



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



Tam Elektrikli Bir Otobüsün Çekiş Soğutma Sistemi İçin Saha Verileriyle
Doğrulanmış 1 Boyutlu Modelin Geliştirilmesi

Eren Barın- 032280032

BİTİRME PROJESİ

BURSA 2026

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Tam Elektrikli Bir Otobüsün Çekiş Soğutma Sistemi İçin Saha Verileriyle
Doğrulanmış 1 Boyutlu Modelin Geliştirilmesi

Eren Barın

032280032

Projenin Danışmanı: Prof. Dr. GÖKHAN SEVİLGİN

ÖZET

Küresel ulaşımdaki dönüşümle birlikte hızla yaygınlaşan elektrikli otobüslerde, güç elektroniği ve tahrik motorlarının ısı yönetimi, sistem güvenilirliği ve araç menzili açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, 12 metre uzunluğundaki elektrikli bir kent içi otobüsünün çekiş soğutma devresine ait fizik tabanlı, 1 boyutlu bir termal-hidrolik model MATLAB/Simscape ortamında geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin sınır koşulları, araç üzerinde gerçekleştirilen yol testleri sırasında doğrudan aracın CAN iletişim ağı üzerinden toplanan bileşen verileriyle tanımlanmıştır. Elektrik motoru, invertör ve DC-DC dönüştürücü gibi ana bileşenlere ait ısı kayıplar verim haritaları üzerinden hesaplanarak modele entegre edilmiş, pompa ve fan devirleri ise radyatör çıkış sıcaklığına bağlı kapalı çevrim bir kontrol algoritması ile yönetilmiştir.

Yaklaşık iki saat süren geniş hızlı saha testleri sonucunda, oluşturulan 1 boyutlu modelin sistem düzeyindeki sıcaklık yanıtını yüksek doğrulukla öngörebildiği kanıtlanmıştır. Sistem denge noktasını temsil eden radyatör çıkış sıcaklığında Hata Kareler Ortalamasının Karekökü 0,90 °C, Ortalama Mutlak Yüzde Hata ise %2,21 seviyesinde elde edilmiştir. Doğrulan model, mevcut soğutma devresi mimarisinin test edilen koşullarda tüm bileşenleri güvenli işletme sınırları içinde tutabildiğini göstermiş olup, gelecekteki enerji optimizasyonu ve adaptif kontrol stratejisi çalışmaları için güvenilir bir dijital ikiz altyapısı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Otobüs, Isıl Yönetim Sistemi, 1 Boyutlu Modelleme, Simscape, Araç İçi İletişim Ağı (CAN), Doğrulama.

İÇİNDEKİLER

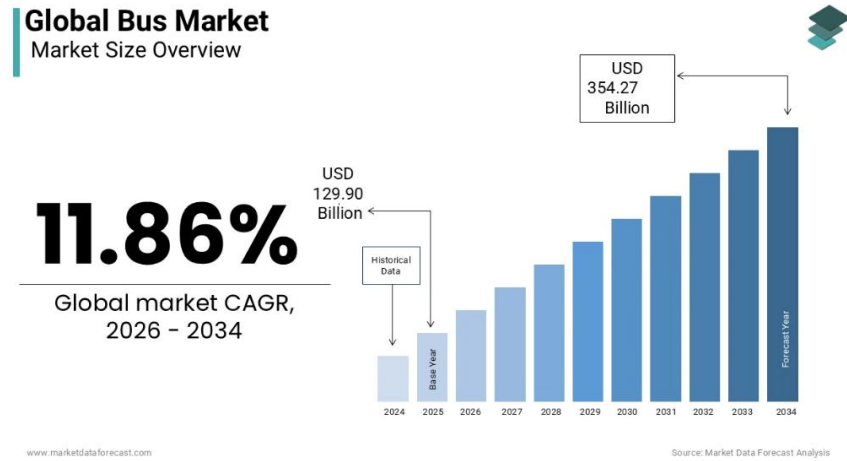
	<u>Sayfa No</u>
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM	5
2.1 İncelenen Araç ve Çekiş Soğutma Sistemi	5
2.1.1 Araç Teknik Özellikleri	5
2.1.2 Çekiş Soğutma Devresi Mimarisi	6
2.1.3 Sistem Bileşenlerinin Teknik Özellikleri	9
2.1.4 Deneysel Veri Toplama Sistemi	10
2.2 1 Boyutlu Sistemin Modellemesi	11
2.2.1 Yönetici Denklemler	11
2.2.2 Isıl Kayıpların Modellenmesi	13
2.2.3 Pompa ve Fan Karakteristiklerinin Modellenmesi	16
2.2.4 Isı Değiştirici ve Hidrolik Hatların Modellenmesi	18
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	20
3.1 1 Boyutlu Modelin Doğrulanması	20
3.1.1 Doğrulama Testi	20
3.1.2 Sıcaklık Yanıtının Doğrulanması	21
3.1.3 Doğrulama Sonuçları ve Değerlendirme	22
4. SONUÇLAR	26
5. REFERANSLAR	27

Şekiller ve Tablolar Dizini

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1 Market Data Forecast' e Ait Piyasa Analiz Raporu	1
Şekil 2 Karsan ATA-12M Tam Elektrikli Otobüs	5
Şekil 3 Soğutma Çevriminin Genel Yapısı.....	6
Şekil 4 Radyatörün Araç Üzerinde Konumlandırılması.....	7
Şekil 5 Soğutma Çevriminde Kullanılan Radyatör	8
Şekil 6 Araç Üzerinde Hava Kompresörünün Yerleşimi.....	10
Şekil 7 Vector CAN Arayüz Cihazı.....	11
Şekil 8 1 Boyutlu Modelin Senaryo Alt Sistemi.....	14
Şekil 9 Atıl Isının Sisteme Dahil Edilmesi.....	16
Şekil 10 1 Boyutlu Modelde Yer Alan Pompa Bloğu.....	17
Şekil 11 Radyatör, Fan ve Çalışma Algoritması Blokları.....	18
Şekil 12 Radyatöre Ait Detaylı Analiz,.....	18
Şekil 13 Sistemde Kullanılan Örnek EPDM Hortum.....	19
Şekil 14 Hortumların 1D Modellenmesi	19
Şekil 15 Test Güzergahı	20
Şekil 16 Test Süresince Araç Hızı Değişimi	21
Şekil 17 Radyatör Çıkış Sıcaklıklarının Karşılaştırılması.....	22
Şekil 18 DC-DC Akışkan Sıcaklıklarının Karşılaştırılması.....	23
Şekil 19 Sistem Bileşenlerine Ait Sıcaklık Değişimleri	24
Şekil 20 Sistem Bileşenlerine Ait Debi Değişimleri.....	25
 Tablo 1 Karsan ATA-12M Aracına Ait Teknik Özellikler	 6
Tablo 2 Kullanılan Akışkan Özellikleri	8
Tablo 3 Hata Analizi	24

1. GİRİŞ

İklim değışikliğı ve kentsel hava kirliliğı, küresel ulaşım politikalarını köklü biçimde dönüştürmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı verilerine [1] göre ulaşım sektörü, küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık yüzde yirmi dördünü oluşturmakta olup bu payın büyük bölümü karayolu taşımacılığından kaynaklanmaktadır. Kentsel toplu taşımacılık, yolcu başına enerji tüketimi bakımından özel araç kullanımına kıyasla belirgin avantaj sunmaktadır. Buna karşın dizel otobüsler hâlâ önemli miktarda azot oksit ve partikül madde emisyonuna yol açmaktadır. Bu bağlamda, Avrupa Birliğı Yeşil Mutabakatı ve sıfır emisyonlu araç hedefleri çerçevesinde elektrikli otobüsler kentsel ulaşımın daha temiz şekilde yapılması için önemli bir rol oynamaktadır. Nitekim Market Data Forecast'ın piyasa analizine göre [2] dünya otobüs pazarı, 2026–2034 yılları arasında yıllık bileşik büyüme oranının yüzde 11,86 olarak gerçekleşmesiyle birlikte 2025 yılındaki 129,90 milyar dolar değerinden 2034'te 354,27 milyar dolara ulaşması beklenmektedir. Bu büyüme ivmesinin önemli bir bölümü elektrikli ve hibrit modellere olan talebin artışından beslenmektedir. Söz konusu genişleme trendi, elektrikli otobüs bileşenlerinin güvenilirliğini, enerji verimliliğini ve kullanım ömrünü artırmaya yönelik mühendislik araştırmalarının önemini pekiştirmektedir.



Şekil 1 Market Data Forecast' e Ait Piyasa Analiz Raporu

Elektrikli otobüslerin yaygınlaşmasındaki teknik zorluklardan biri, tahrik grubu bileşenlerinin ısıl yönetimidir. Elektrikli tahrik sisteminde motor ve invertör, dönüştürme kayıplarına bağlı olarak yoğun ısıl yük üretmektedir. Tahrik motorlarında sargı izolasyon malzemeleri belirli sıcaklık sınırlarını aştığında bozulmaya başlamaktadır. Bu durum motorun verimini düşürmekte ve kullanım ömrünü kısaltmaktadır. İnvertör tarafında ise yüksek frekansta çalışan transistörlerin yarattığı ısıl dalgalanmalar zamanla malzemeyi yorar. Bu termal yorulma, iç bağlantı noktalarında lehim çatlakları veya katman ayrışmaları yaratarak sistemde kalıcı hasar bırakır [3]. Bu bileşenlerin sağlıklı çalışabilmesi için soğutma sıvısı sıcaklığının dar bir işletme bandında tutulması gerekmektedir. Öte yandan soğutma sisteminin kendisi de enerji açısından göz ardı edilemeyecek bir tüketicidir. Araştırmalar, soğutma ve iklim kontrol yüklerinin elektrikli araç menzili yüzde ellinin üzerinde azaltılabildiğini ortaya koymaktadır [4]. Bu oran, özellikle aşırı iklim koşulları ve uzun güzergâhlarda işletme ekonomisi üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır. Dolayısıyla çekiş soğutma sistemi, yalnızca bir güvenlik mekanizması olarak değil menzil, verimlilik ve toplam işletme maliyeti üzerinden değerlendirilmelidir.

12 metre uzunluğundaki standart bir elektrikli şehir otobüsünde ısıl yönetim sistemi birbirinden farklı işlevlere sahip birden fazla soğutma devresinden oluşmaktadır. Kabin iklimlendirme devresi yolcu konforunu sağlarken batarya termal yönetim sistemi hücre sıcaklıklarını optimum aralıkta tutmaya çalışmaktadır. Bunların yanı sıra tahrik grubu bileşenlerinin soğutulmasından sorumlu çekiş soğutma devresi bulunmaktadır. Bu devre elektrik motorlu soğutma pompası, soğutma fanı ve ısıyı atmosfere aktaran bir radyatörden oluşmaktadır. Tahrik soğutma devresindeki en önemli enerji tüketicileri soğutma pompası ve soğutma fanıdır. Bu iki bileşenin devir sayısı ve devreye alma stratejileri, sistemin enerji tüketimi için belirleyici role sahiptir. Örneğin pompanın ve fanın tam kapasitede çalıştırıldığı gereksiz yüksek devirli kullanımlar soğutma ihtiyacının çok üzerinde enerji harcanmasına yol açmaktadır. Yük ve sıcaklık koşullarına göre uyarlanabilir bir denetim stratejisi, bileşen sıcaklıklarını güvenli sınırlar içinde tutarken güç tüketimini önemli ölçüde azaltabilmektedir.

Sistem tasarımı ve denetim algoritması geliştirmeyi desteklemek amacıyla simülasyon tabanlı modelleme yaklaşımları giderek yaygınlaşmaktadır. Bu yaklaşımlar içinde tek boyutlu akışkan ağı simülasyonu, hesaplama verimliliği ve modelleme esnekliği açısından öne çıkmaktadır. 1D yöntemler boru hatlarını, ısı değiştiricileri, pompaları ve fanları basınç düşümü ile ısı transferi denklemleri üzerinden modelleyerek sistem yanıtını değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, pahalı ve zaman alan prototip deneylerinin sayısını önemli ölçüde azaltmaktadır. Erken tasarım aşamalarında ve denetim algoritması geliştirme süreçlerinde kolaylık sağlamaktadır. Daha yüksek çözünürlüklü üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri yerel akış alanlarını çözümleyebilmekle birlikte hesaplama maliyeti daha yüksektir ve sistem düzeyinde analizlere pratik biçimde uygulanmaları güçtür.

Literatürde araç soğutma sistemlerine yönelik çeşitli 1D ve bağlaışık 1D/3D simülasyon yaklaşımları geliştirilmiştir. Shen ve ark. [5], arkadan motorlu bir otobüsün motor bölmesindeki karmaşık akış alanını modellemek için Star-CCM+ ve KULI yazılımlarını birleştiren bir 1D/3D bağlaışık yaklaşım uygulamıştır. Ticari taşıt motor bölmesinin ısı yönetimine odaklanan bir diğer çalışmada [6], önerilen 1D/3D eş simülasyon yöntemi ile ara soğutucu modülü üzerinde ısı geri akış olgusu tespit edilmiş ve bir kanat yapısının eklenmesiyle soğutma devresi çıkış sıcaklığı yüzde 2,5, hava koşullandırma devresi ara soğutucu sabiti ise yüzde 12,1 oranında düşürülmüştür. Daha basit geometrilere sahip geleneksel yolcu araçları bağlamında yürütülen bir çalışmada [7] ise bileşen akış direnci karakteristikleri girdi alınarak yürütülen 1D durağan hal simülasyonunun akış hızı, basınç dağılımı ve sıcaklık artışlarını yeterli doğrulukla tahmin edebildiği ve özgün tasarıma kıyasla iyileştirme önerileri geliştirmeye olanak tanıdığı gösterilmiştir. Bir başka çalışmada ise Sevilgen ve arkadaşları [8], taşıt iklimlendirme sistemlerinin ısı performansını ve enerji tüketimini değerlendirmek amacıyla 1 boyutlu termal model geliştirmiştir. Farklı soğutucu akışkan alternatiflerinin çevresel güneş yükü altındaki kabin soğutma dinamiklerini incelenmiştir. Araştırma 1D sayısal simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle yüksek uyum sağladığını göstermiştir. Elektrikli araçlara özgü ısı yönetim modellemesinde ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı önemli katkılar sunmuştur. Kullanıcının devre topolojisini önceden tanımlamasına gerek kalmaksızın çalışan esnek bir soğutma devresi çözüm yöntemi içeren CoolSim

modelleme çatısı, MATLAB/Simulink ortamında geliştirilmiş [9] ve $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındaki on çalışma noktasında test tezgâhı verileriyle doğrulanmıştır. Basınç, sıcaklık, enerji ve kütsel debi için hata kareler ortalamasının karekökü yüzde yedinin altında kalmıştır. Aynı laboratuvarın bu çerçevenin temelini oluşturan bütünleşik EV ısı yönetim modelinde [4] ise kabin iklimlendirme ve soğutma sıvısı devreleri birlikte modellenmiştir. Deneysel verilerle karşılaştırmada sistem parametrelerinin büyük çoğunluğunda yüzde beş dahilinde uyum elde edilmiştir. Tam araç düzeyinde Broatch ve arkadaşları [10], tahrik grubu, yardımcı sistemler ve ısı yönetimi bir arada modelleyen kapsamlı bir 1D elektrikli kent otobüsü çerçevesi geliştirmiştir. Isıl devre yeniden yapılandırması ve ısı pompası entegrasyonu aracılığıyla batarya enerji tüketiminde sırasıyla yüzde 11,4 ve yüzde 3,9 azalma elde etmiştir. Farklı tahrik grubu topolojilerinin işletme verimliliğini karşılaştıran kapsamlı bir duyarlılık analizinde [11] ise batarya elektrikli otobüsler dahil altı farklı kentsel otobüs konfigürasyonu ele alınmıştır. Sürüş sertliği ve durak sıklığının enerji tüketimiyle en yüksek korelasyonu sergilediği gösterilmiştir. Bileşen düzeyinde ısı yönetim araştırmaları da önemli bulgular ortaya koymuştur. Lindh ve arkadaşları [12], elektrikli bir kent otobüsündeki elektrik motoruna yönelik doğrudan sıvı soğutma yöntemini tasarlamış, prototip oluşturmuş ve dinamometre testleriyle doğrulamıştır. Bu yöntem, 205 kW anma gücündeki motorda tam yüklü koşullarda maksimum sargı sıcaklığı yükselişini yalnızca $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile sınırlı tutmayı başarmıştır. İnvertör ısı yönetimine odaklanan bir başka çalışmada [3] ise sistemin yüksek bağlaşma derecesi, büyük zaman gecikmeleri ve dış bozunumlarından kaynaklanan güçlükler ele alınmış ve yaklaşımın kesin bir matematiksel model gerektirmeksizin ısı yönetim sisteminin sağlamlığını ve uyarlanabilirliğini artırdığı gösterilmiştir.

Yukarıdaki literatür incelemesi, araştırma alanındaki boşluğu ortaya koymaktadır. Mevcut çalışmaların büyük bölümü ya kabin iklimlendirmesi ve batarya ısı yönetimini de kapsayan bütünleşik ısı sistemleri ele almakta [4, 10], ya yüksek hesaplama maliyeti gerektiren 3D veya 1D/3D bağlaşık yöntemlere dayanmakta [5, 6], ya da ısı analizi motor ve invertör gibi tekil bileşen düzeyinde yürütmektedir [3, 12]. Elektrikli otobüslerin özgül olarak çekiş soğutma devresine odaklanan, gerçek araç ölçüm verileriyle doğrulanan ve pompa ile fan denetim algoritmalarının enerji verimliliğini kapsayan bütünleşik bir çalışmanın literatürde oldukça sınırlı olduğu görülmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 İncelenen Araç ve Çekiş Soğutma Sistemi

2.1.1 Araç Teknik Özellikleri

Bu çalışmada gerçekleştirilen tek boyutlu ısı modelleme ve enerji analizleri için referans araç olarak Karsan ATA-12M tam elektrikli kent içi otobüsü temel alınmıştır. Söz konusu araç, modern kentsel toplu taşıma gereksinimlerini karşılamak üzere tasarlanmış, 12.220 mm uzunluğa ve azami 19.000 kg yüklü ağırlığa sahip ağır hizmet sınıfı bir taşıttır. Yaklaşık 89 yolcu kapasitesine sahip olan otobüsün yüksek kütlesi ve geniş ön kesit alanı, sürüş döngüleri boyunca tahrik sistemi üzerinde oluşan mekanik yükleri doğrudan belirlemektedir.



Şekil 2 Karsan ATA-12M Tam Elektrikli Otobüs

Aracın tahrik sistemi, çalışmaya konu olan çekiş soğutma devresinin birincil ısı kaynağını oluşturmaktadır. Otobüs, maksimum 250 kW mekanik güç ve 22.000 Nm tork üretebilen bir elektrik motoru mimarisi ile donatılmıştır. Batarya kapasitesi 528 kWh'e kadar çıkabilen Lityum Demir Fosfat kimyasına sahip bir batarya paketi tarafından sağlanmaktadır. Bahsi geçen yüksek güç kapasitesi ve otobüsün toplam kütlesi özellikle sık dur kalk gerektiren kentsel sürüş profillerinde tahrik motoru ve güç elektroniği bileşenlerinde yoğun bir ısı yük üretimine yol açmaktadır. Dolayısıyla, soğutma sisteminin ısı atımını güvenli çalışma sıcaklıklarında tutacak şekilde yönetmesi

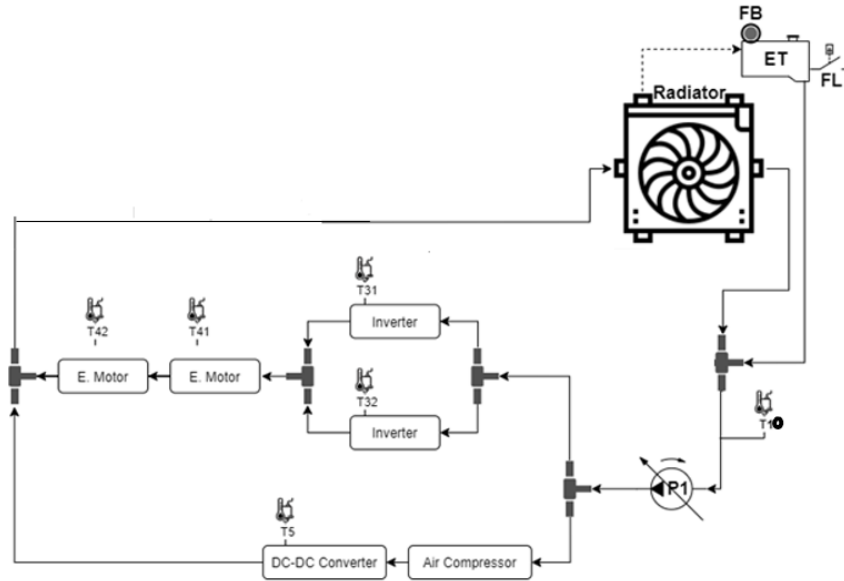
gerekmektedir. Referans araç platformuna ait temel teknik özellikler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Parametre	Değer
Tam Uzunluk / Genişlik / Yükseklik	12.220 / 2.550 / 3.350 mm
Azami Yüklü Ağırlık	19.000 kg (Opsiyonel 19.500 kg)
Yolcu Kapasitesi	~89 Kişi
Maksimum Hız	80 km/h
Operasyonel Menzil	500 km'ye kadar
Yüksek Voltaj Batarya Kimyası ve Kapasitesi	LFP- 528 kWh
Maksimum Motor Gücü	250 kW
Maksimum Tork	22.000 Nm

Tablo 1 Karsan ATA-12M Aracına Ait Teknik Özellikler [20]

2.1.2 Çekiş Soğutma Devresi Mimarisi

Elektrikli otobüsün çekiş soğutma devresi, tahrik grubu bileşenlerinde oluşan atık ısıyı atmosfere aktarmak üzere tasarlanmış kapalı çevrim bir sıvı soğutma sistemidir. İncelenen soğutma devresine ait genel yerleşim ve hidrolik akış mimarisi Şekil 3'te sunulmuştur. Bu bölümde soğutma devresinin ısıl ve hidrolik sınır şartlarını belirleyen ana akışkan tahrik ve ısı atım bileşenleri ele alınmıştır.



Şekil 3 Soğutma Çevriminin Genel Yapısı

Sistemde soğutma sıvısının sirkülasyonu, 24 V nominal gerilimle çalışan ve CAN haberleşme protokolü üzerinden oransal olarak kontrol edilebilen değişken devirli bir santrifüj pompa ile sağlanmaktadır. Pompa, tam yük operasyonlarında maksimum 500 W elektriksel güç tüketmekte olup 0,5 bar sistem basıncı altında 10.000 L/saat maksimum hidrolik debi kapasitesi sunmaktadır. Pompa devrinin operasyonel sıcaklık sınırlarına göre ayarlanabilmesi, sistemin enerji tüketiminin iyileştirilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, devredeki ısı genleşmeleri sönmölemek ve pompa emiş hattında hidrolik kavitasyonu önlemek amacıyla bir genleşme tankı da sisteme dahil edilmiştir.



Şekil 4 Radyatörün Araç Üzerinde Konumlandırılması

Devrede toplanan termal enerji, Şekil 4’ te görölen kısma konumlandırılmış sıvı-hava tipi bir radyatör aracılığıyla atmosfere atılmaktadır. Kullanılan ısı değıştirici 1235 mm genişliğinde, 250 mm yüksekliğinde ve 62 mm derinliğinde aktif ısı transfer yüzey alanına sahiptir. Isı transferini güçlendirmek amacıyla radyatör yüzeyine fan grubu entegre edilmiştir. Sistemin hava akış ihtiyacını karşılayan her bir fan modöü, 24 V doğru akım ile çalışmakta olup maksimum 130 W elektriksel güç tüketimine ve 225 mm pervane çapına sahiptir. Eksenel fan modöüleri tam kapasitede çalıştığında birim başına maksimum 1200 m³/saat hacimsel hava debisi ve 34 mmH₂O statik basınç üretebilmektedir.



Şekil 5 Soğutma Çevriminde Kullanılan Radyatör

Bileşenler arası sıvı sirkülasyonu, sistemin farklı bölgelerindeki spesifik hidrolik gereksinimleri karşılamak üzere değişken iç çaplara sahip EPDM kauçuk hortumlar ile sağlanmaktadır. EPDM malzemenin tercih edilmesi, sistemin yüksek işletme sıcaklıklarına karşı ısıl dayanım sağlarken aynı zamanda güç elektroniği bileşenleri için önemli olan elektriksel yalıtım gereksinimlerini de karşılamaktadır.

Sistemde kullanılan soğutucu akışkanın termal kapasitesi ve faz değişim sıcaklıkları sistem güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Saf suyun 0 °C'de donması ve 100 °C'de kaynaması, farklı zorlu iklim koşullarında operasyon gösteren otobüsler için yeterli güvenlik marjını sunmamaktadır. Bu kısıtlamaları aşmak ve korozyonu önlemek amacıyla incelenen çekiş soğutma devresinde endüstri standardı olan hacimce %50 su ve %50 etilen glikol karışımı kullanılmıştır.

Sıcaklık (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül Isı (J/(kg.K))	Isı İletim Katsayısı (W/(m.K))
-30	1095	3258	0.378
0	1082	3330	0.402
20	1072	3372	0.415
60	1048	3461	0.434
90	1026	3528	0.441

Tablo 2 Kullanılan Akışkan Özellikleri

2.1.3 Sistem Bileşenlerinin Teknik Özellikleri

Sistemde dolaşan akışkan, pompadan çıkar ve sistemin farklı ısı ve hidrolik gereksinimlerini karşılamak üzere iki ana paralel kola ayrılır. Bu kollardan birincisi yüksek güç yoğunluğuna sahip ana tahrik grubunu soğutmaktadır. İkinci kol yardımcı sistemlerin ısıl yönetimini sağlamaktadır.

Devrenin ana termal yükünü oluşturan birinci kolda, iki adet invertör ve iki adet elektrik motorundan oluşmaktadır. Hidrolik tasarımda homojen bir soğutma profili sağlamak amacıyla akışkan, öncelikle iki invertör üzerinden paralel olarak geçmekte ardından birleşerek iki elektrik motorunu seri olarak soğutmaktadır. Sistemde yer alan sıvı soğutmalı invertörler, 650 V nominal DC gerilim altında çalışmakta olup faz başına maksimum 350 A akım verebilmekte ve %98'in üzerinde nominal verimle görev yapmaktadır. İnvertörlerin sürdüğü iki adet asenkron motor ise toplam 250 kW tepe gücü ve 120 kW sürekli güç üretebilmektedir. Motorlara entegre edilmiş 22.66 dişli oranına sahip redüktörler sayesinde tekerleklerle maksimum 22.000 Nm çıkış torku aktarılabilmektedir.

İkinci soğutma kolunda ise pnömatik basınç üreten hava kompresörü ile aracın düşük voltajlı donanımlarını besleyen DC-DC konvertör hidrolik olarak seri konumlandırılmıştır. Pnömatik hava kompresörü, operasyonel hava basıncı gereksinimine bağlı olarak değişken yüklerde çalışmakta olup maksimum 7,1 kW elektriksel güç tüketebilmektedir. Kompresörden çıkan soğutma sıvısı, devredeki son eleman olan DC-DC konvertör üzerinden geçmektedir. Bu ünite, yüksek voltaj bataryasından aldığı 650 V nominal gerilimi 24 V seviyesine düşürerek alçak gerilim hattına 315 A sürekli akım ve 7,5 kW çıkış gücü sağlamaktadır. İkinci koldaki bu bileşenler, tahrik grubuna kıyasla daha düşük fakat sürekli bir ısı yük profili çizmektedir.



Şekil 6 Araç Üzerinde Hava Kompresörünün Yerleşimi

Her iki paralel koldan çıkan ısınmış soğutma sıvısı, ortak bir dönüş hattında birleşerek radyatör girişine yönlendirilmekte ve sistem çevrimi tamamlanmaktadır. Bileşenlerin burada sunulan elektromekanik sınır değerleri ve devre topolojisi, bir sonraki bölümde kurulacak olan 1 boyutlu Simscape hidrolik ve termal modelinin temelini oluşturmaktadır.

2.1.4 Deneysel Veri Toplama Sistemi

Kurulacak olan 1 boyutlu ısı modelin doğruluğunu test etmek ve sistemin dinamik sınır koşullarını belirlemek amacıyla gerçek araç koşullarındaki işletme verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada deneysel veriler, soğutma devresine dışarıdan fiziksel müdahalede bulunan ekstra sensörler eklemek yerine doğrudan aracın iletişim ağı olan CAN veri yolu üzerinden toplanmıştır. Çekiş soğutma devresinde yer alan bileşenlerin sıcaklık, devir sayısı, güç tüketimi ve akım değerleri gibi kendi anlık operasyonel verilerini sürekli olarak CAN hattına yayınlaması, sistemin bütünsel olarak izlenmesine olanak tanımıştır.

Verilerin toplanması, yorumlanması ve zamana bağlı olarak kaydedilmesi işlemleri için otomotiv standartlarına uygun, yüksek örnekleme hızına sahip Vector donanım ve yazılım arayüzü [13] kullanılmıştır. Dinamik yol testleri boyunca CAN hattı üzerinden okunan sinyaller aracın hızı, ortam sıcaklığı, bileşenlerin anlık sıcaklıkları ve pompa/fan devir komutları gibi parametreleri içerecek şekilde veri kaydediciye aktarılmıştır. Sürüş döngüleri boyunca kaydedilen bu deneysel veriler, hem Simscape modeline çevresel girdi

sağlamak hem de optimizasyon öncesi referans modelin gerçek dünya ile uyumluluğunu kanıtlamak amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 7 Vector CAN Arayüz Cihazı

2.2 1 Boyutlu Sistemin Modellemesi

2.2.1 Yönetici Denklemler

MATLAB/Simscape ortamında geliştirilen 1D model, farklı fizik etki alanlarını kullanan blokların birleşiminden oluşmaktadır. Her blok kütle, momentum ve enerji korunumu denklemlerini eş zamanlı olarak çözmektedir. Bu sayede soğutma sıvısının basınç, debi ve sıcaklık dağılımı sistem genelinde birbirine bağlı şekilde hesaplanmaktadır. Aşağıdaki alt bölümlerde modeli tanımlayan temel denklemler sunulmaktadır. Bu bölümde yer verilen bloklara ait denklemler, MathWorks Simscape fiziksel modelleme altyapısına [14] dayanmaktadır.

2.2.1.1 Kütle Korunumu

Sıkıştırılmaz akışkan ve rijit duvarlı boru kabulü altında, herhangi bir akış elemanına ait kütle korunumu [15]:

$$\dot{m}_{\text{giren}} = \dot{m}_{\text{çıkan}}$$

(1)

2.2.1.2 Momentum Korunumu ve Basınç Düşümü

Boru ve dirsek elemanlarında iki port arasındaki basınç farkı, sürtünme kayıpları ile yükseklik farkını kapsamaktadır [15, 16]:

$$p_A - p_B = \Delta p_f + \rho g \Delta z \quad (2)$$

2.2.1.3 Enerji Korunumu

Bir boru segmentinin toplam iç enerjisinin zaman türevi portlardan giren ve çıkan entalpik akışları, ısı port üzerinden gerçekleşen ısı transferini ve potansiyel enerji değişimini kapsamaktadır [14]:

$$\frac{dE}{dt} = \phi_A + \phi_B + Q_H - \dot{m}_{ort} g \Delta z \quad (3)$$

Sıkıştırılmaz akışkan kabulü altında iç enerji değişim hızı [15]:

$$\frac{dE}{dt} = \rho_0 c_p V \frac{dT_i}{dt} \quad (4)$$

Burada T_i iç sıvı sıcaklığını, V boru hacmini ve c_p akışkanın özgül ısısını ifade etmektedir. Çevre ortamıyla olan konvektif ısı transferi [15]:

$$Q_{conv} = c_{p,ort} |\dot{m}_{ort}| (T_H - T_{giris}) \left[1 - \exp \left(\frac{-h S_H}{c_{p,ort} |\dot{m}_{ort}|} \right) \right] \quad (5)$$

Denklem (5)'te yer alan Q_{conv} çevre ortamıyla gerçekleşen konvektif ısı transfer miktarını ifade etmektedir. Denklemde kullanılan $c_{p,ort}$ akışkanın ortalama özgül ısısını, $\dot{m}_{ort}$ ortalama kütleli debiyi, T_H çevre sıcaklığını ve T_{giris} ise akışkanın kontrol hacmine giriş sıcaklığını temsil etmektedir. Ayrıca, taşınım ile ısı transferi mekanizmasını karakterize eden parametrelerden h konvektif ısı transfer katsayısını, S_H ise ısı transferinin gerçekleştiği yüzey alanını göstermektedir.

2.2.1.4 Pompa, Fan ve Radyatör Modeli

Santrifüj pompa bloğu, turbomakine benzerlik yasalarına [17] dayalı analitik bir formülasyon kullanmaktadır. Fan bloğu benzerlik yasaları temelinde çalışmakta ve statik basınç artışını modellemektedir [14]. Radyatör bloğu ısı transferi ve akışkanlar denklemlerini kullanmaktadır [15]. Bu çalışmada bu denklemler yerine bileşenlere ait 2 boyutlu performans veri grafikleri kullanılmıştır.

2.2.2 Isıl Kayıpların Modellenmesi

Çekiş soğutma devresi üzerindeki ısı yükü, devreye bağlı güç elektroniği ve elektromekanik bileşenlerin enerji dönüşümü sırasında ürettiği kayıp güç oluşturmaktadır. Bu kayıpların gerçek sürüş koşullarını yansıtacak biçimde modele aktarılabilmesi amacıyla, Bölüm 2.1.4'te tanıtılan veri toplama sistemiyle kaydedilen CAN sinyalleri doğrudan girdi olarak kullanılmıştır. Araç üzerinde gerçekleştirilen sürüş çevrimi boyunca her bir bileşene ait gerilim, akım, devir sayısı ve tork büyüklükleri zaman serisi olarak kayıt altına alınmıştır. Sonrasında bu seriler simülasyon ortamına aktarılarak kayıp güç hesabının temelini oluşturmuştur. Böylece statik ısı yükler yerine, modelin ısıl girdileri aracın gerçek sürüş koşullarındaki anlık güç akışıyla modellenmiştir.

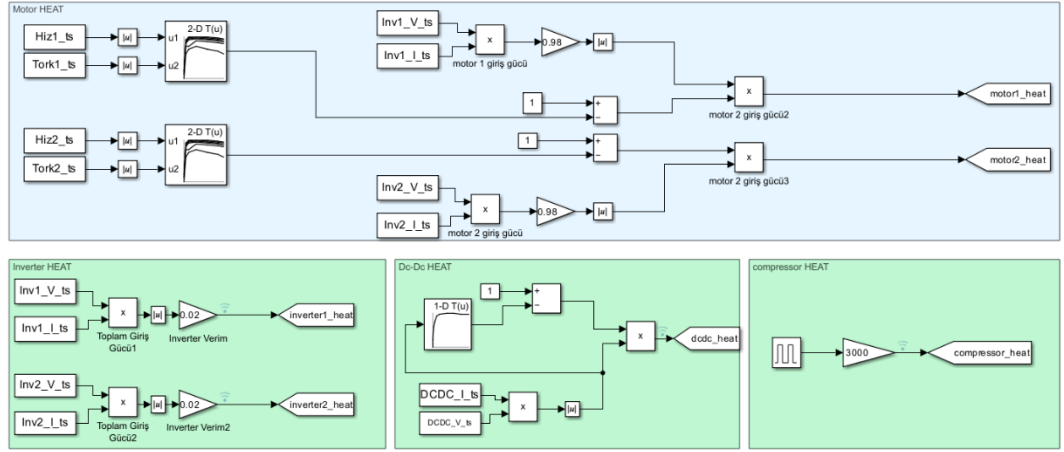
Kayıp güç hesabında izlenen genel yaklaşım, her bileşen için anlık giriş gücünün ölçülen elektriksel büyüklüklerden elde edilmesi ve bileşen verimi üzerinden atıl ısıya dönüşen payın ayrıştırılması esasına dayanmaktadır. Bir bileşene aktarılan anlık elektriksel güç, CAN kayıtlarından okunan DC hat gerilimi ve akımının çarpımıyla hesaplanmaktadır:

$$P_{giris}(t) = U(t) \cdot I(t) \quad (6)$$

Giriş gücünün faydalı işe dönüşmeyen bölümü ise bileşen verimi kullanılarak kayıp güç biçiminde ifade edilmektedir:

$$Q_{kayip}(t) = (1 - \eta)P_{giris}(t) \quad (7)$$

Verim değeri her bileşen için sabit bir katsayı olarak değil, üretici verilerinden elde edilen verim haritaları aracılığıyla çalışma noktasına bağlı şekilde tanımlanmıştır. Bu sayede kısmi yüklerde ve geçici rejimlerde verimin önemli ölçüde değişebildiği gerçeği modele yansıtılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan tüm sinyaller mutlak değer operatöründen geçirilmiştir. Rejeneratif frenleme sırasında akım ve tork işaretinin tersine dönmesine rağmen kayıpların fiziksel olarak pozitif ısı yük üretmeye devam etmesi sağlanmıştır. Şekil 8' de kayıp güç hesabına ait sinyal akış şeması sunulmaktadır.



Şekil 8 1 Boyutlu Modelin Senaryo Alt Sistemi

2.2.2.1 Motorların Modellenmesi

Asenkron çekiş motorlarının verimi, çalışma noktasına yani devir sayısı ve tork bileşimine kuvvetle bağlıdır. Bu bağımlılığı temsil etmek üzere, her iki motor için üretici tarafından sağlanan verim haritası iki boyutlu arama tablosu olarak modele işlenmiştir. Tablonun girişlerini CAN kayıtlarından alınan anlık motor devri $n(t)$ ve tork $T(t)$ zaman serileri oluşturmaktadır. Çıkışında ise ilgili çalışma noktasına karşılık gelen motor verimi elde edilmektedir:

$$\eta_m(t) = f(|n(t)|, |T(t)|)$$

(8)

Motora aktarılan elektriksel güç, motoru besleyen invertörün giriş gerilimi ve akımının çarpımının invertör verimiyle ölçeklenmesiyle hesaplanmaktadır. Böylece invertör çıkışındaki net güç motor girişi olarak tanımlanmıştır:

$$P_{m,giris}(t) = \eta_{inv} \cdot U_{inv}(t) \cdot I_{inv}(t) \quad (9)$$

Motorun ürettiği atıl ısı ise verim haritasından okunan anlık verim değeriyle giriş gücünün birleştirilmesiyle elde edilmektedir:

$$Q_m(t) = [1 - \eta_m(t)]P_{m,giris}(t) \quad (10)$$

Aynı hesaplama yapısı, araçtaki her iki portal aks motoru için kendi devir, tork, gerilim ve akım sinyalleri kullanılarak bağımsız olarak yürütülmüştür.

2.2.2.2 İnvvertörlerin Modellenmesi

Modern motor invertörlerinin verimi geniş bir yük aralığında %98 mertebesinde ve görece yatay bir karakterde seyretmektedir. Bu nedenle invertör kayıpları, üretici verisiyle uyumlu sabit bir verim üzerinden modellenmiştir:

$$Q_{inv}(t) = (1 - \eta_{inv})U_{inv}(t) \cdot I_{inv}(t) \quad (11)$$

Her iki invertör için kayıp hesabı, ilgili invertörün kendi DC hat gerilimi ve akımı kullanılarak ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

2.2.2.3 DC-DC Dönüştürücü

Yüksek gerilim hattını 24 V alçak gerilim şebekesine bağlayan DC-DC dönüştürücünün verimi, yük oranına belirgin biçimde bağımlıdır. Özellikle düşük yüklerde verim hızla düşmektedir. Bu davranışı yansıtmak amacıyla dönüştürücü verimi, üretici verim eğrisinden oluşturulan bir boyutlu arama tablosu ile yüke bağlı olarak tanımlanmıştır:

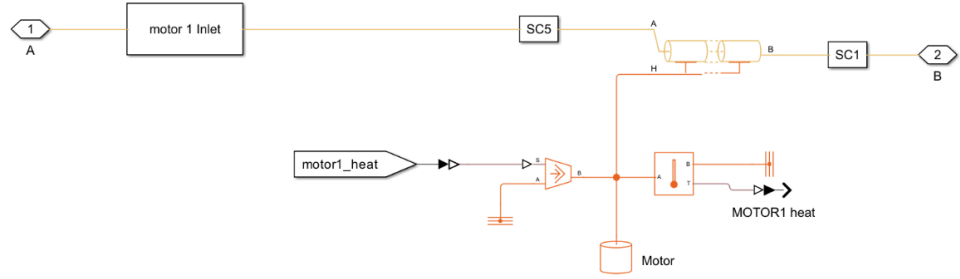
$$Q_{dcac}(t) = [1 - \eta_{dcac}(t)]P_{dcac}(t) \quad (12)$$

2.2.2.4 Hava Kompresörü

Pnömatik fren ve süspansiyon sistemini besleyen elektrikli hava kompresörü, hava tankı basıncına bağlı olarak aralıklı çalışma karakteri sergilemektedir. Sürüş kayıtlarındaki çalışma durma örüntüsüne dayanarak kompresörün ısı yükü, devreye girdiği zaman aralıklarında etkin olan sabit bir kayıp güç değeriyle temsil edilmiştir.

2.2.2.5 Isıl Yüklerin Hidrolik Devreye Aktarılması

Yukarıda tanımlanan güç sinyalleri, her bileşen için oluşturulan alt sistemlere aktarılmıştır. Her alt sistemde kayıp güç sinyali, ideal Isı Akısı Kaynağı bloğunu sürmektedir. Bu kaynak ısıyı, bileşen içinden geçen soğutma kanalını temsil eden boru bloğunun ısıl portuna basmaktadır. Isıl düğüme ayrıca bileşenin gövde ısıl kapasitesini temsil eden bir termal kütle bloğu bağlanmıştır. Bu yapı, üretilen ısıнын bir bölümünün bileşen kütlelerinde depolanmasına ve sıcaklık yanıtının gerçekçi bir zaman gecikmesiyle gelişmesine olanak tanımaktadır. Düğüm noktasına yerleştirilen sıcaklık sensörü, her bileşenin anlık gövde sıcaklığının izlenmesini ve Bölüm 3.1' deki doğrulama çalışmasında ölçüm verileriyle karşılaştırılmasını sağlamaktadır. Şekilde 9' da motor alt sistemine ait bağlantı yapısı örnek olarak gösterilmektedir.



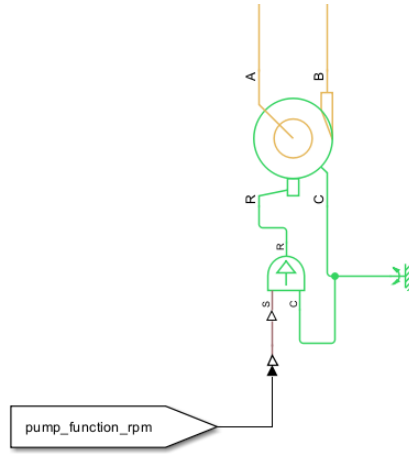
Şekil 9 Atıl ısıнын sisteme dahil edilmesi

2.2.3 Pompa ve Fan Karakteristiklerinin Modellenmesi

Soğutma sisteminin aktif tahrik elemanları olan santrifüj pompa ve radyatör fanı, sistemin anlık ısı yüküne göre yönetilmektedir. Bu amaçla, radyatör çıkışındaki soğutma sıvısı sıcaklığını geri besleme verisi olarak kullanan sıcaklık tabanlı kapalı çevrim bir kontrol algoritması geliştirilmiştir. Oransal bir kontrolcü mantığıyla kurgulanan bu

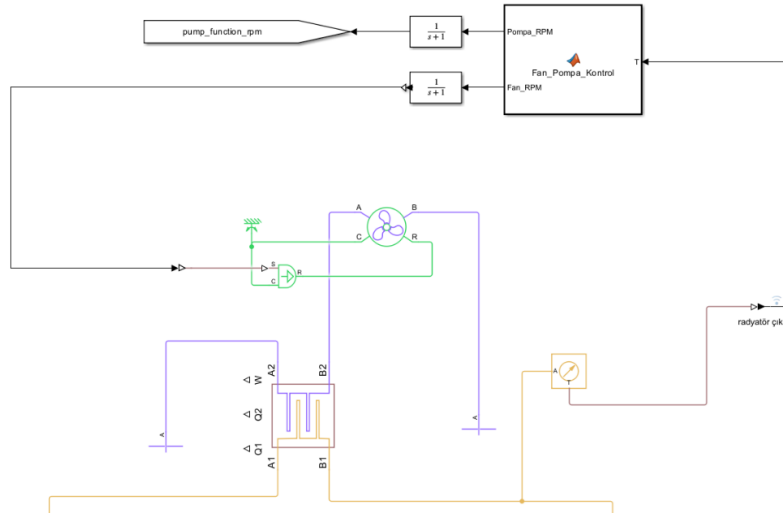
algoritma, bileşenlerin tahrik devirlerini sıcaklığın doğrusal bir fonksiyonu olarak belirlemektedir.

Elektrik motoru, invertör ve DC-DC dönüştürücü gibi bileşenlerde oluşabilecek bölgesel aşırı ısınmaları engellemek amacıyla, soğutma sıvısının sistemde daimi olarak sirküle etmesi gerekmektedir. Bu nedenle santrifüj pompa, radyatör çıkış sıcaklığı 30 °C 'nin altında olduğu durumlarda dahi sürekli olarak %50 kapasitede çalıştırılarak sistemde bir taban akışı sağlanmıştır. Sıcaklığın 30 °C eşiğini aşması durumunda ise pompa devri sıcaklıktaki her 1 °C' lik artış için kapasite %2,5 oranında yükselecek şekilde doğrusal olarak artırılmaktadır. Bu senaryoya göre pompa, 50°C sıcaklıkta maksimum hızı olan 3900 d/d değerine ulaşmaktadır.



Şekil 10 1 Boyutlu Modelde Yer Alan Pompa Bloğu

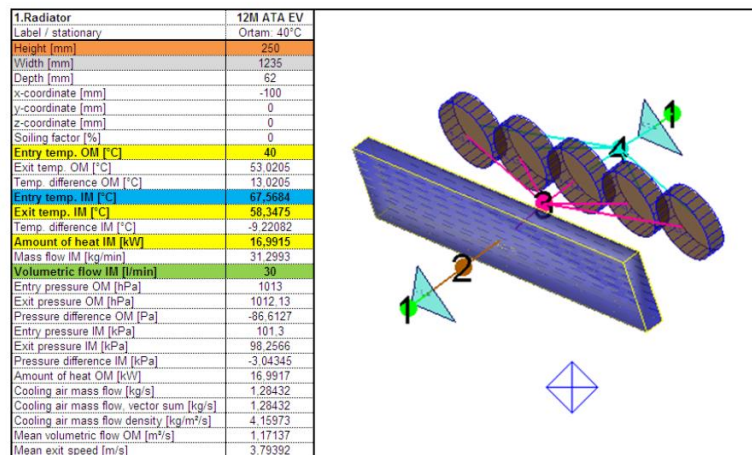
Radyatör fanı ise araç enerji tüketimini minimize etmek ve akustik gürültüyü azaltmak amacıyla yalnızca yüksek ısı yüklerinde devreye girecek şekilde programlanmıştır. Akışkan sıcaklığı 30°C' nin altındayken fan tamamen kapalı konumda tutulmaktadır. Sıcaklık 30°C'yi geçtiğinde fan devreye girmekte ve sıcaklıktaki her 1°C' lik artış için tahrik kapasitesi %3,3 oranında artırılmaktadır. Bu rampa profiliyle fan, yaklaşık 60,3°C' de maksimum dönüş hızı olan 3350 d/d değerine ulaşmaktadır.



Şekil 11 Radyatör, Fan ve Çalışma Algoritması Blokları

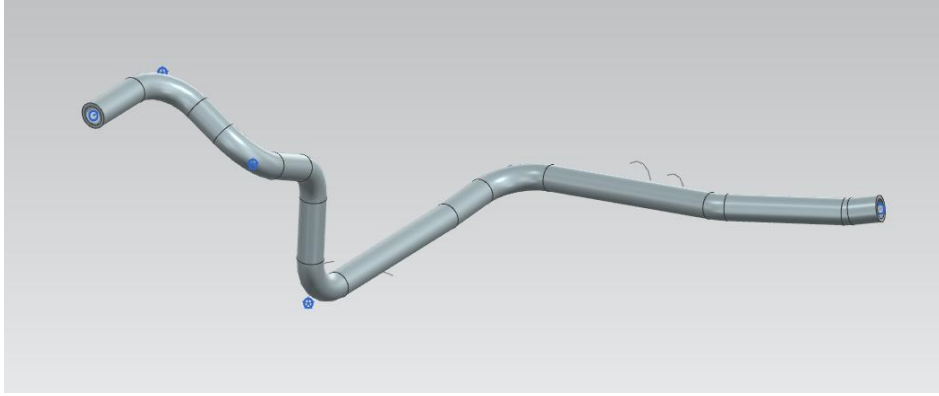
2.2.4 Isı Değiştirici ve Hidrolik Hatların Modellenmesi

Sistemdeki ana ısı atım elemanı olan radyatörün fiziksel modellemesinde, doğrudan genel geçer formüller kullanmak yerine üretici firma tarafından sağlanan yüksek doğruluklu ısıl performans ve basınç düşümü verileri referans alınmıştır. Şekil 12’ de yer verilen performans haritası 40 °C ortam sıcaklığında, farklı soğutma sıvısı debileri ve soğutma havası kütsel debileri altındaki sıcaklık düşümlerini ve ısı transfer kapasitelerini içermektedir. Üreticinin bu 1 boyutlu analiz sonuçları, Simscape ortamındaki radyatör bloğuna entegre edilmiştir. Isı değiştiricinin sıvı ve hava taraflarındaki hidrolik direnci ve ısı atım yeteneği, gerçek komponente uyumlu hale getirilmiştir.



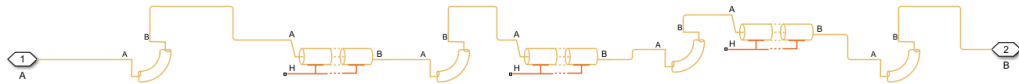
Şekil 12 Radyatöre Ait Detaylı Analiz,

12 metrelik elektrikli otobüs platformunun mimari yapısı gereği, çekiş bileşenlerini birbirine bağlayan EPDM soğutma hortumlarının uzunlukları ve yön değişimleri, devredeki toplam hidrolik basınç düşümünün ve akışkan eylemsizliğinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu nedenle hidrolik hatların modellenmesinde, Şekil 13'te görülen 3 boyutlu tasarım verileri örnek olarak gösterilmiştir. Hidrolik hat boyunca örnekteki hortum benzeri pek çok hortum aynı yöntem ile modellenmiştir.



Şekil 13 Sistemde Kullanılan Örnek EPDM Hortum

Sistemdeki karmaşık hortum rotaları, Simscape ortamında eşdeğer düz bir boru olarak basitleştirilmek yerine 3D tasarımdaki gerçek kıvrım açıları, eğrilik ve düz uzunluklar baz alınarak hidrolik olarak doğru modellenmiştir. Şekil 14'te gösterildiği üzere, hortum hatları ardışık düz boru ve dirsek bloklarının seri bağlanmasıyla kurgulanmıştır. Dirsek blokları, akış yönünün değişmesinden kaynaklanan yerel kayıp katsayılarını anlık hesaplamaktadır. Uygulanan bu modelleme sayesinde basınç düşümleri daha doğru yapılabilmektedir.



Şekil 14 Hortumların 1D Modellenmesi

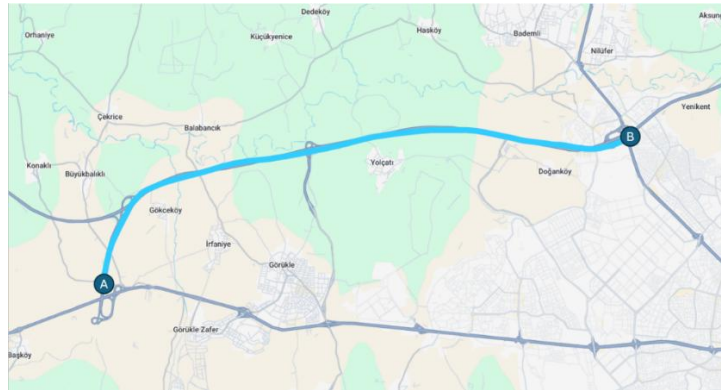
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 1 Boyutlu Modelin Doğrulanması

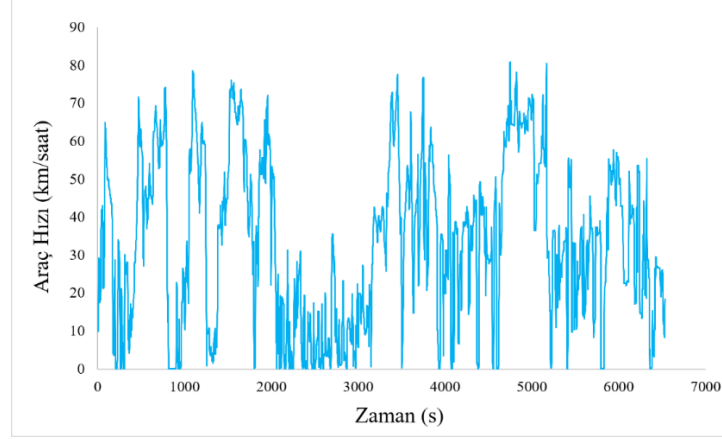
Bölüm 2.2' de kurulan modelin, gerçek işletme koşullarındaki ısısal davranışı ne ölçüde temsil ettiği saha testiyle sınanmıştır. Test sırasında kaydedilen elektriksel büyüklükler modele girdi olarak verilmiştir. Modelin hesapladığı soğutma sıvısı sıcaklıkları, aynı sürüşte ölçülen sıcaklıklarla karşılaştırılmıştır. Bu bölümde önce test düzeni ve veri seti tanıtılmaktadır. Son kısımda karşılaştırma noktaları ile hata ölçütleri tanımlanmakta ve doğrulama sonuçları değerlendirilmektedir.

3.1.1 Doğrulama Testi

Doğrulama verisi, Şekil 15' de gösterilen güzergahta gerçekleştirilen yaklaşık iki saatlik bir sürüşle toplanmıştır. Seçilen güzergah şehir içi dur kalk yapılabilecek bölümleri ve şehirler arası yüksek hızlı kesimleri bir arada içerecek biçimde seçilmiştir. Bu sayede soğutma sistemi geniş bir yük aralığında gözlemlenmiştir. Şekil 16' da görülebileceği üzere sürüş boyunca araç hızı 0–80 km/h aralığında değişmiş, ortalama hız 33 km/h olarak gerçekleşmiştir. Kat edilen mesafe yaklaşık 60 km'dir. Sürücünden, mümkün olan kesimlerde sert hızlanma ve yavaşlama yapması istenmiştir. Bu sayede tahrik grubunun ısısal yükü kasıtlı olarak artırılmıştır. Test süresince dış ortam sıcaklığı kayıt altına alınmış ve ortalama 20 °C olarak ölçülmüştür. Bu değer simülasyonda ortam sınır koşulu olarak kullanılmıştır.



Şekil 15 Test Güzergahı



Şekil 16 Test Süresince Araç Hızı Değişimi

Sürüş boyunca araç CAN hattındaki tüm mesajlar, Bölüm 2.1.4'te tanıtilan veri toplama sistemiyle kaydedilmiştir. Motor devri ve torku, invertör gerilim ve akımları, DC-DC dönüştürücü yük bilgisi ile kompresör çalışma durumu zaman serileri hâlinde çıkarılmış ve modele girdi olarak aktarılmıştır. Fan ve pompa devri direkt olarak kayıtlardan sisteme işlenmemiş, modele ait radyatör çıkış sıcaklığına bağlı olarak değişecek şekilde modellenmiştir.

3.1.2 Sıcaklık Yanıtının Doğrulanması

Model çıktıları, devre üzerindeki iki bağımsız sıcaklık ölçümüyle karşılaştırılmıştır. Birinci ölçüm noktası radyatör çıkışındaki soğutma sıvısı sıcaklık sensörüdür. Bu nokta, devredeki tüm ısı yüklerinin ve radyatörde atılan ısıнын ortak sonucunu yansıttığından sistem düzeyinde bir doğrulama büyüklüğü niteliğindedir. İkinci ölçüm noktası, DC-DC dönüştürücünün kendi iç sensöründen okuyarak CAN hattına ilettiği akışkan sıcaklığıdır. Bu sinyal bileşen düzeyinde, yani devrenin tek bir dalındaki yerel davranışın sınanmasına imkan vermektedir. DC-DC sıcaklık sinyalinin CAN üzerindeki çözünürlüğü 1 °C'dir. Ölçüm verisindeki basamaklı görünüm bu nedenle yaşanmıştır. Şekil 17 ve 18 'de radyatör çıkışı ve DC-DC akışkan sıcaklıklarının ölçüm ve simülasyon sonuçları zaman ekseninde karşılaştırılmaktadır.

Model ile ölçüm arasındaki uyum ortalama karekök hata literatürde bilinen ismiyle RMSE [18] üzerinden değerlendirilmiştir:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (T_2 - T_1)^2}$$

(13)

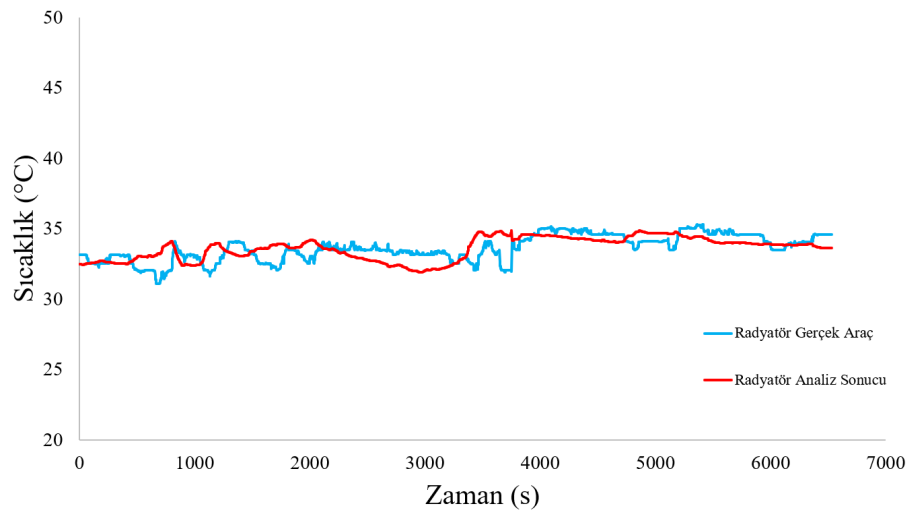
Burada T_2 ve T_1 sırasıyla k anındaki simülasyon ve ölçüm sıcaklıklarını, N ise örnek sayısını göstermektedir. Literatürdeki benzer çalışmalarla kıyas yapılabilmesi için ortalama mutlak yüzde hata [19] ayrıca raporlanmıştır.

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|$$

(14)

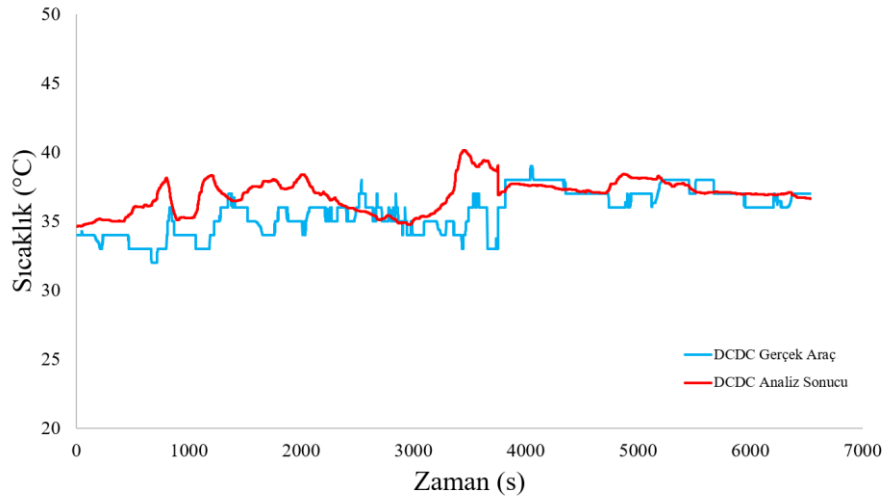
3.1.3 Doğrulama Sonuçları ve Değerlendirme

Radyatör çıkış sıcaklığına ait ölçüm ve simülasyon sonuçları Şekil 17’ de zaman ekseninde karşılaştırılmaktadır. Model, iki saatlik sürüş boyunca ölçümü dar bir bant içinde izlemektedir. Ölçülen sıcaklık 31,1–35,3 °C aralığında kalmış, simülasyon da aynı bandı üretmiştir. Sürüşün 3.300–4.000 s aralığındaki yüksek yüklü kesiminde ölçümde gözlenen sıcaklık yükselişi, zamanlaması ve genliğiyle birlikte model tarafından yakalanmıştır.



Şekil 17 Radyatör Çıkış Sıcaklıklarının Karşılaştırılması

DC-DC dönüştürücü akışkan sıcaklığına ait karşılaştırma Şekil 18’ de sunulmaktadır. Model bileşen sıcaklığını ortalamada yaklaşık 1,2 °C yüksek tahmin etmektedir. Fark özellikle sürüşün ilk yarısındaki yük tepelerinde belirginleşmekte, 4.000 s sonrasında ise iki seri büyük ölçüde örtüşmektedir. Bu sapmanın iki kaynağı öne çıkmaktadır. Birincisi, modeldeki sıcaklık düğümü ile bileşen içindeki sensörün fiziksel konumunun tam olarak aynı olmamasıdır. İkincisi, DC-DC kayıplarının üretici verim eğrisinden türetilmesidir. Eğrinin özellikle düşük yük bölgesindeki belirsizliği kayıp gücün bir miktar yüksek hesaplanmasına yol açabilmektedir.



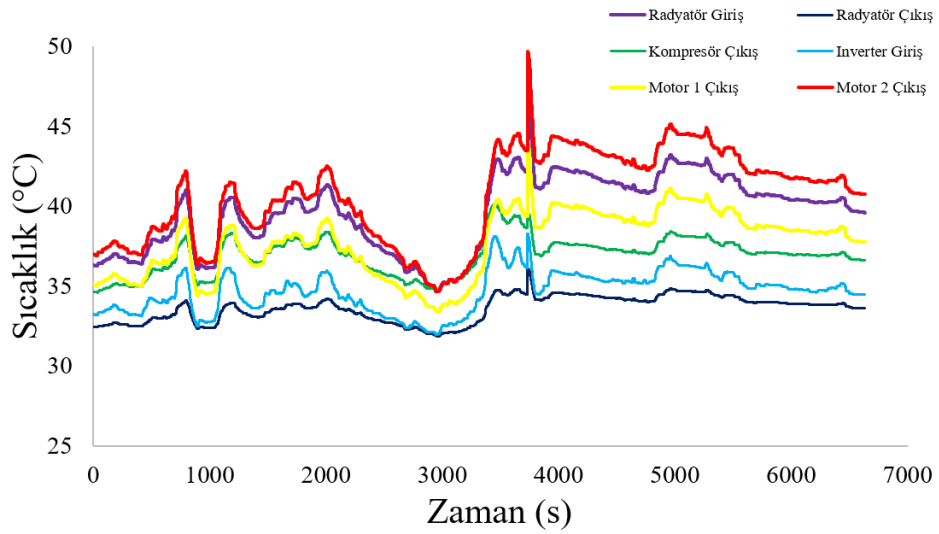
Şekil 18 DC-DC Akışkan Sıcaklıklarının Karşılaştırılması

Karşılaştırmanın sayısal özeti Tablo 2 'de verilmektedir. Sistem düzeyini temsil eden radyatör çıkışında RMSE 1 °C'nin altında kalmış, bileşen düzeyindeki DC-DC noktasında 2 °C mertebesinde gerçekleşmiştir. Maksimum mutlak hatalar her iki noktada da kısa süreli yük geçişlerine aittir ve kalıcı değildir. MAPE değerleri literatürdeki kabul eşiklerinin altındadır. Benzer 1D soğutma devresi modellerinde %7'nin altındaki bağlı hata kabul edilebilir bulunmuş [9], tam araç ölçeğindeki termal modellerde %5 mertebesinde uyum raporlanmıştır [4].

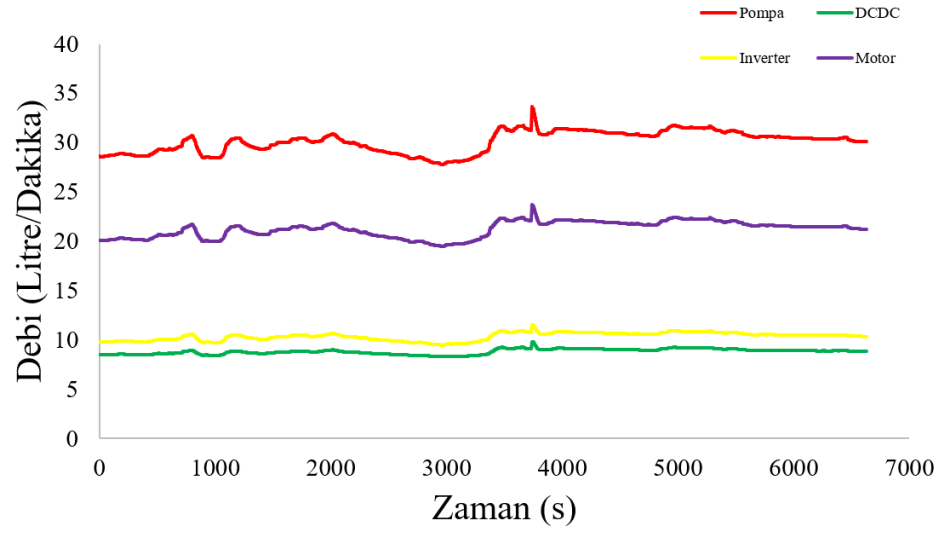
Karşılaştırma noktası	RMSE (°C)	Maks. Mutlak hata (°C)	MAPE (%)
Radyatör çıkış sıcaklığı	0.90	2.91	2.21
DC-DC akışkan sıcaklığı	2.01	7.10	4.12

Tablo 3 Hata Analizi

Doğrulan modelin devre genelinde ürettiği sıcaklık ve debi dağılımı Şekil 19 ve 20 'de sunulmaktadır. Sıcaklıklar beklenen fiziksel sıralamayı korumaktadır. En düşük sıcaklık radyatör çıkışında, en yüksek sıcaklık ise seri bağlı motor hattının ikinci motor çıkışında oluşmakta ve yüksek yüklü kesimde 45 °C bandına ulaşmaktadır. Pompa debisi test boyunca 28–34 l/dak aralığında seyretmiş olup motor, invertör ve DC-DC hatlarına ait debilerin sürüş boyunca kararlı kaldığı gözlenmiştir. Tüm bileşen sıcaklıklarının izin verilen işletme sınırlarının belirgin biçimde altında kalması, devrenin bu ortam koşulunda ısııl açıdan rahat bir bölgede çalıştığını göstermektedir.



Şekil 19 Sistem Bileşenlerine Ait Sıcaklık Değişimleri



Şekil 20 Sistem Bileşenlerine Ait Debi Değişimleri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 12 metre uzunluğundaki tam elektrikli bir otobüsün çekiş soğutma devresine ait fizik tabanlı, 1 boyutlu model geliştirilmiş ve gerçek araç yol testleriyle doğrulanmıştır. Doğrudan aracın CAN iletişim ağı üzerinden toplanan anlık bileşen verileriyle modelin sınır koşulları başarıyla oluşturulmuştur. Bu yaklaşım, elektrikli taşıt mimarilerinde 1 boyutlu model oluşturma süreçleri için pratik, güvenilir ve sisteme müdahale gerektirmeyen bir yöntem sunduğunu kanıtlamıştır.

Yaklaşık iki saat süren ve geniş bir hız bandını kapsayan saha testleri sonucunda, modelin sistem düzeyindeki parametreleri yüksek doğrulukla öngörebildiği görülmüştür. Sistem denge noktasını temsil eden radyatör çıkış sıcaklığında RMSE 0,90 °C ve MAPE %2,21 seviyesinde kalmış ve bu değerlerin literatürdeki tam araç ısıl modelleme kabul eşiklerinin belirgin biçimde altında olduğu tespit edilmiştir. Devrenin yerel bir dalında bulunan DC-DC dönüştürücü akışkan sıcaklığında ise hesaplanan RMSE 2,01 °C olarak gerçekleşmiştir. Meydana gelen maksimum 7,1 °C'lik anlık sapmaların kalıcı olmadığı, sensör yerleşimi ve verim eğrilerinin düşük yüklerdeki toleranslarından kaynaklandığı ve modelin kısa sürede tekrar fiziksel ölçüm bandına oturduğu gösterilmiştir. Ayrıca doğrulanan model üzerinden elde edilen sıcaklık ve debi dağılımları, mevcut soğutma devresi mimarisinin test edilen ortam koşullarında tüm bileşenleri güvenli işletme sınırları içinde tutabildiğini teyit etmiştir.

Sonuç olarak, geliştirilen 1D modeli, elektrikli otobüs platformunun çekiş soğutma devresi için yüksek doğruluklu bir dijital ikiz altyapısı sağlamıştır. Gerçek araç verileriyle eşleştiği kanıtlanan bu model, araç enerji verimliliğini artırmaya yönelik sistem düzeyindeki analizler için güvenilir bir temel oluşturmaktadır. Gelecek çalışmalarda, bu doğrulanmış model kullanılarak pompa ve fan çalışma algoritmalarının sıcaklığa bağlı adaptif yöntemlerle veya çeşitli optimizasyon stratejileriyle geliştirilmesi planlanmaktadır. Bu sayede, çekiş bileşenlerinin termal güvenliğinden ödün vermeden sistemin enerji tüketiminin en aza indirilmesi ve toplam operasyonel araç menzilin artırılması hedeflenmektedir.

5. REFERANSLAR

- [1] International Energy Agency. (2023). *Transport*. <https://www.iea.org/energy-system/transport>
- [2] Market Data Forecast. (2026, Mart). *Global Bus Market Size* (Rapor No. 16885). <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/bus-market>
- [3] Weng, X., Ma, Q., Yan, Y., Zhang, C., & Yang, S. (2025). Thermal management for inverters in the electric vehicle powertrain system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 09544070251387003. <https://doi.org/10.1177/09544070251387003>
- [4] Kiss, T., Lustbader, J., & Leighton, D. (2015). *Modeling of an electric vehicle thermal management system in MATLAB/Simulink* (No. 2015-01-1708). SAE Technical Paper.
- [5] Shen, K., Li, F., & Ni, J. (2014). 1d/3d coupling calculation analysis on bus cooling system. *Energy and Power Engineering*, 6(14), 550-556. <https://doi.org/10.4236/epe.2014.614048>
- [6] Shi, Z., Huang, Z., Chen, Q., Zhu, P., & Jiang, J. (2024). Thermal management performance analysis and improvement for a commercial vehicle engine compartment through a 1D/3D co-simulation method. *Advances in Mechanical Engineering*, 16(12), 16878132241301316. <https://doi.org/10.1177/16878132241301316>
- [7] Zhao, H., Lv, J., Liu, M., & Zhao, C. (2024). Analysis of automotive thermal management system using one-dimensional simulation. İçinde C. Chen (Ed.), *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. IOS Press. <https://doi.org/10.3233/FAIA231334>
- [8] Sevilgen, G., Bayram, H., & Kilic, M. (2021). The 1-D analysis of cool down simulation of vehicle HVAC system. *Thermal Science*, 25(3 Part A), 1677-1687.
- [9] Titov, G., Lustbader, J., Leighton, D., & Kiss, T. (2016, April). Matlab/simulink framework for modeling complex coolant flow configurations of advanced automotive thermal management systems. In *SAE 2016 World Congress and Exhibition*. SAE Technical Paper.

- [10] Broatch, A., Olmeda, P., Bares, P., & Aceros, S. (2023). Integral thermal management studies in winter conditions with a global model of a battery-powered electric bus. *Energies*, 16(1), 168. <https://doi.org/10.3390/en16010168>
- [11] Kivekäs, K., Lajunen, A., Vepsäläinen, J., & Tammi, K. (2018). City bus powertrain comparison: Driving cycle variation and passenger load sensitivity analysis. *Energies*, 11(7), 1755. <https://doi.org/10.3390/en11071755>
- [12] Lindh, P., Petrov, I., Immonen, P., Pyrhonen, J., Niemela, M., Anttila, J., Paakkinen, M., & Scherman, E. (2019). Performance of a direct-liquid-cooled motor in an electric bus under different load cycles. *IEEE Access*, 7, 86897-86905. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925711>
- [13] Vector Informatik GmbH. (2025). *VN1600 interface family hardware manual* (Version 3.2). <https://www.vector.com>
- [14] MathWorks. (2023). *Simscape Fluids User's Guide*. The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- [15] Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2014). *"Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications"* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- [16] Haaland, S. E. (1983). "Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow". *Journal of Fluids Engineering (ASME)*, 105(1), 89-90. <https://doi.org/10.1115/1.3240948>
- [17] White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics* (7th ed.). McGraw-Hill Education.
- [18] Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature", *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247-1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- [19] De Myttenaere, A., Golden, B., Le Grand, B., & Rossi, F. (2016). Mean absolute percentage error for regression models. *Neurocomputing*, 192, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.12.114>
- [20] <https://www.karsan.com/tr/100-elektrikli/e-ata-12> (2026)