qn(58) = 1; sn(8) = 1; sn(9) = 1; wn(10) = 1; wn(11) = 1;
wn(12) = 1;
% Orientation parameters
Gij=ones(21,21); Gij(1,3)=0.807653; Gij(1,15)=1.95731; Gij(2,3)=0.982746;
Gij(3,4)=0.370296; Gij(3,18)=1.67309;
% Size parameters
Kij=ones(21,21); Kij(1,2)=1.00363; Kij(1,3)=0.995933; Kij(1,5)=1.007619;
Kij(1,7)=0.997596; Kij(1,9)=1.002529; Kij(1,10)=0.982962; Kij(1,11)=0.983565;
Kij(1,12)=0.982707; Kij(1,13)=0.981849; Kij(1,14)=0.980991; Kij(1,15)=1.02326;
Kij(1,19)=1.00008; Kij(2,3)=0.982361; Kij(2,4)=1.00796; Kij(2,15)=1.03227;
Kij(2,19)=0.942596; Kij(3,4)=1.00851; Kij(3,10)=0.910183; Kij(3,11)=0.895362;
Kij(3,12)=0.881152; Kij(3,13)=0.86752; Kij(3,14)=0.854406; Kij(3,19)=1.00779;
Kij(4,5)=0.986893; Kij(4,15)=1.02034; Kij(4,19)=0.999969; Kij(10,19)=0.96813;
Kij(11,19)=0.96287; Kij(12,19)=0.957828; Kij(13,19)=0.952441; Kij(14,19)=0.948338;
% Energy parameters
Eij=ones(21,21); Eij(1,2)=0.97164; Eij(1,3)=0.960644; Eij(1,5)=0.994635;
Eij(1,6)=1.01953; Eij(1,7)=0.989844; Eij(1,8)=1.00235; Eij(1,9)=0.999268;
Eij(1,10)=1.107274; Eij(1,11)=0.88088; Eij(1,12)=0.880973; Eij(1,13)=0.881067;
Eij(1,14)=0.881161; Eij(1,15)=1.17052; Eij(1,17)=0.990126; Eij(1,18)=0.708218;
Eij(1,19)=0.931484; Eij(2,3)=1.02274; Eij(2,4)=0.97012; Eij(2,5)=0.945939;
Eij(2,6)=0.946914; Eij(2,7)=0.973384; Eij(2,8)=0.95934; Eij(2,9)=0.94552;
Eij(2,15)=1.08632; Eij(2,16)=1.021; Eij(2,17)=1.00571; Eij(2,18)=0.746954;
Eij(2,19)=0.902271; Eij(3,4)=0.925053; Eij(3,5)=0.960237; Eij(3,6)=0.906849;
Eij(3,7)=0.897362; Eij(3,8)=0.726255; Eij(3,9)=0.859764; Eij(3,10)=0.855134;
Eij(3,11)=0.831229; Eij(3,12)=0.80831; Eij(3,13)=0.786323; Eij(3,14)=0.765171;
Eij(3,15)=1.28179; Eij(3,17)=1.5; Eij(3,18)=0.849408; Eij(3,19)=0.955052;
Eij(4,5)=1.02256; Eij(4,7)=1.01306; Eij(4,9)=1.00532; Eij(4,15)=1.16446;
Eij(4,18)=0.693168; Eij(4,19)=0.946871; Eij(5,7)=1.0049; Eij(5,15)=1.034787;
Eij(6,15)=1.3; Eij(7,15)=1.3; Eij(10,19)=1.008692; Eij(11,19)=1.010126;
```

```
Eij(12,19)=1.011501; Eij(13,19)=1.012821; Eij(14,19)=1.014089; Eij(15,17)=1.1;
% Conformal energy parameters
Uij=ones(21,21); Uij(1,2)=0.886106; Uij(1,3)=0.963827; Uij(1,5)=0.990877;
Uij(1,7)=0.992291; Uij(1,9)=1.00367; Uij(1,10)=1.302576; Uij(1,11)=1.191904;
Uij(1,12)=1.205769; Uij(1,13)=1.219634; Uij(1,14)=1.233498; Uij(1,15)=1.15639;
Uij(1,19)=0.736833; Uij(2,3)=0.835058; Uij(2,4)=0.816431; Uij(2,5)=0.915502;
Uij(2,7)=0.993556; Uij(2,15)=0.408838; Uij(2,19)=0.993476; Uij(3,4)=0.96987;
Uij(3,10)=1.066638; Uij(3,11)=1.077634; Uij(3,12)=1.088178; Uij(3,13)=1.098291;
Uij(3,14)=1.108021; Uij(3,17)=0.9; Uij(3,19)=1.04529; Uij(4,5)=1.065173;
Uij(4,6)=1.25; Uij(4,7)=1.25; Uij(4,8)=1.25; Uij(4,9)=1.25; Uij(4,15)=1.61666;
Uij(4,19)=0.971926; Uij(10,19)=1.028973; Uij(11,19)=1.033754; Uij(12,19)=1.038338;
Uij(13,19)=1.042735; Uij(14,19)=1.046966;
% Ideal gas parameters
n0i(1,:) =[29.83843397;-15999.69151; 4.00088;0.76315;0.0046;8.74432;-4.46921];
n0i(2,:) =[17.56770785;-2801.729072;3.50031;0.13732;-0.1466;0.90066;0];
n0i(3,:) =[20.65844696;-4902.171516;3.50002;2.04452;-1.06044;2.03366;0.01393];
n0i(4,:) =[36.73005938;-23639.65301;4.00263;4.33939;1.23722;13.1974;-6.01989];
n0i(5,:) =[44.70909619;-31236.63551;4.02939;6.60569;3.197;19.1921;-8.37267];
n0i(6,:) =[34.30180349;-38525.50276;4.06714;8.97575;5.25156;25.1423;16.1388];
n0i(7,:) =[36.53237783;-38957.80933;4.33944;9.44893;6.89406;24.4618;14.7824];
n0i(8,:) =[43.17218626;-51198.30946;4;11.7618;20.1101;33.1688;0];
n0i(9,:) =[42.67837089;-45215.83;4;8.95043;21.836;33.4032;0];
n0i(10,:) =[46.99717188;-52746.83318;4;11.6977;26.8142;38.6164;0];
n0i(11,:) =[52.07631631;-57104.81056;4;13.7266;30.4707;43.5561;0];
n0i(12,:) =[57.25830934;-60546.76385;4;15.6865;33.8029;48.1731;0];
n0i(13,:) =[62.09646901;-66600.12837;4;18.0241;38.1235;53.3415;0];
n0i(14,:) =[65.93909154;-74131.45483;4;21.0069;43.4931;58.3657;0];
n0i(15,:) =[13.07520288;-5836.943696;2.47906;0.95806;0.45444;1.56039;-1.3756];
n0i(16,:) =[16.8017173;-2318.32269;3.50146;1.07558;1.01334;0;0];
n0i(17,:) =[17.45786899;-2635.244116;3.50055;1.02865;0.00493;0;0];
n0i(18,:) =[21.57882705;-7766.733078;4.00392;0.01059;0.98763;3.06904;0];
n0i(19,:) =[21.5830944;-6069.035869;4;3.11942;1.00243;0;0];
n0i(20,:) =[10.04639507;-745.375;2.5;0;0;0;0];
n0i(21,:) =[10.04639507;-745.375;2.5;0;0;0;0];
th0i(1,4:7) =[820.659;178.41;1062.82;1090.53];
th0i(2,4:7) =[662.738;680.562;1740.06;0];
th0i(3,4:7) =[919.306;865.07;483.553;341.109];
th0i(4,4:7) =[559.314;223.284;1031.38;1071.29];
th0i(5,4:7) =[479.856;200.893;955.312;1027.29];
th0i(6,4:7) =[438.27;198.018;1905.02;893.765];
th0i(7,4:7) =[468.27;183.636;1914.1;903.185];
th0i(8,4:7) =[292.503;910.237;1919.37;0]; th0i(9,4:7) =[178.67;840.538;1774.25;0];
th0i(10,4:7) =[182.326;859.207;1826.59;0]; th0i(11,4:7) =[169.789;836.195;1760.46;0];
th0i(12,4:7) =[158.922;815.064;1693.07;0]; th0i(13,4:7) =[156.854;814.882;1693.79;0];
th0i(14,4:7) =[164.947;836.264;1750.24;0];
th0i(15,4:7) =[228.734;326.843;1651.71;1671.69];
th0i(16,4:7) =[2235.71;1116.69;0;0]; th0i(17,4:7) =[1550.45;704.525;0;0];
```

```
th0i(18,4:7) =[268.795;1141.41;2507.37;0]; th0i(19,4:7) =[1833.63;847.181;0;0];
th0i(20,4:7) =[0;0;0;0]; th0i(21,4:7) =[0;0;0;0]; Ki25=zeros(1,21);
Ei25=zeros(1,21); Bsnij2=zeros(21,21,18); Kij5=zeros(21,21); Uij5=zeros(21,21);
Gij5=zeros(21,21); Bs=zeros(1,18); Csn=zeros(1,58); Tun=zeros(1,58); ar=zeros(4,4);
Dknn=zeros(1,9); Expn=zeros(1,4); CoefT1=zeros(1,58); CoefT2=zeros(1,58);
SumB=zeros(1,58); Sum0=zeros(1,58); CoefD1=zeros(1,58); CoefD2=zeros(1,58);
CoefD3=zeros(1,58);
for i=1:21
Ki25(i)=Ki(i)^2.5; Ei25(i)=Ei(i)^2.5;
end
for i=1:21
   for j=i:21
      for n=1:18
         Bsnij=1;
         if (gn(n)==1)
         Bsnij=Gij(i,j)*(Gi(i)+Gi(j))/2;
         end
         if (qn(n)==1)
         Bsnij=Bsnij*Qi(i)*Qi(j);
         end
         if (fn(n)==1)
         Bsnij=Bsnij*Fi(i)*Fi(j);
         end
         if (sn(n)==1)
         Bsnij=Bsnij*Si(i)*Si(j);
         end
         if (wn(n)==1)
         Bsnij=Bsnij*Wi(i)*Wi(j);
         end
         Bsnij2(i,j,n)=an(n)*(Eij(i,j)*sqrt(Ei(i)*Ei(j)))^un(n)*(Ki(i)*Ki(j))^1.5*Bsnij;
      end
      Kij5(i,j)=(Kij(i,j)^5-1)*Ki25(i)*Ki25(j); Uij5(i,j)=(Uij(i,j)^5-1)*Ei25(i)*Ei25(j);
      Gij5(i,j)=(Gij(i,j)-1)*(Gi(i)+Gi(j))/2;
   end
end
% ideal gas terms
T0=298.15; d0=101.325/RDetail/T0;
for i =1:21
n0i(i,3)=n0i(i,3)-1;
n0i(i,1)=n0i(i,1)-log(d0);
end
dlgtitle= 'Doğal Gaz Karışımının Mol Oranları';
Oran1={'1- Methane','2- Nitrogen','3- Carbon Dioxide','4- Ethane',...
'5- Propane','6- i-Butane','7- n-Butane','8- i-Pentane',...
'9- n-Pentane','10- n-Hexane'};
Oran2={'11- n-Heptane','12- n-Octane','13- n-Nonane','14- n-Decane',...
'15- Hydrogen','16- Oxygen','17- Carbon Monoxide','18- Water',...
```

```
'19- Hydrogen Sulfide','20- Helium','21- Argon'};
definput={'96.5222','0.2595','0.5956','1.8186','0.4596','0.0977','0.1007',...
'0.0473','0.0324','0.0664'};
dims=[1 50];
opts.Resize = 'on';
XI1=inputdlg(Oran1,dlgtitle,dims,definput,opts);
XI(1,1)= str2double(XI1{1}); XI(2,1)= str2double(XI1{2});
XI(3,1)= str2double(XI1{3}); XI(4,1)= str2double(XI1{4});
XI(5,1)= str2double(XI1{5}); XI(6,1)= str2double(XI1{6});
XI(7,1)= str2double(XI1{7}); XI(8,1)= str2double(XI1{8});
XI(9,1)= str2double(XI1{9}); XI(10,1)= str2double(XI1{10});
definput={'0','0','0','0','0','0','0','0','0','0','0',};
XI2=inputdlg(Oran2,dlgtitle,dims,definput,opts);
XI(11,1)= str2double(XI2{1}); XI(12,1)= str2double(XI2{2});
XI(13,1)= str2double(XI2{3}); XI(14,1)= str2double(XI2{4});
XI(15,1)= str2double(XI2{5}); XI(16,1)= str2double(XI2{6});
XI(17,1)= str2double(XI2{7}); XI(18,1)= str2double(XI2{8});
XI(19,1)= str2double(XI2{9}); XI(20,1)= str2double(XI2{10});
XI(21,1)= str2double(XI2{11}); x=XI/100;
dlgtitle= 'Sıcaklık ve Basınç';
prompt={'Sıcaklık(°C)','Basınç(bar)'};
definput={'0','1.0156'};
dims=[1 20];
opts.Resize = 'on';
TP=inputdlg(prompt,dlgtitle,dims,definput,opts);
T(1,1)= str2double(TP{1});
P(1,1)= str2double(TP{2});
T=T+273.15; % C yi Kelvine çeviriyoruz.
P=P*100; % barı kPa a çeviriyoruz.
D=P/RDetail/T;
%SUBROUTINE MolarMassDetail(x,Mm)
Mm = 0;
for i=1:21
   Mm=Mm+x(i)*MMiDetail(i);
end
%SUBROUTINE xTermsDetail(x)
K3=0; U=0; G=0; Q=0; F=0;
for n=1:18
   Bs(n)=0;
end
for i=1:21
   if x(i)>0
   xi2=x(i)^2; K3=K3+x(i)*Ki25(i);  U=U+x(i)*Ei25(i);   G=G+x(i)*Gi(i);
   Q=Q+x(i)*Qi(i); F=F+xi2*Fi(i);
for n=1:18
Bs(n)=Bs(n)+xi2*Bsnij2(i,i,n);  %İkinci dereceden yoğunluk katsayısına saf akışkan
                katkıları
```

```
end
   end
end
K3=K3^2; U=U^2;
% Binary pair contributions
for i=1:20
   if (x(i)>0)
   for j=i+1:21
      if (x(j)>0)
   xij=2*x(i)*x(j); K3=K3+xij*Kij5(i,j); U=U+xij*Uij5(i,j);
   G=G+xij*Gij5(i,j);
for n=1:18
   Bs(n)=Bs(n)+xij*Bsnij2(i,j,n);%Second virial coefficients of mixture
end
      end
   end
   end
end
K3=K3^0.6; U=U^0.2;
% Third virial and higher coefficients
Q2=Q^2;
for n=13:58
Csn(n)=an(n)*U^un(n);
if (gn(n)==1)
  Csn(n)=Csn(n)*G;
end
if(qn(n)==1)
  Csn(n)=Csn(n)*Q2;
end
if(fn(n)==1)
  Csn(n)=Csn(n)*F;
end
end
%SUBROUTINE DensityDetail
Epsilon=10^-15; tolr=10^-7; plog=log(P); vlog=-log(D);
for n=1:58
      Tun(n)=T^(-un(n));
end
for it=1:20
  if (vlog<-7 || vlog>100)
     break
  end
  D=exp(-vlog);
% SUBROUTINE AlpharDetail(itau,idel,T,D,ar)
for i=1:4
   for j=1:4
      ar(i,j)=0;
```

```
    end
end
% Precalculation of common powers and exponents of density
Dred=K3*D; Dknn(1)=Dred;% Dknn(0)=1.d0 kabul etmediği için revize ettim.
for n=2:9
    Dknn(n)=Dred*Dknn(n-1);
end
for n=1:4
Expn(n)=exp(-Dknn(n));
end
RT=RDetail*T;
for n=1:58
    CoefT1(n)=RDetail*(un(n)-1); CoefT2(n)=CoefT1(n)*un(n); SumB(n)=0;
    Sum0(n)=0;
    if n <= 18
    Sum=Bs(n)*D;
    if n >= 13
    Sum=Sum-Csn(n)*Dred;
    end
    SumB(n)=Sum*Tun(n);
    end
    if n>=13
    if kn(n)==0
    Sum0(n)=Csn(n)*Dknn(bn(n))*Tun(n); bkd=bn(n); ckd=0;
    else
    Sum0(n)=Csn(n)*Dknn(bn(n))*Tun(n)*Expn(kn(n));
    bkd=bn(n)-kn(n)*Dknn(kn(n)); ckd=(kn(n)^2)*Dknn(kn(n));
    end
    CoefD1(n)=bkd; CoefD2(n)=bkd*(bkd-1)-ckd;
    CoefD3(n)=(bkd-2)*CoefD2(n)+ckd*(1-kn(n)-2*bkd);
    else
    CoefD1(n)=0; CoefD2(n)=0; CoefD3(n)=0;
    end
end
for n=1:58
    %Density derivatives
    s0=Sum0(n)+SumB(n); s1=Sum0(n)*CoefD1(n)+SumB(n);
    s2=Sum0(n)*CoefD2(n); s3=Sum0(n)*CoefD3(n); ar(1,1)=ar(1,1)+RT*s0;
    ar(1,2)=ar(1,2)+RT*s1; ar(1,3)=ar(1,3)+RT*s2; ar(1,4)=ar(1,4)+RT*s3;
    ar(2,1)=ar(2,1)-CoefT1(n)*s0; ar(2,2)=ar(2,2)-CoefT1(n)*s1;
    ar(3,1)=ar(3,1)+CoefT2(n)*s0;
end
%SUBROUTINE PressureDetail(T,D,x,P,Z)
Z=1+ar(1,2)/RDetail/T; P2=D*RDetail*T*Z;
%d(P)/d(D) for use in density iteration
dPdDsave=RDetail*T+2*ar(1,2)+ar(1,3);
 if (dPdDsave<Epsilon || P2<Epsilon)
```

```
   vlog=vlog+0.1;
 else
    dpdlv=-D*dPdDsave; vdiff=(log(P2)-plog)*P2/dpdlv; vlog=vlog-vdiff;
    if(abs(vdiff)<tolr)
      D=exp(-vlog);
      break
    end
 end
end
Dft=D*Mm/16.01846; rho=D*Mm;
%SUBROUTİNE ALPHA0DETAİL
a0(1)=0; a0(2)=0; a0(3)=0;
if D>Epsilon
   LogD=log(D);
else
   LogD=log(Epsilon);
end
LogT=log(T);
for i=1:21
if x(i)>0
LogxD= LogD + log(x(i));
SumHyp0=0; SumHyp1=0; SumHyp2=0;
for j=4:7
if th0i(i,j)>0
th0T=th0i(i,j)/T; ep=exp(th0T); em=1/ep; hsn=(ep - em)/2; hcn=(ep + em)/2;
if (j==4) || (j==6)
LogHyp = log(abs(hsn)); SumHyp0 = SumHyp0 + n0i(i, j) * LogHyp;
SumHyp1 = SumHyp1 + n0i(i, j) * (LogHyp - th0T * hcn / hsn);
SumHyp2 = SumHyp2 + n0i(i, j) * (th0T / hsn) ^ 2;
else
LogHyp = log(abs(hcn)); SumHyp0 = SumHyp0 - n0i(i, j) * LogHyp;
SumHyp1 = SumHyp1 - n0i(i, j) * (LogHyp - th0T * hsn / hcn);
SumHyp2 = SumHyp2 + n0i(i, j) * (th0T / hcn) ^ 2;
end
end
end
a0(1) = a0(1) + x(i) * (LogxD + n0i(i, 1) + n0i(i, 2) / T - n0i(i, 3) * LogT + SumHyp0);
a0(2) = a0(2) + x(i) * (LogxD + n0i(i, 1) - n0i(i, 3) * (1 + LogT) + SumHyp1);
a0(3) = a0(3) - x(i) * (n0i(i, 3) + SumHyp2);
end
end
a0(1) = a0(1) * RDetail * T; a0(2) = a0(2) * RDetail; a0(3) = a0(3) * RDetail;
%SUBROUTINE PropertiesDetail
R=RDetail; dPdD= RT+2*ar(1,2)+ar(1,3); dPdT=D*R+D*ar(2,2);
A=a0(1)+ar(1,1); S=-a0(2)-ar(2,1); U=A+T*S; Cv=-(a0(3)+ar(3,1));
if D>Epsilon
  H=U+P/D; G1=A+P/D; Cp=Cv+T*(dPdT/D)^2/dPdD;
```

```
  d2PdD2=(2*ar(1, 2)+4*ar(1, 3)+ar(1, 4))/D; JT=(T/D*dPdT/dPdD-1)/Cp/D;
else
  H=U+RT; G1=A+RT; Cp=Cv+R; d2PdD2=0; JT= 1e+20;
end
W=1000*Cp/Cv*dPdD/Mm;
if W < 0
  W = 0;
end
W= sqrt(W); Kappa=W^2*Mm/(RT*1000*Z); d2PdTD = 0;
Wft= W*3.28084; Rng= RDetail/Mm; Hng= H/Mm; Cpng= Cp/Mm;
fprintf('Molar Mass %25f  kg/kmol \n', Mm); fprintf('Density %28f kg/m^3 \n', rho);
fprintf('Compressibility Factor %13f v/v \n', Z);
fprintf('dP/d(rho) at constant T %12f kPa/(kg/m^3) \n', dPdD);
fprintf('dP/d(rho)^2 at constant T %8f kPa/(kg/m^3)^2 \n', d2PdD2);
fprintf('dP/dT at constant density %10f kPa/K \n', dPdT);
fprintf('Energy %29f J/mol \n', U); fprintf('Enthalpy %27f J/mol \n', H);
fprintf('Entropy %28f J/(mol-K) \n', S);
fprintf('Isochoric heat capacity %12f J/(mol-K) \n', Cv);
fprintf('Isobaric heat capacity %13f J/(mol-K) \n', Cp);
fprintf('Speed of sound %21f m/s \n', W); fprintf('Gibbs energy %23f J/mol \n', G1);
fprintf('Joule-Thomson Coefficient %10f K/kPa \n', JT);
fprintf('Isentropic Exponent %16f  \n', Kappa);
fprintf('Gas Constant NG %16f  \n', Rng); fprintf('Enthalph NG %16f  \n', Hng);
fprintf('Cp NG %16f  \n', Cpng);
```

EK 2 AGA8-DC92 DENKLEMİ İLE SIKIŞTIRILABİLİRLİK FAKTÖRÜ VE YOĞUNLUK HATASI HESAPLAMALARI İÇİN MATLAB KODLARI

```
% İlk kod, sabit sıcaklık ve sabit basınç koşullarında sıkıştırılabilirlik faktörü (Z) değerlerini hesaplayarak Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'yi üretmektedir.
for i=1:21
Ki25(i)=Ki(i)^2.5; Ei25(i)=Ei(i)^2.5;
end
for i=1:21
   for j=i:21
      for n=1:18
         Bsnij=1;
         if (gn(n)==1)
         Bsnij=Gij(i,j)*(Gi(i)+Gi(j))/2;
         end
         if (qn(n)==1)
         Bsnij=Bsnij*Qi(i)*Qi(j);
         end
         if (fn(n)==1)
         Bsnij=Bsnij*Fi(i)*Fi(j);
         end
         if (sn(n)==1)
         Bsnij=Bsnij*Si(i)*Si(j);
         end
         if (wn(n)==1)
         Bsnij=Bsnij*Wi(i)*Wi(j);
         end
         Bsnij2(i,j,n)=an(n)*(Eij(i,j)*sqrt(Ei(i)*Ei(j)))^un(n)*(Ki(i)*Ki(j))^1.5*Bsnij;
      end
      Kij5(i,j)=(Kij(i,j)^5-1)*Ki25(i)*Ki25(j); Uij5(i,j)=(Uij(i,j)^5-1)*Ei25(i)*Ei25(j);
      Gij5(i,j)=(Gij(i,j)-1)*(Gi(i)+Gi(j))/2;
   end
end
%SUBROUTINE PressureDetail(T,D,x,P,Z)
Z=1+ar(1,2)/RDetail/T; P2=D*RDetail*T*Z;
%d(P)/d(D) for use in density iteration
dPdDsave=RDetail*T+2*ar(1,2)+ar(1,3);
 if (dPdDsave<Epsilon || P2<Epsilon)
   vlog=vlog+0.1;
 else
    dpdlv=-D*dPdDsave;
    vdiff=(log(P2)-plog)*P2/dpdlv;
    vlog=vlog-vdiff;
    if(abs(vdiff)<tolr)
      D=exp(-vlog);
      break
    end
```

```
 end
end
Zt(l,k)=Z;
   end
end
for i=1:8
hold on
figure(1)
plot(PT,Zt(i,:),'b')
end
xlabel('Basınç [kPa]')
ylabel('Z')
hold off
for i=1:6
   hold on
figure(2)
plot(TT,Zt(:,i),'b')
end
xlabel('Sıcaklık [K]')
ylabel('Z')
hold off
%İkinci kod ise, deneysel yoğunluk verileri ile karşılaştırmalı olarak Hesaplanan
yoğunluk değerlerini analiz etmekte ve Şekil 4.3 ile Şekil 4.4'te gösterilen karşılaştırma
ve bağıl hata grafiklerini oluşturmaktadır.
rho(m)=D*Mm;
end
rhoexp=[31.673;71.135;119.993;168.172;206.727;234.853;272.887;298.051;...
   28.415;61.993;100.346;139.581;175.201;203.883;245.666;274.016;...
   26.894;56.941;90.415;124.842;185.026;227.534;257.481;...
   23.264;48.44;74.948;101.844;151.983;192.645;224.033];
Error= (rhoexp-rho)./rhoexp*100; ErrorK270= Error(1:8);
ErrorK290= Error(9:16); ErrorK305= Error(17:23);
ErrorK340= Error(24:30);
figure(1)
plot(P(1:8)./1000,ErrorK270,'o')
hold on
plot(P(9:16)./1000,ErrorK290,'*')
plot(P(17:23)./1000,ErrorK305,'+')
plot(P(24:30)./1000,ErrorK340,'^')
ylabel('% Hata')
xlabel('MPa')
hold off
AAPD= mean(abs(Error));
figure(2)
plot(P(1:8)./1000,rho(1:8),'-o')
hold on
plot(P(1:8)./1000,rhoexp(1:8),'-*')
```

```
plot(P(9:16)./1000,rho(9:16),'-o')
plot(P(9:16)./1000,rhoexp(9:16),'-*')
plot(P(17:23)./1000,rho(17:23),'-o')
plot(P(17:23)./1000,rhoexp(17:23),'-*')
plot(P(24:30)./1000,rho(24:30),'-o')
plot(P(24:30)./1000,rhoexp(24:30),'-*')
ylabel('Yoğunluk [kg/m^3]')
xlabel('Basınç [MPa]')
```