

Advanced Automotive Engineering

Design, Modeling, and Sustainable Technologies



Editör
HASAN KÖTEN



BİDGE Yayınları

Advanced Automotive Engineering: Design, Modeling, and Sustainable Technologies

Editor: HASAN KOTEN

ISBN: 978-625-8567-89-2

1st Edition

Page Layout By: G zde Y CEL

Publication Date: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

All rights reserved. No part of this work may be reproduced in any form or by any means, except for brief quotations for promotional purposes with proper source attribution, without the written permission of the publisher and the editor.

Certificate No: 71374

All rights reserved   BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. şti.

G zeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9  ankaya / Ankara



İÇİNDEKİLER

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA TASARIMIN ÖNEMİ VE KRİTERLERİ	1
--	---

TEVFİK ATAMAN, MÜSLÜM GÜR

INVESTIGATION OF AUGMENTED REALITY-ENHANCED AUTOMOTIVE SECTOR PROCESSES	18
---	----

İBRAHİM YAVUZ, ERCAN ŞİMŞİR

SOME LOW-SPEED IMPACT TESTING DEVICES PREFERRED FOR EVALUATING THE MECHANICAL PERFORMANCE OF COMPOSITE MATERIALS	41
--	----

ERCAN ŞİMŞİR, İBRAHİM YAVUZ

TÜRKİYE'DE İKİNCİ EL ARAÇ SATIŞINDA SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK	57
---	----

MEHMET SİNAN, SELMAN İLTERİŞ YILMAZ, SEZER SEÇKİN ERDEM, BUKET KARADAĞ

System-level Electro-thermal Modeling of Battery Electric Vehicles in Matlab/simulink	71
---	----

TEVFİK ATAMAN, MÜSLÜM GÜR

CHAPTER 1

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA TASARIMIN ÖNEMİ VE KRİTERLERİ

Tevfik ATAMAN¹
Müslüm GÜR²

Giriş

Elektrikli araçlar (EA), otomotiv endüstrisindeki en köklü dönüşümlerden birinin merkezinde yer almaktadır. İlk elektrikli araç örnekleri 19. yüzyıl sonlarında ortaya çıkmış olsa da, içten yanmalı motorlu araçların gölgesinde uzun bir süre nispeten sınırlı kaldılar. Ancak özellikle son on yılda, enerji verimliliği, çevresel kaygılar ve batarya teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde elektrikli araçlara olan ilgi ve yatırım büyük ölçüde arttı (Lampón, 2022). 2020’li yıllarla birlikte bir yandan hükümetlerin karbon emisyonlarını sınırlayan düzenlemeleri, diğer yandan batarya maliyetlerinin düşmesi, elektrikli araç üretimini ve AR-GE faaliyetlerini hızlandırmıştır. Bunun bir sonucu olarak elektrikli araç tasarımı

¹ Öğr. Gör. Dr., Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Çankırı/Türkiye, Orcid: 0000-0003-1346-5651, tevfikataman@karatekin.edu.tr

² Öğr. Gör., Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Çankırı/Türkiye, Orcid: 0000-0002-4842-5345, muslumgur@karatekin.edu.tr

akademik literatürde geniş bir araştırma alanı haline gelmiştir (Kalhor ve ark., 2025). Güncel araştırmalar, elektrikli araç pazarında giderek ortak bir “hakim mimari” oluşmaya başladığını dahi öne sürmektedir (Khan & Cameron, 2025). Bu durum, elektrikli araçlarda tasarımın kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Elektrikli araçlarda tasarım, geleneksel içten yanmalı motorlu araçlardan farklı öncelikler ve zorluklar içerir. Örneğin, içten yanmalı araçlarda büyük hacimli bir motor ve aktarma organları bulunurken, elektrikli araçlarda bunların yerini büyük bir batarya paketi, elektrik motorları ve güç elektroniği sistemleri alır. Batarya paketi, elektrikli aracın “yakıt deposu” işlevini gören en ağır ve hacimli bileşendir; dolayısıyla nereye ve nasıl yerleştirildiği aracın performansını, güvenliğini ve verimliliğini doğrudan etkiler (Arora ve ark., 2016). Aynı şekilde, elektrikli motorların konumu (ön/arka veya her iki aks) ve sayısı, güç elektroniği birimlerinin (invertör, dönüştürücüler vb.) düzeni, ve rejeneratif frenleme gibi yeni özellikler de aracın tasarım mimarisini içten yanmalı araçlardan farklı kılmaktadır (Khan & Cameron, 2025). Tüm bu unsurlar, tasarım kararlarının elektrikli araç menzili, sürüş dinamikleri ve güvenlik performansı üzerindeki kritik etkisini ortaya koymaktadır. Nitekim Yadav ve Srivastava (2024), elektrikli araç şasisinin geleneksel araçlara kıyasla farklı önceliklerle yeniden tanımlandığını; ağırlık dağılımı, yapısal dayanım ve aerodinamik iyileştirmelerin optimal menzil, ivmelenme ve enerji verimliliği için belirleyici olduğunu vurgulamıştır (Yadav & Srivastava, 2024).

Akademik literatürde elektrikli araç tasarımına ilişkin başlıca konular aşağıdaki şekilde özetlenebilir: (i) Batarya teknolojileri ve paketleme çözümleri: Yüksek enerji ve güç yoğunluklu bataryaların geliştirilmesi yanında, bu bataryaların araç içerisinde stratejik konumlandırılması ve mekanik olarak güvenli entegrasyonu geniş çapta incelenmektedir (Arora ve ark., 2016; Kalhor ve ark., 2025). (ii) Ağırlık azaltma ve malzeme seçimi: Ağır batarya paketlerinin dezavantajını dengelemek için gelişmiş hafif malzemeler (alüminyum alaşımlar, karbon fiber kompozitler, ileri yüksek dayanımlı çelikler vb.) ve yenilikçi gövde mimarileri kullanılmakta, bu konuda hem endüstride hem akademide yoğun çalışmalar

yapılmaktadır (Kalhor ve ark., 2025). Örneğin, BMW i3 gibi bir modelde yolcu kabini karbon fiber takviyeli polimerden, şasi ise alüminyumdan üretilerek batarya ağırlığına rağmen toplam kütle azaltılmış ve %50'ye yakın ideal ağırlık dağılımı elde edilmiştir. (iii) Termal yönetim ve soğutma sistemleri: Yüksek güçlü lityum-iyon bataryaların güvenli ve verimli çalışması için dar bir sıcaklık aralığında tutulmaları gerekir. Batarya sıcaklığının düzgün kontrolü, hücre ömrünü uzatmak ve termal kaçak riskini önlemek için şarttır (Karimi & Li, 2013). Bu kapsamda hava soğutma, sıvı soğutma, ısı boruları ve soğutucu akışkanlı sistemler gibi çeşitli batarya termal yönetim stratejileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Karimi & Li, 2013; Kalhor ve ark., 2025). (iv) Güç elektroniği ve aktarma organları tasarımı: Elektrikli araçlarda invertörler, dönüştürücüler ve şarj üniteleri gibi güç elektroniği bileşenlerinin yerleşimi ve entegrasyonu da önemli bir tasarım kriteridir. Yüksek gerilimli kabloların mümkün olduğunca kısa tutulması ve bu bileşenlerin etkin soğutulması için genellikle motorlara yakın konumlandırıldıkları görülür (Khan & Cameron, 2025). Ayrıca bazı tasarımlarda motor ve invertör fiziksel olarak entegre edilerek hacim ve ağırlık kazanımı sağlanmıştır (Wang ve ark., 2021). (v) Aerodinamik iyileştirmeler: İçten yanmalı araçlarda da önemli olan aerodinamik tasarım, elektrikli araçlarda menzil üzerinde doğrudan etkili olduğu için kritik bir rol oynar. Yüksek hızlarda aracın enerji tüketiminin büyük kısmı aerodinamik sürtünmeye harcandığından, sürüklenme katsayısının (C_d) düşürülmesi menzili artırmanın en etkili yollarından biridir (Sangüesa ve ark., 2021). Motora yönelik büyük radyatör ızgaraları gerekmemesi, düz bir alt taban yapısı gibi avantajlar sayesinde elektrikli araçlarda aerodinamik tasarım daha da optimize edilebilmektedir. (vi) Güvenlik ve çarpışma dayanımı: Elektrikli araçlar, ağır batarya paketleri ve farklı kütle dağılımları nedeniyle çarpışma güvenliği açısından yeni sınamalara sahiptir. Batarya paketinin darbe anında hasar görmemesi ve yolcuların yüksek gerilimden korunması için yapısal takviyeler, batarya koruma kafesleri ve otomatik izolatör sistemleri tasarımın ayrılmaz parçasıdır (Navale ve ark., 2021). Bu alanda yapılan çalışmalar, konvansiyonel araçların çarpışma bölgelerinin elektrikli araçlara uyarlanması, batarya muhafazalarının çarpışma enerjisini

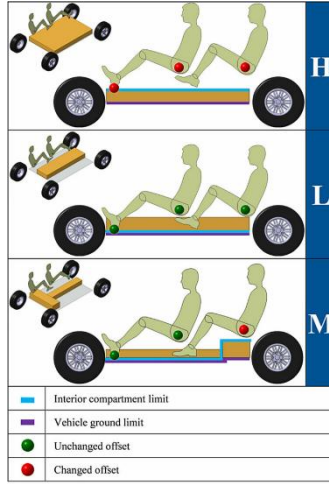
sönümleyecek şekilde tasarlanması ve darbe sonrası elektrik kesme sistemlerinin (pyrofuse vb.) güvenilirliğinin artırılması gibi konulara odaklanmaktadır (Kulkarni ve ark., 2023).

Literatürdeki bu konular incelendiğinde, elektrikli araç tasarımının disiplinlerarası bir yaklaşım gerektirdiği anlaşılmaktadır. Araç gövde mühendisliği, malzeme bilimi, termal bilimler, elektrik-elektronik ve otomotiv güvenliği alanları birbirine entegre şekilde çalışmaktadır. Özellikle batarya yerleşimi, ağırlık yönetimi, termal kontrol ve güvenlik konuları, hemen her akademik çalışmada öne çıkan ortak temalardır. Devam eden bölümlerde, elektrikli araçlarda temel tasarım kriterleri bu başlıklar altında daha detaylı ve örneklerle ele alınacaktır.

Elektrikli Araçlarda Temel Tasarım Kriterleri

Batarya Yerleşimi

Elektrikli araç tasarımının merkezinde batarya paketinin konumu bulunmaktadır. Batarya yerleşimi, aracın ağırlık merkezi, iç mekân düzeni, yapısal dayanımı ve güvenliği üzerinde belirleyicidir. Genel eğilim, batarya modüllerinin araç tabanına, dingiller arasındaki alana yerleştirilmesidir. Bu yaklaşım, bataryayı hem darbe bölgelerinden uzak tutar hem de ağırlık merkezini aşağı çeker (Arora ve ark., 2016). Nitekim günümüzde Audi e-tron, VW ID.3, Tesla Model 3, Chevrolet Bolt, Mazda MX-30 gibi birçok modern elektrikli araç, geniş ve düz bir batarya paketini şasi tabanına entegre eden bu “skateboard” platform mimarisini kullanmaktadır (Nicoletti ve ark., 2021). Bunun sonucunda batarya, aracın yapısal bir parçası haline gelmekte ve gövde rijitliğine de katkı sağlamaktadır. Bataryanın alt konumda geniş alan kaplayacak şekilde konumlandırılması, yolcu kabininde daha fazla alan kazanımı da sağlar; örneğin, şaft tüneli veya yakıt deposu çıkıntıları olmadan düz bir zemin elde edilebilir. Şekil 1’de farklı batarya yerleşim konfigürasyonları görülmektedir.



Şekil 1: Farklı batarya yerleşim konfigürasyonları.

H düzeninde batarya, araç içi tabanın altında tüm taban alanını kaplayacak şekilde yerleştirilir; bu durumda batarya yüksekliği yolcu oturma pozisyonunu yükseltir ancak maksimum batarya hacmi sağlar. L düzeninde batarya, kabin tabanını yükseltmeyecek biçimde örneğin aracın arka bölümüne veya şanzıman tüneli boşluğuna yerleştirilir; böylece iç mekân yüksekliği korunur ancak sığabilecek batarya boyutu daha küçüktür. M düzeni ise bataryanın kısmen tabana entegre, kısmen de kabin dışında konumlandığı bir ara çözümdür (Nicoletti ve ark., 2021). Gerçek dünyada, spor otomobillerde bazen alçak taban (örneğin Rimac Concept One), şehir otomobillerinde ise karma yaklaşımlar (örneğin ilk nesil Nissan Leaf) görülmüştür. Günümüzde ise çoğu yeni model, yüksek taban düzenine benzer şekilde bataryayı araca yayararak hem menzil hem denge avantajı elde etmektedir.

Batarya yerleşiminin tasarım kriterleri incelendiğinde birkaç temel gereksinim ortaya çıkar: (i) Ağırlık merkezi ve denge: Batarya, oldukça ağır olduğundan mümkün olduğunca alçak bir konuma yerleştirilmelidir. Alt tabana yerleştirilen batarya paketi, aracın ağırlık merkezini düşürerek viraj dengesi ve yol tutuşunu iyileştirir (Kalhor ve ark., 2025). (ii) Yolcu güvenliği: Yüksek voltajlı batarya,

yolcu kabininden izole bir bölmede olmalı ve çarpışma durumunda deformasyon bölgelerinin dışında kalmalıdır. Bu nedenle batarya paketinin ön ve arka tampon bölgelerinden belirli bir mesafede içeride konumlandırılması gerekir (Kalhor ve ark., 2025). Olası bir kazada bataryanın darbe alması halinde oluşabilecek enerji salımı ve yangın riski, büyük batarya kapasiteleriyle daha da kritik hale gelmiştir (Kulkarni ve ark., 2023). Dolayısıyla batarya, şasi içinde korunaklı bir kafes yapıyla çevrelenmeli ve aracın yapısal bütünlüğüyle uyumlu bir biçimde yerleştirilmelidir. (iii) Termal yönetim: Batarya paketinin konumu, soğutma ve havalandırma imkanlarını da etkiler. Bataryaların etrafında yeterli hava akımı sağlanabilecek bir düzen, doğal soğutmaya katkı yapabilir. Ancak genellikle zemin altındaki bataryalar için ilave aktif soğutma sistemleri (örneğin sıvı soğutma devreleri) gereklidir. Örneğin yaz mevsiminde asfalt yol yüzeyinin ısısı batarya alt yüzeyine iletilebilir; bu durumda zemin altı batarya düzenine sahip araçlarda bile ek sıvı soğutma plakaları veya soğutucu devreleriyle batarya sıcaklığı kontrol altında tutulur (Kalhor ve ark., 2025). (iv) Bakım ve modülerlik: Bataryanın araç altına konumlandırılması, bakım ve değiştirme süreçlerini de etkiler. Bu tasarımda batarya paketi genellikle cıvatarla şasiye bağlanır ve gerektiğinde aşağıya doğru sökülüp çıkarılabilir şekilde planlanır. Modüler batarya yaklaşımları, paketin belirli bölümlerinin değişimini veya kademeli yükseltmesini mümkün kılar (Arora ve ark., 2018). Örneğin bazı elektrikli otobüslerde batarya modülleri hızlı değişim gözetilerek yan bölmelere yerleştirilmiştir; ancak binek araçlarda alt taban yerleşimi ağırlıklı olarak tercih edildiğinden modülerlik daha çok iç yapıda sağlanmaktadır.

Sonuç olarak, batarya yerleşimi elektrikli araç tasarımının belki de en özgün karar alanıdır. Doğru tasarlanmış bir batarya konumu, maksimum menzil, optimum ağırlık dağılımı ve yüksek güvenlik hedeflerini aynı anda destekleyebilir. Bu nedenle mühendisler, batarya için mümkün olan en güvenli ve verimli noktayı belirlemek üzere çok disiplinli simülasyonlar ve optimizasyonlar gerçekleştirmektedir (Arora ve ark., 2016).

Ağırlık Merkezi ve Dağılımı

Elektrikli araçlarda ağırlık merkezi yüksekliğinin ve ön-arka ağırlık dağılımının ayarlanması, araç dinamiği açısından kritik önemdedir. Bataryaların ağır olması nedeniyle elektrikli araçlar genellikle benzer boyuttaki içten yanmalı araçlardan daha yüksek toplam kütleyle sahiptir. Fakat bu ağırlığın zemine yakın ve merkezde toplanabilmesi, denge ve yol tutuş avantajı sağlayabilir. Düz tabanlı batarya yerleşimi sayesinde birçok modern elektrikli araç, yerçekimi merkezini çok aşağıya çekebilmiş ve 50:50'ye yakın ön-arka ağırlık dağılımı yakalayabilmiştir (Nicoletti ve ark., 2021). Örneğin, Porsche Taycan veya Tesla Model S gibi performans odaklı elektrikli araçların ağırlık dağılımları yaklaşık dengededir ve bu da yüksek hızda stabiliteye katkı sunar.

Ağırlık merkezi konumunun etkileri literatürde hem araç simülasyonlarıyla hem de deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur. Gori ve arkadaşlarının (2024) çalışmasında, bir elektrikli aracın ağırlık merkezinin daha arkaya veya daha öne kaydırılmasının direksiyon davranışını değiştirdiği ve araçta önden kayma (understeer) ya da arkadan kayma (oversteer) eğilimlerini etkilediği gösterilmiştir. Özellikle yüksek kütleli bataryanın konumu, aracın dönüşlerdeki ağırlık transferini belirlemekte; ağırlığın arka tarafa fazla kayması halinde ani yük transferlerinde arkadan savrulma riski artabilmektedir (Gori ve ark., 2024). Dolayısıyla ideal tasarımda batarya ve motorların konumlandırılmasıyla ön ve arka aks üzerindeki yük dağılımı dengelenmeye çalışılır. Klasik bir spor otomobil hedefi olan yaklaşık %50 ön / %50 arka dağılım, elektrikli araçlarda sıkça mümkündür çünkü büyük batarya kütlesi dingiller arasına yayılarak merkezi bir kütle bloğu oluşturur.

Ağırlık merkezinin dikey yüksekliği de bir diğer önemli parametredir. Ağırlık merkezi yükseldikçe aracın virajlarda yana yatma açısı ve devrilme momenti artar, bu istenmeyen bir durumdur. Bataryanın alt yerleşimi sayesinde elektrikli araçlar bu açıdan avantajlıdır; kütlenin büyük bölümünün zemine yakın olması, viraj alırken gövde salınımını azaltır ve daha öngörülebilir bir yol tutuş karakteristiği sunar (Kalhor ve ark., 2025). Bu nedenle SUV gibi

yüksek araç formlarında bile, zemin altı batarya sayesinde devrilme eğilimi geleneksel muadillerine göre daha düşük olabilir.

Ancak ağırlık merkezi konusunun tasarımıda bazı yan etkileri de göz önüne alınmalıdır. Örneğin, fazla düşük bir ağırlık merkezi de her zaman ideal olmayabilir; süspansiyon geometrisi ve yol pürüzleriyle etkileşim açısından belirli bir optimum yükseklik aralığı gerekebilir. Ayrıca elektrikli aracın toplam ağırlığının artması, frenleme mesafelerini ve lastik-aşını oranlarını da etkileyebilir. Tasarımcılar, batarya ve araç kütlesini azaltmak için hafif malzemeler kullansalar da, mevcut enerji depolama teknolojileri gereği belirli bir ağırlık artışı kaçınılmazdır. Bu yüzden modern elektrikli araçlarda ağırlık azaltma çalışmaları, tasarım kriterlerinin başında gelmektedir (Kalhor ve ark., 2025). Örneğin, bazı üreticiler batarya kasalarını yapısal malzeme olarak kullanarak gereksiz şasi ağırlığını elimine etmeye çalışmakta, böylece toplam kütleyi kontrol altında tutmaktadır (Krüger ve ark., 2022).

Sonuç olarak, elektrikli araçlarda ağırlık merkezi ve dağılımı, sürüş güvenliği ve performans için temel bir tasarım kriteridir. İyi dengelenmiş bir elektrikli araç, yüksek hızda stabil, ani manevralarda kontrollü ve virajlarda nötr bir duruş sergiler. Bu hedeflere ulaşmak için batarya yerleşimi ve şasi tasarımı entegre bir şekilde ele alınmalı; hem statik hem dinamik yük dağılımları mühendislik hesaplarıyla optimize edilmelidir (Gori ve ark., 2024).

Soğutma ve Termal Yönetim

Elektrikli araçlarda soğutma ve termal yönetim, özellikle batarya paketi ve güç aktarma sistemlerinin güvenli çalışması için yaşamsal önemdedir. Lityum-iyon bataryaların performansı ve ömrü, hücre sıcaklığının ısıtıcı-soğutucu sistemlerle kontrol altında tutulmasına bağlıdır (Karimi & Li, 2013). Tipik bir batarya hücresi en verimli ve güvenli olarak 20-35°C aralığında çalışır. Bu aralığın dışında, gerek kapasite kullanımında düşüş, gerekse uzun vadede hücrede hasar ve ömrün kısalması söz konusudur. Daha da önemlisi, aşırı ısınma durumlarında bataryalarda termal kaçak adı verilen, hücrelerin alev almasına dek varabilen zincirleme reaksiyonlar meydana gelebilir. Bu riskler nedeniyle elektrikli araç tasarımıda

Batarya Termal Yönetim Sistemi (BTYS) kritik bir bileşen haline gelmiştir (Feng ve ark., 2020).

Batarya soğutma stratejileri temelde pasif (doğal havalandırma, ısı yayımı) ve aktif (zorlanmış hava, sıvı soğutma, soğutucu akışkan kullanımı, ısı pompası vb.) yöntemler olarak ikiye ayrılır. Günümüz elektrikli otomobillerinin büyük çoğunluğu, batarya modülleri arasında dolaşan bir sıvı soğutma devresine sahiptir. Bu devre, radyatör ve su pompası yardımıyla batarya hücrelerinden aldığı ısıyı aracın ön tarafındaki ısı değiştirgecine ileterek dış ortama atar (Pesaran, 2002). Örneğin, Tesla Model 3'te batarya paketinin altında ve içinde dolaşan glikol bazlı soğutma kanalları bulunmaktadır; benzer şekilde birçok üretici hücreler arasına yerleştirilen plakalar üzerinden sıvı soğutma uygulamaktadır (Karimi & Li, 2013). Sıvı soğutma sistemleri, yüksek ısı yükleri etkin şekilde taşıyabildiği için hızlı şarj veya sportif sürüş gibi bataryanın çok ısındığı durumlarda dahi hücre sıcaklıklarını eşit ve kabul edilebilir seviyelerde tutabilir.

Bazı elektrikli araçlar ise özellikle düşük maliyetli modellerde hava soğutma veya kombinasyon sistemleri kullanır. Hava soğutmalı batarya dizaynında, batarya kutusu içerisinde fanlarla sirküle edilen hava akımları hücreler arasından geçirilerek ısı dağıtılır. Bu yöntem yapı olarak daha basit ve hafif olsa da, ısı iletkenliği düşüktür ve çok yüksek enerji yoğunluklu paketlerde yetersiz kalabilir (Karimi & Li, 2013). Bu nedenle genelde sadece hibrit araçların küçük batarya paketlerinde veya bazı şehir içi düşük menzil araçlarında hava soğutma tek başına kullanılmıştır. Son yıllarda ısı pompası entegrasyonu da popüler hale gelmiştir: Isı pompası, soğuk havalarda batarya ve kabin ısıtmasını verimli şekilde sağlarken, sıcak havalarda ters çevrimle soğutmaya destek olur. Böylece aracın menzilinı etkileyen klima kullanımı optimize edilir.

Özetle, elektrikli araçlarda soğutma ve termal yönetim sistemleri, batarya ve elektrifikasyon bileşenlerinin performans, ömür ve güvenlik kriterlerini karşılayabilmesi için hayati önem taşır. İyi tasarlanmış bir termal yönetim, batarya hücrelerinin ömrünü uzatır, araç performansının tutarlı olmasını sağlar ve aşırı sıcaklık

kaynaklı arıza veya yangın riskini en aza indirir (Karimi & Li, 2013). Bu nedenle elektrikli araç tasarım süreçlerinde termal analizler ve testler, mekanik tasarım kadar ön plandadır. Güncel araştırmalar, batarya paketleri için daha etkin soğutma yöntemleri (ör. soğutucu akışkanlar, faz değiştiren malzemeler, mikroyapılı ısı yayıcılar) geliştirmeye odaklanmıştır. Tüm bu çabaların amacı, elektrikli araçları her iklim ve koşulda güvenilir ve uzun ömürlü kılacak akıllı termal yönetim çözümleri tasarlamaktır.

Aerodinamik Tasarım

Aerodinamik, tüm kara taşıtlarında olduğu gibi elektrikli araçlarda da enerji verimliliğini ve yüksek hız performansını belirleyen önemli bir kriterdir. Ancak elektrikli araçlar için aerodinamik tasarım, menzili doğrudan etkilediği için daha da ön plana çıkmıştır. Yüksek hızlarda (örneğin otoyol sürüşünde) bir elektrikli aracın harcadığı gücün büyük bölümü hava sürtünmesini yenmeye gider. Bu nedenle aracın aerodinamik sürüklenme katsayısını (C_d) düşürmek, aynı batarya kapasitesiyle daha uzun menzil elde etmenin kilit yollarından biridir (Sangüesa ve ark., 2021). Örneğin, 0.30 yerine 0.23 C_d değerine sahip bir elektrikli otomobil, otoyol hızlarında kayda değer oranda daha az enerji tüketecek ve menzili yüzlerce kilometre artırabilecektir.

Elektrikli araç tasarımcıları, içten yanmalı araçlara kıyasla aerodinamik açıdan bazı avantajlara sahiptir: Ön ızgarada büyük bir radyatör alanına ihtiyaç duyulmaz (sadece küçük bir soğutma modülü çoğu durumda yeterlidir), egzoz borusu gibi alt gövde çıkıntıları yoktur ve batarya nedeniyle alt zemin düz bir yapıda tasarlanabilir. Bu sayede modern elektrikli araçlar daha temiz bir ön profil ve düz alt gövde ile tasarlanarak hava akışını düzgün yönlendirebilmektedir. Örneğin, Tesla Model S ilk çıktığında yaklaşık 0.24 C_d değeri ile seri üretim sedanlar arasında en aerodinamik araçlardan biri olmuştur. Benzer şekilde Mercedes-Benz EQS modeli $C_d \approx 0.20$ ile rekor seviyede düşük sürüklenme katsayısına ulaşmıştır. Bu değerlere ulaşmak için araçların ön cephe alanı küçültülmüş, tavan çizgileri optimize edilmiş ve alt bölümlerde kapsamlı rüzgar tüneli testleri yapılmıştır.

Aerodinamik tasarımın etkileri üzerine yapılan çalışmalar, sürtünme kuvvetlerinin azalmasının özellikle yüksek hızlarda enerjiden tasarruf sağladığını sayısal olarak ortaya koymaktadır (Sangüesa ve ark., 2021). Şehir içi düşük hızlarda ana kayıp noktası genelde rejeneratif frenleme ile kısmen geri kazanılabilen ivmelenme/deivmelenme enerjileri iken, otoyolda bir elektrikli aracın en büyük menzil düşmanı rüzgar direncidir. Bu yüzden menzil odaklı tasarlanan elektrikli son derece düşük sürtünmeli gövdelere sahiptir.

Aerodinamik tasarım aynı zamanda yüksek hız stabilitesi ve gürültü üzerinde de etkilidir. Elektrikli araçlar motor gürültüsü çok az olduğu için yüksek hızlarda rüzgar sürtünme sesleri daha belirgin hale gelir. Bu yüzden aerodinamik optimizasyon, sadece verimlilik değil konfor için de önem arz eder. Gövde üzerindeki aynaların, cam fitillerinin ve panellerin rüzgar sesi yaratmayacak şekilde şekillendirilmesi, premium elektrikli araçlarda özel olarak çalışılan bir konudur.

Sonuç olarak, elektrikli araçlarda aerodinamik tasarım kriterleri, menzil kazanımı, yüksek hız dengesi ve düşük gürültü hedefleri doğrultusunda şekillenir. İçten yanmalı araçların aksine, tasarımcılar daha kapalı ve sade bir dış form avantajına sahiptir, ancak bataryaların boyut ve ağırlıkça getirdiği kısıtlar da göz ardı edilemez. Tüm araç formunun; ön, yan ve arka akışlarının bilgisayar destekli akış dinamiği (CFD) ve rüzgar tüneli testleriyle optimize edilmesi günümüz elektrikli araç geliştirme süreçlerinin vazgeçilmez bir parçasıdır (Czyż ve ark., 2019). Bu sayede her yeni nesil elektrikli araç, bir öncekine göre daha düşük C_d değerlerine yaklaşmakta ve enerjiyi her kilometrede daha verimli kullanmaktadır.

Teknik Gereklilikler ve Regülasyonlar

Elektrikli araç tasarımı, sadece performans ve verimlilik hedefleriyle değil, aynı zamanda çeşitli standartlar ve regülasyonlar tarafından belirlenen teknik gerekliliklerle de şekillenir. Otomotiv endüstrisinde güvenlik, çevre ve kalite konularında uluslararası standartlar, elektrikli araçlar için de uyarlanmış veya yeni

hazırlanmıştır. Tasarımcılar, araçlarını geliştirirken bu gereklilikleri en baştan dikkate alırlar.

En önemli standartlardan biri ISO 6469 serisidir. ISO 6469, elektrikli kara araçlarının güvenliğine ilişkin kapsamlı gereklilikleri tanımlar. Örneğin ISO 6469-1 (2019) standardı, elektrikli araçlarda yeniden şarj edilebilir enerji depolama sistemleri (RESS) için güvenlik gereklerini ortaya koyar (ISO, 2019). Bu kapsamda batarya sisteminin aşırı şarj/deşarja, kısa devreye, darbeye, titreşime karşı dayanımı, izolasyon direnci değerleri gibi konular tanımlanmıştır. ISO 6469'un diğer bölümleri araç üstü yüksek gerilim devrelerinin güvenliği ve araç kullanım şartlarında alınacak tedbirleri içerir. Ayrıca elektrikli araçların fonksiyonel güvenliği için genel otomotiv standardı olan ISO 26262 uygulanmaktadır. ISO 26262 (2018 revizyonu), elektrikli/elektronik sistemlerde oluşabilecek arızaların güvenlik risklerini analiz etmeyi ve gereken önlemleri almayı şart koşar. Elektrikli bir aracın batarya yönetim sistemi, çekiş kontrolü gibi hayati kontrolörleri bu standarda göre “ASIL” seviyelerinde güvenlik derecelendirmesine tabi olabilir.

Amerikan Otomotiv Mühendisleri Topluluğu (SAE) de elektrikli araçlar konusunda yönergeler yayımlamıştır. SAE J2344 standardı, elektrikli ve hibrit araçlarda yüksek voltaj güvenliği ile ilgili teknik kılavuzları içerir (SAE, 2020). Bu kılavuz, tasarım sırasında dikkate alınması gereken güvenlik ilkelerini tanımlar: Yüksek gerilimli bileşenlerin etiketlenmesi, dokunma koruması, servis durumunda güvenlik, kaza anında otomatik kapanma gibi. Yine SAE tarafından batarya sistemlerine yönelik test prosedürleri (örn. SAE J2464 – batarya zorlayıcı testleri) ve şarj bağlantı standartları (SAE J1772 – AC şarj konnektörü standardı) geliştirilmiştir. Elektrikli araç tasarımcıları, özellikle şarj sistemleri ve batarya güvenliği konusunda SAE standartlarına uygunluk gözetir.

Bir diğer kritik düzenleyici çerçeve ise Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu (UNECE) yönetmelikleridir. Örneğin UNECE Regülasyon No.100 elektrikli araçların elektrik güvenliğine dair uniform kuralları belirler (UNECE, 2013). Bu

regölasyon, elektrikli aracın kullanım sırasında kullanıcıların yüksek voltaja karşı korunmasını, batarya sisteminin emniyetini ve çarpışma anında elektrik kesilmesini zorunlu kılar. UNECE R100, pek çok bölgede tip onayı için şarttır ve araç tasarımı bu gerekleri karşılayacak şekilde yapılır. Yine UNECE R94 (ön çarpışma koruması) ve R95 (yan çarpışma koruması) gibi genel araç güvenlik yönetmelikleri, elektrikli araçlar için de aynen geçerlidir. Bu testlerde elektrikli araçların bataryalarıyla birlikte gerekli korumayı sağlaması beklenir; ek olarak test sonrası belirli bir süre bataryada yangın çıkmaması şartı gibi elektrikli araçlara özgü kriterler de uygulanır.

Batarya güvenliğine ilişkin uluslararası çapta başka standartlar da mevcuttur. Örneğin Çin’de uygulanan GB/T standartları veya Avrupa Birliği’nin ECE R136 (özellikle elektrikli motosikletler için) gibi düzenlemeleri, farklı coğrafyalarda elektrikli araç tasarımını yönlendirir. Tüm bu teknik düzenlemelerin ortak noktası, elektrikli araçların güvenli, çevreyle uyumlu ve kullanıcı dostu olması için asgari gereklilikleri tanımlamalarıdır. Tasarım mühendisleri, aracın konsept aşamasından itibaren bu maddelere uyumu sağlamakla yükümlüdür.

Sonuç ve Değerlendirme

Elektrikli araçlarda tasarımın önemi, bu bölüm boyunca ele aldığımız tüm kriter ve örneklerle açıkça ortaya konmuştur. Geleneksel otomobil mühendisliğinin birikimi üzerine inşa edilen elektrikli araç tasarımı, pek çok yeni meydan okumayı da beraberinde getirmiştir. Batarya paketinin araca entegrasyonu, ağırlık merkezi ve dağılımının optimize edilmesi, termal yönetim sistemlerinin etkinliği, güç elektroniği ve motor yerleşimi, aerodinamik iyileştirmeler ve güvenlik unsurları gibi konular, elektrikli araçların başarısında kritik rol oynar.

Bir elektrikli aracın teknik üstünlüğü ya da pazar başarısı, büyük ölçüde iyi bir tasarım ile mümkün olmaktadır. İyi tasarlanmış bir elektrikli araç, sınıfının en iyi menzilini sunabilir, yüksek

performansla birlikte güvenli ve konforlu bir sürüş sağlayabilir. Tasarım kararları; aracın menzilinden batarya ömrüne, hızlanma performansından çarpışma anındaki davranışına kadar pek çok sonucu belirler. Bu nedenle otomotiv tasarım ekipleri, sadece mekanik tasarımcıları değil, malzeme bilimcileri, elektrik mühendisleri, yazılım geliştiriciler ve hatta kimya uzmanlarını barındıran multidisipliner bir yapıya bürünmüştür.

Güncel literatür ve endüstri uygulamaları, elektrikli araç tasarımının bazı yönlerde ortak bir optimuma doğru ilerlediğini göstermektedir (Khan & Cameron, 2025). Örneğin dingiller arası batarya yerleşimi ve modüler platform yaklaşımı artık neredeyse tüm üreticilerin benimsediği bir standart haline gelmiştir. Yine aerodinamik tasarımda kapalı ızgara ve düz alt taban gibi özellikler, elektrikli araçların imzası olmuştur. Bu ortak tasarım diline karşın, rekabet üstünlüğü sağlamak isteyen markalar farklı malzemeler, farklı motor konfigürasyonları veya özgün yazılım yetenekleri ile ayrılmaya çalışmaktadır. Özellikle batarya teknolojisindeki gelişmeler (örneğin enerji yoğunluğu yüksek yeni nesil hücreler, yapısal batarya konseptleri) ve güç elektroniğindeki ilerlemeler (daha verimli yarıiletkenler, entegre güç modülleri) elektrikli araç tasarımına yeni fırsatlar sunacaktır.

Elektrikli araç tasarımında bir diğer boyut da sürdürülebilirlik ve yaşam döngüsü perspektifidir. Bu araçlar kullanım sırasında sıfır emisyonlu olsalar da üretimleri ve ömür sonu süreçleri tasarımın sorumluluk alanına girmektedir. Dolayısıyla günümüzde tasarım kriterlerine, batarya ve araç bileşenlerinin geri dönüştürülebilirliği, toplam karbon ayak izi gibi faktörler de eklenmeye başlamıştır (Kalhor ve ark., 2025). Örneğin bazı üreticiler, batarya paketlerini ikinci ömür enerji depolama sistemlerine uygun tasarlamakta, ya da araç ömrü sonunda kolay demonte edilecek malzeme bağlantıları kullanmaktadır. Bu yaklaşım, gelecekte elektrikli araçların döngüsel ekonomi içinde daha verimli yer almasını sağlayacaktır.

Sonuç olarak, elektrikli araçlarda tasarım; mühendislik prensiplerinin yenilikçi uygulamalarla birleştiği, heyecan verici bir

gelişim alanıdır. Elektrikli araç tasarımı, hem geleneksel otomotiv bilgisini hem de elektrik, elektronik ve malzeme bilimindeki yenilikleri harmanlayan bütüncül bir bakış açısı gerektirir. Bu bölümde sunulan temel konular – batarya yerleşimi, ağırlık merkezi, termal yönetim, güç elektroniği, aerodinamik, güvenlik ve şasi entegrasyonu – elektrikli araçların başarısında belirleyici olmaya devam edecektir. Gelecekte katı hal bataryalar, otonom sürüş ve yeni üretim teknikleri gibi faktörler bu tasarım kriterlerini değiştirebilir veya yeni öncelikler getirebilir. Ancak temel hedef aynı kalacaktır: Daha uzun menzilli, daha hızlı, daha güvenli ve daha sürdürülebilir elektrikli araçlar tasarlamak. Bu hedef doğrultusunda, akademik araştırmalar ve endüstriyel inovasyonlar el ele ilerlemekte; elektrikli araçların tasarımı sürekli olarak daha iyiyi arayan bir evrim sergilemektedir.

Kaynakça

Arora, S., Shen, W., & Kapoor, A. (2016). Review of mechanical design and strategic placement technique of a robust battery pack for electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1319–1331.

Arora, S., Kapoor, A., & Shen, W. (2018). Application of robust design methodology to battery packs for electric vehicles: Identification of critical technical requirements for modular architecture. *Batteries*, 4(3), 30.

Belingardi, G., & Scattina, A. (2023). Battery pack and underbody: Integration in the structure design for battery electric vehicles—Challenges and solutions. *Vehicles*, 5(2), 498–514.

Gori, V., Hendrix, W., Das, A., & Sun, Z. (2024). Effect of weight distribution and active safety systems on electric vehicle performance. *Sensors*, 24(11), 3557.

Kalhor, A., Dykas, J., Rodak, K., & Grajcar, A. (2025). Materials and constructional design for electric vehicles: A review. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 19(1), 178–196.

Karimi, G., & Li, X. (2013). Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *International Journal of Energy Research*, 37(2), 13–24.

Khan, M., & Cameron, B. (2025). What determines EV architecture? An analysis of the most influential battery electric vehicle design. *Journal of Engineering Design*, 36(1), (yakında yayınlanacak).

Kulkarni, S. S., Hale, F., Taufique, M. F. N., Soulam, A., & Devanathan, R. (2023). Investigation of crashworthiness of carbon fiber-based electric vehicle battery enclosure using finite element analysis. *Applied Composite Materials*, 30, 1689–1715.

Lampón, J. F. (2022). Modular electric vehicle platforms: A case study of design and sustainability in European production networks. *Sustainable Development*, 30(4), 743–758.

Navale, A. B., Chippe, S. P., Chougule, D. A., & Raut, P. M. (2021). Crashworthiness aspects of electric vehicle design. *International Journal of Crashworthiness*, 26(4), 368–378.

Nicoletti, L., Ostermann, F., Heinrich, M., & Lin, X. (2021). Topology analysis of electric vehicles, with a focus on the traction battery. *World Electric Vehicle Journal*, 12(2), 86.

Sangüesa, J. A., Garrido, P., Martínez, F. J., & Márquez-Barja, J. M. (2021). Analyzing the impact of roadmap and vehicle features on electric vehicles' energy consumption. *IEEE Access*, 9, 61475–61488.

Wang, Z., Ching, T. W., Huang, S., Wang, H., & Xu, T. (2021). Challenges faced by electric vehicle motors and their solutions. *IEEE Access*, 9, 5228–5249.

Yadav, A. K., & Srivastava, R. (2024). From concept to road: A review of chassis design for electric vehicles. *Trends in Electrical Engineering*, 14(2), 20–27.

ISO. (2019). ISO 6469-1:2019 Electrically propelled road vehicles – Safety specifications – Part 1: On-board rechargeable

energy storage system (RESS). International Organization for Standardization.

SAE. (2020). SAE J2344: Guidelines for Electric Vehicle Safety. SAE International.

UNECE. (2013). UNECE Regulation No. 100 – Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train. United Nations Economic Commission for Europe.

CHAPTER 2

INVESTIGATION OF AUGMENTED REALITY– ENHANCED AUTOMOTIVE SECTOR PROCESSES

İbrahim YAVUZ ¹
Ercan ŞİMŞİR ²

Introduction

In our developing and consequently changing world, the struggle for adaptation in all fields necessitates renewal at a pace commensurate with the speed of technology. This situation has brought with it new software and equipment. One of the rising technologies of recent years, spreading across a wide range of fields from entertainment to medicine, engineering to industry, marketing to education, is Augmented reality (AR) technology.

AR technology ensures the experience of digital overlay such as computer sound, images, holograms or animations on the real world in real time with mobile phone, pad and VR glasses. This enables users to experience objects and events that do not actually exist in the physical environment. Augmented reality AR, which is a type of technology, can be identified as a system created to display computer-generated data or media that includes text, video, graphics, GPS and/or images on the physical world behaviour or perceptions of people (BİNGÖL, 2018; Craig, 2013; Delello & Delello, 2014).

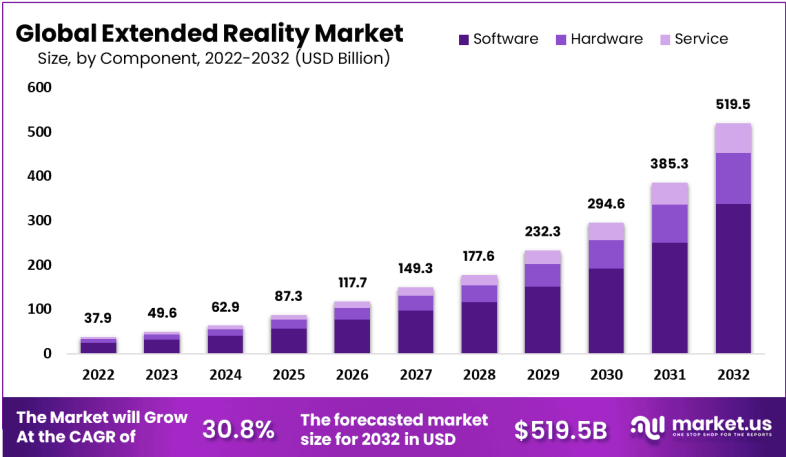
¹ Associate Professor Dr, Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Department of Automotive Engineering, Orcid: 0000-0002-4480-2342

² Associate Professor Dr, Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Department of Automotive Engineering, Orcid: 0000-0001-6655-2324

AR is a new technology that superimposes digital information on the physical world and makes it possible for people to experience both real life and virtual elements. Thanks to its ability to deliver real-time information layers, AR has the potential to significantly improve user experience in many areas, including education, manufacturing operations, maintenance applications, and design work(Åžahin & Togay, 2016; Eswaran et al., 2023). With these qualities, augmented reality also becomes an effective and useful tool within Life Cycle Engineering, encompassing all processes from product and system design to usage and recycling (Palmarini et al., 2018).

The AR market is projected to reach approximately US\$519.5 billion by 2032, up from US\$49.6 billion in 2023 (Figure 1). Furthermore, projections for the 2024–2033 period indicate a compound annual growth rate of 30.8% for the market.

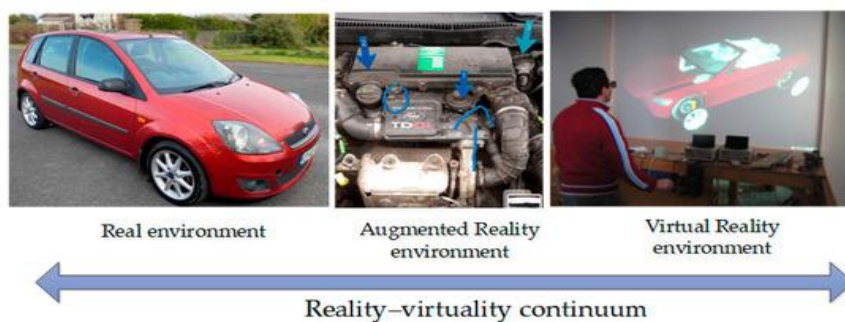
Figure 1 Shows the development of the AR market



Source: <https://market.us/report/metaverse-in-surgical-operations-market/>

The automotive industry is one of the leading sectors in using the latest technological innovations, like the aerospace and defense industries. For this reason, the vehicle industry has adopted new and superior technological advancements such as digital modeling, prototyping and modern production methods based on innovative robotic systems (Nagy et al., 2023; Tsaramirsis et al., 2022). In addition, thanks to these developments, including driverless (autonomous) vehicle reliability and ergonomic interfaces that improve user experience, the industry has shown progress day by day (Riegler et al., 2022).

Figure 2 Reality–virtuality continuum for the automotive industry



Source: (Boboc et al., 2020)

However, beyond all these general technological advancements, AR technology takes the subject to a different dimension by offering brand-new applications in the design, prototyping, production, and maintenance processes of automotive engineering. This technology significantly transforms traditional engineering practices and guides the development of the industry by enabling engineers and designers to visualize, analyze, and optimize complex automotive systems on-site (Boboc et al., 2020). Figure 2 shows an example study involving the reality-virtual reality continuum for the automotive industry.

This study aims to contribute to the gap in the literature by examining the use of rapidly developing augmented reality technology in the automotive sector. In this context, the purposes for which AR is applied in the sector, the basic characteristics of the developed systems, and the benefits and main challenges encountered by this technology are examined in detail. Thus, the study aims to provide a guiding framework for future research.

Automotive Applications of AR Technology

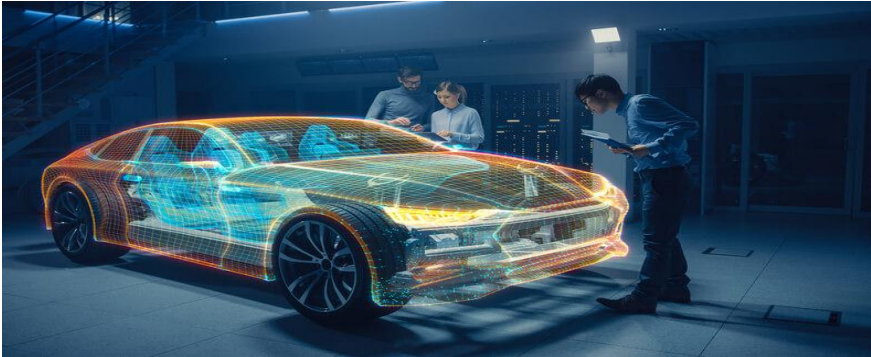
This section examines in detail the applications of augmented reality technology in the automotive field. The study addresses the compatibility of AR technology with automotive design, prototyping, and engineering software. The potential of AR to increase efficiency in production lines, detect errors in quality control, and work in conjunction with sensor systems is investigated. Furthermore, the contributions of AR to automotive engineering education and its compatibility with smart manufacturing infrastructures in line with Industry 4.0 and evolving digitalization are evaluated.

Applications of AR Technology in Automotive Design and Prototyping

In automotive engineering, AR technology can view parts such as fuel tank caps, gaskets and motorcycle body panels (Thilmany, 2016). This visualization can potentially contribute to more efficient design processes as the designers can conduct a detailed analysis and iteration of their designs without making any physical prototypes. For example, Pusda ve ark. suggests that the automobile industry is among the most recent users of VR and AR technologies. They point out that these state-of-the-art technologies also dramatically reduce development time and expense by enabling the design and engineering teams to see new vehicle and system

prototypes and make changes to their current designs (Pusda et al., 2019).

Figure 3 AR guides technicians in real-time as you'll learn in automotive training.



Source: <https://www.autotrainingcentre.com/blog/understanding-augmented-reality-in-automotive-technology/>

Highend visualization options, such as Quarter, allow the designer to closely observe their ideas. This also allows them to make all the necessary changes before physical samples are manufactured. This outlook could streamline design processes by collapsing complexity through exponentially more isomorphisms. Although there have been a variety of previous studies about automotive industry based on Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR), in recent times these technologies are more and more integrated into this sector, providing engineers and car designers the opportunity to see vehicle parts and systems in a virtual setting, make efficient upgrades on current designs, and quicker asses new prototypes (Niebling et al., 2008; Pusda et al., 2019). Designers and engineers use augmented reality to visualize complex components (Figure 3). Development time-associated expenses have been drastically cut. Apart from the benefit of reducing time to market for new products, AR technology can improve the production quality as a whole in an outstanding way, thereby enhancing the competitive

strength of the industry. The inclusion of Augmented Reality in engineering analysis and simulation pipelines brings a panoply of benefits, especially in the visualization of numerical simulation results. For example, Li et al. This paper has presented an AR-based simulation framework for interactive and immersive exploration of data derived from Finite Element Method (FEM) analyses. The system enables the virtual scaling and closer examination of the simulation results, thus allowing a more intuitive and comprehensible analysis of complex datasets (Li et al., 2017). Like a similar methodology, the aim of this approach is to make multi-dimensional, complicated simulation data easier to understand by allowing engineers to interact with the data, ultimately helping with problem solving.

AR Applications in Automotive Production and Assembly Processes

Automotive manufacturing operations are no exception to the use of AR technology. On the contrary, it is becoming a fundamental requirement for companies seeking to increase assembly process efficiency (Michalos et al., 2010). Therefore, a comprehensive analysis of the effectiveness of AR and VR applications in automotive engine assembly training has been conducted. The study demonstrates that AR technologies are effective in facilitating training procedures (Win et al., 2022). Production line and logistics procedures are affected by AR: according to Čujan et al., AR technology has significantly increased efficiency in part picking and shipment loading procedures, thus reducing processing time by 10% (Čujan et al., 2020). This literature confirms the reliability and usability of the system by showing that technologies like augmented reality offer measurable advantages in production lines. In automotive manufacturing applications, augmented reality increases the productivity of technicians and assembly workers. According to the research of Win et al., augmented reality technology also has

significant application areas in automotive engine assembly training (Win et al., 2022). In their research, Mura and Dini developed an AR (Automated Reality) application for headlight adjustment, and the steps are shown in Figure 4 (Dalle Mura & Dini, 2021).

Figure 4 Example of headlight adjustment



Source: Dalle Mura & Dini, 2021

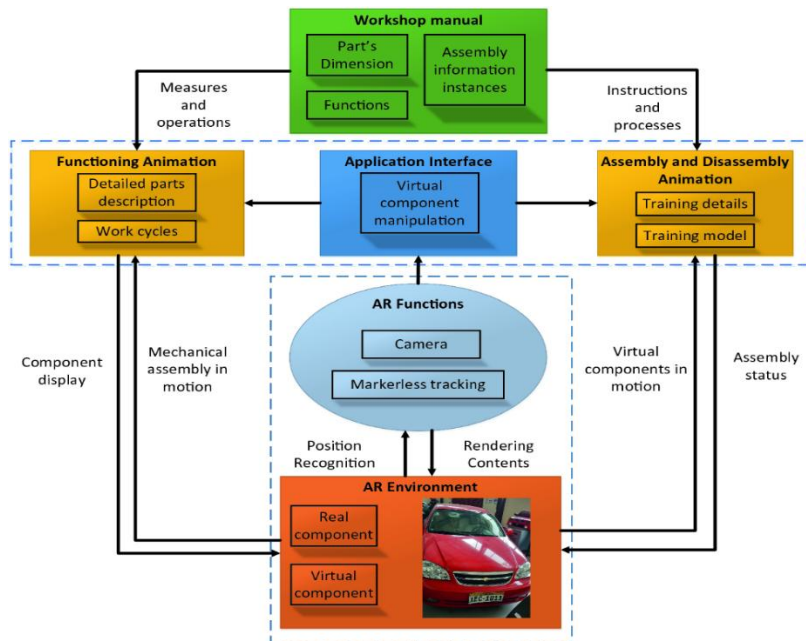
Maintenance and repair processes have begun to be one of the areas where AR technology is effectively used in the automotive industry. Cachada et al. (2019) demonstrated that AR interfaces can be used to support industrial maintenance procedures. They noted that the industry is becoming increasingly digital, emphasizing the development of faster diagnostic and predictive maintenance strategies (Cachada et al., 2019). In a study by Kastner et al. (2020), object action detectors were combined with AR to study the task completion time of untrained workers. Their study found a significant reduction in task completion times and error rates (Kastner et al., 2020). As a result of these studies, it is concluded that such systems allow maintenance personnel to solve complex maintenance and repair problems much more safely, quickly, and effectively, and increase productivity.

Applications of AR Technology in Automotive Education

In learning processes that students need to experience, the integration of AR technology greatly enhances learning. Anjos et al. conducted a study on the application of Virtual Reality and Augmented Reality in some engineering education courses (Figure

5). They found that using Virtual Reality (VR) or AR technologies had significant and positive effects on students' learning performance and satisfaction levels in the vast majority of cases (dos Anjos et al., 2022). Rymer and colleagues demonstrated that an augmented reality application enabled automotive technician training trainees to locate parts more quickly and accurately than when using a computer-based manual. They noted that this was part of a larger study exploring the costs and potential benefits of augmented reality and mobile Technologies(Rymer et al., 2018). Tuli and colleagues developed an AR-based learning environment to assist students in conducting electronic engineering laboratory experiments and demonstrated that the AR intervention had positive effects on students' academic achievement levels, learning attitudes toward the subject, and individual attitudes toward AR technology (Tuli et al., 2022).

Figure 5 AR and education system architecture



Source: Pusda et al., 2019

Bacca and colleagues developed a marker-based mobile AR learning environment called 'Paint-cAR' to support vehicle paint repair processes within the scope of automotive maintenance training. The authors demonstrated that this AR intervention, developed based on Universal Design for Learning (UDL) principles, had positive effects on the acquisition of vocational skills, particularly for students with learning disabilities or lack of motivation, and that this technology has significant potential in overcoming critical pedagogical barriers in vocational education (Bacca et al., 2015).

Figure 6 Virtual and Augmented Reality Applications on the BMW Production Line



Huda and his team demonstrated that AR technology in graphic design can be used as a complement to the Industry 4.0 revolution and can provide significant improvements in the success of the learning process (Huda et al., 2021). George and Othman, by developing a mobile learning application called AUTOGO, showed how the AR approach can be applied in automotive engineering education and how students' attitudes towards this technology can be positively changed (Figure 6) (George & Othman, 2022).

Fortuna et al. (2023) developed an Augmented Reality learning environment for a course on engineering mechanics. This AR app, consisting of 3D animations, video simulations, and interactive exercises, was proven in their research to offer the physical visualizations required for structural analysis tasks. Testing proved the system's capabilities and suggested that this technology may be a good alternative to its predecessor, traditional distance education. In addition, it was demonstrated that it allows students to have access to learning materials available anytime and anywhere (Fortuna et al., 2023).

Syahidi et al. (2020) developed an augmented reality application called AUTOC-AR for use in automotive engineering education. Designed with marker-based tracking and XP (Overprogramming) modeling, the application interactively presents complex car features and occupational safety guidelines. Tests with 25 students showed that the application functioned flawlessly, achieving a 96.6% user experience success rate, proving that AR technology is an effective material in technical education (Syahidi et al., 2020).

Automotive Industry Safety AR Applications

Concentrating drivers attention on hazards and enhancing targeting skills of identification of targets, In-vehicle driver warning system e.g. AR based navigation can lead to significant reductions in crash risk. Proposed the Effects of AR markers on hazard perception ability of elderly drivers, showing that a technology can be used to identify more effectively low-visibility hazards. They report that the AR alerts had no inhibitory effects on other measures of driving such as distance estimation or safe distance following. It showed non-reaction time related safety benefits, too (Schall et al., 2013a). Scott and Gray (2008) also showed that tactile warnings evoke a much faster response from drivers than visual warnings in a

situation similar to the rear-end crash. This finding supports the idea that the tactile system should be prioritized in designing automotive safety (Scott & Gray, 2008).

From the reviewed materials, it appears that driver safety is significantly enhanced with the use of AR, especially when it is related to recognizing objects that are difficult to see, such as pedestrians or warning signs. Hence, apart from drivers' information processing capacity (SOP), AR technology is considered a promising support system that enhances safety without impairing driving performance and the perception of risk for older drivers in complex driving environments (Schall et al., 2013b).

The Use of AR in Automotive Design and Software Tools

In the automotive industry, the production stages of new vehicles have undergone significant digitisation in recent years. In automotive design, exterior and interior designers work with freeform surfaces. Combining engineering software with AR enables engineers to suspend 3D models in mid-air and adjust them in real-time.

The goal of the global automobile industry is to create mass-produced cars that can be sold anywhere in the globe with just slight variations. It uses platform tactics to take advantage of economies of scale in this direction. While different versions can be differentiated with distinctive external designs, the adoption of standard chassis and basic components greatly lowers development and production costs. In this method, new automobile components can be virtually integrated onto pre-existing platforms thanks to the early usage of augmented reality technology. Design modifications may be made rapidly and affordably because to the internal 3D CAD modeling approach, which greatly minimizes the requirement for physical prototypes (Morosi et al., 2023). With this approach, the effectiveness of the platform strategy is increased, and the product

development process becomes more efficient in terms of time and cost.

Figure 7 . Design Review of the BMW Vision 100 show car using a physical 1:1 model (Left) and a VR-based model (Right)



Source: Clerk et al., 2019

A study was conducted in collaboration with the BMW Group to optimize augmented reality in automotive design reviews. In the research; Speech-based and touch-based techniques were tested for visual inspection and model comparison applications. Among these techniques, multimodal interaction, which combines physical control with freehand movements, was found to exhibit the highest performance and minimize cognitive load (de Clerk et al., 2019).

Applications of AR Technology in the Automotive Industry within the Context of Industry 4.0

Industry 4.0 is a term that emerged to represent the fourth industrial revolution based on the latest technological advancements. Autonomous robots are widely used in Industry 4.0 production processes to increase production performance and revenue (Kattepur et al., 2018; Zhang et al., 2019) .

In a study conducted by Firu et al., the contribution of AR technology to automotive production processes within the scope of Industry 4.0 strategies was analyzed. The research revealed that VR-supported design and planning processes minimize physical

modeling costs and time losses while increasing operational efficiency. It was found that the use of AR, particularly in the optimization of complex assembly lines, reduces error margins and enables high-precision production (Firu et al., 2021). Figure 8 shows technical personnel receiving welding training within the scope of Industry 4.0.

Figure 8. Virtual training in welding and Virtual training in production



AR/VR technologies offered within the scope of Industry 4.0 are a strategic innovation tool for 21st-century companies that transcends traditional boundaries. The ability of these technologies to provide a sustainable competitive advantage in national and international markets depends on careful decision-making processes at the management level regarding practical application. Organization's that properly integrate digital systems into their business processes transform through innovative practices, becoming stronger and wiser on a global scale (Reljić et al., 2021).

Challenges and Future Trends in AR Technology in the Automotive Industry

The automotive industry has a number of organizational and technological obstacles when implementing AR technology. The difficulties with VR technology are the subject of some research done for the automotive industry. Users claim that one eye cannot focus as well as the other, and one of the issues noted in the literature

is the absence of depth perception, which especially affects short distances. (Lawson et al., 2015).

Generally, the following issues are related to AR: While latency and registration issues have a detrimental effect on system performance, unnatural visual and tactile interactions result in a lack of realism. Inter-team communication challenges and user discomfort are also major problems. The user experience is further limited by issues with depth, touch, motion, and movement perception as well as a lack of intuitiveness. Lastly, other obstacles to the widespread usage of virtual reality applications include cybersecurity threats, cyber-illness, and the lack of control over user behavior (Winkler et al., 2022).

AR-based applications are making traditional vehicle maintenance tools accessible via mobile devices. Users can visually identify vehicle settings and directly access maintenance and "how-to" instructions. For example, in vehicles like the Audi A3, common representations can be identified with AR support, and users can perform maintenance tasks such as engine coolant changes with virtual, animated guidance. Furthermore, AR automotive guides offered by Metaio, based on Google Glass, or those that don't require constant or continuous use, demonstrate that these technological maintenance packages offer more practical and advanced solutions (Lamberti et al., 2014). Kemeny stated that his research shows how AR and VR technologies simplify maintenance processes in the automotive sector. He also noted that they are important tools that increase user efficiency and acceptance in autonomous vehicles. He added that in the future, developing AR technologies in an integrated, standardized, and user-centric way with HMI systems will contribute to a safe and efficient structure for the automotive industr (Kemeny, 2024).

Conclusions

AR is revolutionizing the automotive engineering industry in terms of maintenance, repair, training, designing, prototyping and manufacturing. Drawing from both the digital and physical worlds, AR technology enables technical personnel and engineering staffs to display live visualization data over (physical) objects, facilitating decision-making and minimizing error rates. When designing vehicles, real world earlier access to assembly fit, ergonomics and aesthetics is enabled by the viewing of virtual models. This reduces development cycle and cost.

By leveraging AR technology, sensor systems, computer vision algorithms and AI-based analysis techniques, automotive engineers are able to dissect intricate mechanical and electronic systems effectively. In the production line, AR-based interactive assembly instructions effectively improve working condition safety and prevent work error, by gradually illustrate the assembly process to operators visually and interactively. What's more, in the processes of service and maintenance, AR allows technicians to quickly spot issues and identify the right course of action to take, concluding that AR reduces service times.

With AR simulations, students and technical staffs of automotive engineering can simulate the interaction with complicated system in a workplace safe situation. Hence, theoretical information can be the more directly applied in practice whereas acquiring knowledge can be more interactive and sustainable process. With the world's shifting towards electric and autonomous vehicle technologies, AR-enabled training modules are becoming more relevant. The Industry 4.0 and digital transformation vision already anticipated the future mass market penetration of AR technology now its deeper application shift in the automotive industry soon hereafter. Nonetheless, design and application standards need to be established in order for this technology to reach

its full potential. In addition, easy to use and ergonomic interfaces have to be designed, hardware and software infrastructures have to be enhanced, and comprehensive training courses for engineers and technicians have to be provided. After overcoming these challenges, the AR technology is expected to be the main driving force to change the automotive engineering in terms of process efficiency, product quality, and innovativeness.

References

- Åzahin, D., & Togay, A. (2016). Augmented reality applications in product design process. *New Trends and Issues Proceedings on Humanities and Social Sciences*, 2(1), 115–125. <https://doi.org/10.18844/PROSOC.V2I1.288>
- Bacca, J., Baldiris, S., Fabregat, R., Kinshuk, & Graf, S. (2015). Mobile Augmented Reality in Vocational Education and Training. *Procedia Computer Science*, 75, 49–58. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2015.12.203>
- BİNGÖL, B. (2018). Yeni Bir Yaşam Biçimi: Artırılmış Gerçeklik (AG). *Etkileşim*, 1, 44–55. <https://doi.org/10.32739/ETKILESIM.2018.1.8>
- Boboc, R. G., Gîrbacia, F., & Butila, E. V. (2020). The Application of Augmented Reality in the Automotive Industry: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences 2020, Vol. 10, Page 4259*, 10(12), 4259. <https://doi.org/10.3390/APP10124259>
- Cachada, A., Romero, L., Costa, D., Badikyan, H., Barbosa, J., Leitao, P., Morais, O., Teixeira, C., Azevedo, J., & Moreira, P. M. (2019). Using AR Interfaces to Support Industrial Maintenance Procedures. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2019-October, 3795–3800. <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927815>

- Craig, A. B. . (2013). *Understanding augmented reality : concepts and applications*.
https://books.google.com/books/about/Understanding_Augmented_Reality.html?hl=tr&id=7_O5LaIC0SwC
- Čujan, Z., Fedorko, G., & Mikušová, N. (2020). Application of virtual and augmented reality in automotive. *Open Engineering*, 10(1), 113–119. <https://doi.org/10.1515/ENG-2020-0022/XML>
- Dalle Mura, M., & Dini, G. (2021). An augmented reality approach for supporting panel alignment in car body assembly. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 251–260. <https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2021.03.004>
- de Clerk, M., Dangelmaier, M., Schmierer, G., & Spath, D. (2019). User centered design of interaction techniques for VR-based automotive design reviews. *Frontiers Robotics AI*, 6(MAR), 376808. <https://doi.org/10.3389/FROBT.2019.00013/BIBTEX>
- Delello, J. A., & Delello, J. A. (2014). Insights from pre-service teachers using science-based augmented reality. *Journal of Computers in Education* 2014 1:4, 1(4), 295–311. <https://doi.org/10.1007/S40692-014-0021-Y>
- dos Anjos, F. E. V., Rocha, L. A. O., da Silva, D. O., Pacheco, R., & Pinheiro, D. M. B. (2022). Impacts of the Application of Virtual and Augmented Reality on Teaching-Learning Processes in Engineering Courses: A Systematic Literature Review About Learning and Satisfaction on Students. *International Journal of Virtual and Personal Learning Environments*, 12(1), 1–19. <https://doi.org/10.4018/IJVPLE.291541>
- Eswaran, M., Gulivindala, A. K., Inkulu, A. K., & Raju Bahubalendruni, M. V. A. (2023). Augmented reality-based guidance in product assembly and maintenance/repair

- perspective: A state of the art review on challenges and opportunities. *Expert Systems with Applications*, 213, 118983. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2022.118983>
- Firu, A. C., Tapîrdea, A. I., Feier, A. I., & Draghici, G. (2021). Virtual reality in the automotive field in industry 4.0. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4177–4182. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.12.037>
- Fortuna, A., Waskito, Purwantono, Kurniawan, A., Andriani, W., & Alimin, M. (2023). Designing Learning Media Using Augmented Reality for Engineering Mechanics Course. *Journal of Engineering Researcher and Lecturer*, 2(1), 18–27. <https://doi.org/10.58712/JEREL.V2I1.20>
- George, P. W., & Othman, M. F. (2022). Implementation of Augmented Reality in Automotive Mobile Learning Application. *Journal of Soft Computing and Data Mining*, 3(2), 10–18. <https://doi.org/10.30880/jscdm.2022.03.02.002>
- Huda, A., Azhar, N., Almasri, A., Wulansari, R. E., Mubai, A., Sakti, R. H., Firdaus, F., & Hartanto, S. (2021). Augmented Reality Technology as a Complement on Graphic Design to Face Revolution Industry 4.0 Learning and Competence: The Development and Validity. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, 15(05), 116–126. <https://doi.org/10.3991/IJIM.V15I05.20905>
- Kastner, L., Eversberg, L., Mursa, M., & Lambrecht, J. (2020). Integrative Object and Pose to Task Detection for an Augmented-Reality-based Human Assistance System using Neural Networks. *ICCE 2020 - 2020 IEEE 8th International Conference on Communications and Electronics*, 332–337. <https://doi.org/10.1109/ICCE48956.2021.9352121>

- Kattepur, A., Dey, S., & Balamuralidhar, P. (2018). Knowledge based hierarchical decomposition of industry 4.0 robotic automation tasks. *Proceedings: IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 3665–3672. <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8592800>
- Kemeny, A. (2024). Virtual and Augmented Reality. *Autonomous Vehicles and Virtual Reality*, 33–49. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45263-5_2
- Lamberti, F., Manuri, F., Sanna, A., Paravati, G., Pezzolla, P., & Montuschi, P. (2014). Challenges, opportunities, and future trends of emerging techniques for augmented reality-based maintenance. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2(4), 411–421. <https://doi.org/10.1109/TETC.2014.2368833>
- Lawson, G., Salanitri, D., & Waterfield, B. (2015). VR processes in the automotive industry. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9171, 208–217. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21006-3_21/TABLES/3
- Li, W., Nee, A. Y. C., & Ong, S. K. (2017). A State-of-the-Art Review of Augmented Reality in Engineering Analysis and Simulation. *Multimodal Technologies and Interaction 2017, Vol. 1, Page 17, 1(3)*, 17. <https://doi.org/10.3390/MTI1030017>
- Michalos, G., Makris, S., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Chrysosouris, G. (2010). Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(2), 81–91. <https://doi.org/10.1016/J.CIRPJ.2009.12.001>

- Morosi, F., Becattini, N., Caruso, G., & Cascini, G. (2023). Measuring the Impact of Augmented Prototyping Systems in Co-Design Activities. *Multimodal Technologies and Interaction* 2023, Vol. 7, Page 108, 7(11), 108. <https://doi.org/10.3390/MTI7110108>
- Nagy, M., Lăzăroiu, G., & Valaskova, K. (2023). Machine Intelligence and Autonomous Robotic Technologies in the Corporate Context of SMEs: Deep Learning and Virtual Simulation Algorithms, Cyber-Physical Production Networks, and Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 1681, 13(3), 1681. <https://doi.org/10.3390/APP13031681>
- Niebling, F., Griesser, R., & Woessner, U. (2008). Using Augmented Reality and Interactive Simulations to Realize Hybrid Prototypes. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 5358 LNCS(PART 1), 1008–1017. https://doi.org/10.1007/978-3-540-89639-5_96
- Palmarini, R., Erkoyuncu, J. A., Roy, R., & Torabmostaedi, H. (2018). A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, 215–228. <https://doi.org/10.1016/J.RCIM.2017.06.002>
- Pusda, F. R., Valencia, F. F., Andaluz, V. H., & Zambrano, V. D. (2019). Training Assistant for Automotive Engineering Through Augmented Reality. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11614 LNCS, 146–160. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25999-0_13/FIGURES/18

- Reljić, V., Milenković, I., Dudić, S., Šulc, J., & Bajči, B. (2021). Augmented Reality Applications in Industry 4.0 Environment. *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 5592, 11(12), 5592. <https://doi.org/10.3390/APP11125592>
- Riegler, A., Riener, A., & Holzmann, C. (2022). A Systematic Review of Augmented Reality Applications for Automated Driving: 2009–2020. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 28, 87–126. https://doi.org/10.1162/PRES_A_00343/108155
- Rymer, M. T., Damiano, E. S., McCombs, B., & De La Torre, R. (2018). Using Augmented Reality and Mobile Technologies to Train Automotive Technicians. *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering, TALE 2018*, 1074–1078. <https://doi.org/10.1109/TALE.2018.8615272>
- Schall, M. C., Rusch, M. L., Lee, J. D., Dawson, J. D., Thomas, G., Aksan, N., & Rizzo, M. (2013a). Augmented reality cues and elderly driver hazard perception. *Human Factors*, 55(3), 643–658. <https://doi.org/10.1177/0018720812462029>;WEBSITE:WEBSITE:SAGE;ISSUE:ISSUE:DOI
- Schall, M. C., Rusch, M. L., Lee, J. D., Dawson, J. D., Thomas, G., Aksan, N., & Rizzo, M. (2013b). Augmented Reality Cues and Elderly Driver Hazard Perception. *Human Factors*, 55(3), 643. <https://doi.org/10.1177/0018720812462029>
- Scott, J. J., & Gray, R. (2008). A comparison of tactile, visual, and auditory warnings for rear-end collision prevention in simulated driving. *Human Factors*, 50(2), 264–275. <https://doi.org/10.1518/001872008X250674>;SUBPAGE:STRING:ABSTRACT;WEBSITE:WEBSITE:SAGE;REQUESTED

- Syahidi, A. A., Subandi, S., & Mohamed, A. (2020). AUTOC-AR: A Car Design and Specification as a Work Safety Guide Based on Augmented Reality Technology. *Jurnal Pendidikan Teknologi Dan Kejuruan*, 26(1), 18–25. <https://doi.org/10.21831/JPTK.V26I1.27907>
- Thilmany, J. (2016). The More You See. *Mechanical Engineering*, 138(10), 36–41. <https://doi.org/10.1115/1.2016-OCT-2>
- Tsaramirsis, G., Kantaros, A., Al-Darraj, I., Piromalis, D., Apostolopoulos, C., Pavlopoulou, A., Alrammal, M., Ismail, Z., Buhari, S. M., Stojmenovic, M., Tamimi, H., Randhawa, P., Patel, A., & Khan, F. Q. (2022). A Modern Approach towards an Industry 4.0 Model: From Driving Technologies to Management. *Journal of Sensors*, 2022(1), 5023011. <https://doi.org/10.1155/2022/5023011>
- Tuli, N., Singh, G., Mantri, A., & Sharma, S. (2022). Augmented reality learning environment to aid engineering students in performing practical laboratory experiments in electronics engineering. *Smart Learning Environments* 2022 9:1, 9(1), 26-. <https://doi.org/10.1186/S40561-022-00207-9>
- Win, L. L., Aziz, F. A., Hairuddin, A. A., Abdullah, L. N., Yap, H. J., Saito, H., & Seyajah, N. (2022). EFFECTIVENESS ON TRAINING METHOD USING VIRTUAL REALITY AND AUGMENTED REALITY APPLICATIONS IN AUTOMOBILE ENGINE ASSEMBLY. *ASEAN Engineering Journal*, 12(4), 83–88. <https://doi.org/10.11113/AEJ.V12.18009>
- Winkler, I., Murari, T. B., Ferreira, C. V., & Freitas, F. (2022). VR-based product development process: opportunities and

challenges in the automotive industry. *Simpósio de Realidade Virtual e Aumentada (SVR)*, 41–44.
https://doi.org/10.5753/SVR_ESTENDIDO.2022.226711

Zhang, Y., Li, L., Nicho, J., Ripperger, M., Fumagalli, A., & Veeraraghavan, M. (2019). Gilbreth 2.0: An Industrial Cloud Robotics Pick-and-Sort Application. *Proceedings - 3rd IEEE International Conference on Robotic Computing, IRC 2019*, 38–45. <https://doi.org/10.1109/IRC.2019.00015>

CHAPTER 3

SOME LOW-SPEED IMPACT TESTING DEVICES PREFERRED FOR EVALUATING THE MECHANICAL PERFORMANCE OF COMPOSITE MATERIALS

Ercan ŞİMŞİR¹
İbrahim YAVUZ²

Introduction

Composite materials have a wide range of applications in engineering today due to their superior properties compared to traditional materials, such as high specific strength, high elastic modulus, low density, and corrosion resistance. Fiber-reinforced polymer (ETP/EGP) composites, with their multiphase structures that provide both lightness and high mechanical performance, have become indispensable in many fields such as automotive, aerospace, marine, defense, sports equipment, chemical process equipment, and civil infrastructure. These types of composites, by combining fiber reinforcements, polymer matrices, and fillers in specific ratios, allow for the production of engineering materials with properties superior to their individual components (Shettigar et al., 2025; Zaman et al., 2013).

Accurately determining the performance of composite materials during their design and use processes is possible by

¹ Associate Professor Dr, Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Department of Automotive Engineering, Orcid: 0000-0001-6655-2324

² Associate Professor Dr, Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Department of Automotive Engineering, Orcid: 0000-0002-4480-2342

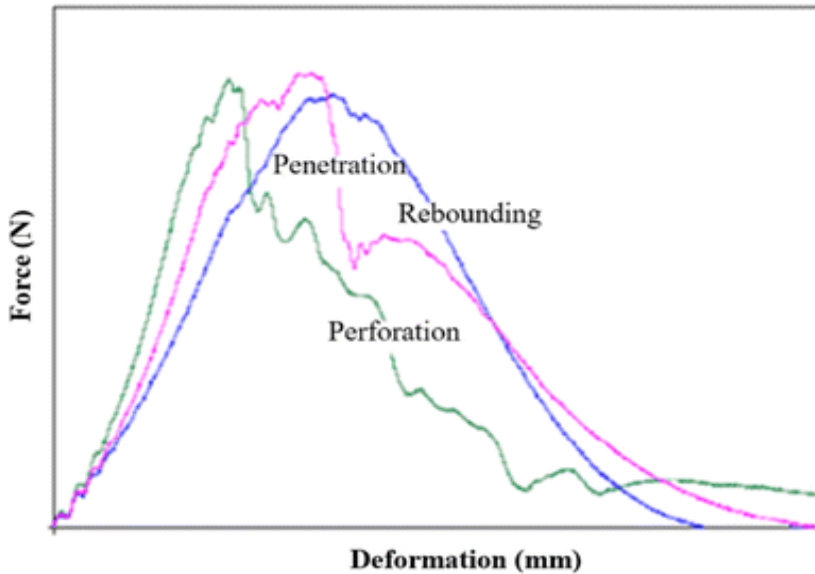
simulating the loading conditions they may be subjected to in a laboratory environment. Impact loads are among the external effects that composite materials frequently encounter during manufacturing, assembly, or service. Everyday impacts such as nail driving, hammer blows, vehicle accidents, a tool falling on a surface during maintenance, stone impacts, or a vehicle entering a pothole at high speed correspond to low-velocity impact scenarios in engineering structures. Determining the damage modes that such impacts can cause on the material, such as matrix cracking, delamination, and fiber fracture, is critically important for the reliable use of composites (Van Nuffel et al., 2014; Vasiliev & Razin, 2006)

Although impacts are generally classified as low, medium, or high speed, there is no definitive boundary in the literature regarding this distinction. In the literature, in low-speed impact tests, the impact velocity is typically between 1 m/s and 10 m/s (Shivakumar et al., 2012), medium-speed impact tests can range from 10 m/s to 50 m/s, high-speed impact tests from 50 m/s to 1000 m/s, while hyper-speed impact tests are classified as those conducted between 2000 m/s and 5000 m/s (Banhart et al., 2024; Ismail et al., 2019; Vaidya, 2011). Some studies define impact as a range of velocity, while others classify it based on the damage modes produced by the material. In this second approach, only cases where intrinsic damage such as layer separation occurs are considered low-velocity impacts, while penetration of the composite structure is considered a high-velocity impact (Yao et al., 2025). In both cases, the material behavior under impact loads is characterized by contact force-time curves, absorption energy, deformation mode, and damage propagation (Whittingham et al., 2004).

Impact tests typically result in damage in the form of rebound, penetration, and perforation. As shown in Figure 1, the force-deformation curves for low-velocity impacts are displayed. As the applied impact velocity increases, the resulting force also

increases; however, as can be seen in the penetration and perforation curves, the maximum force value remains almost constant. When the specimen is perforated, the force should be zero. However, due to friction between the impact element and the specimen, the tip of the curve moves parallel to the horizontal axis (Yavuz et al., 2024).

Figure 1 Force–displacement curves after impact test (Yavuz et al., 2024).



One of the most common methods for conducting low-velocity impact tests is weight drop impact test systems. These systems are widely preferred in industry because they allow for controlled adjustment of the impact velocity and their ability to represent real operating conditions (Aymerich et al., 2025a). Today, commercial impact testing equipment from brands like Instron and Dynatup can perform tests at different impact energies and velocities, and under various temperature conditions.

Numerous studies exist in the literature regarding the low-velocity impact behavior of composite pipes and cylindrical

structures. The post-impact damage, burst strength, and dynamic response of glass fiber reinforced composite pipes produced by filament winding methods have been investigated in detail by many researchers at different configurations and energy levels. Doyum and Altay studied the damage formation on CTP pipes produced with different winding angle configurations at impact energies between 3.5 and 8.5 J and revealed that layer separations and matrix cracks are the dominant damage modes (Doyum & Altay, 1997). Gning et al. demonstrated that impact damage has significant effects on the burst pressure of glass/epoxy tubes, and that 12 J of impact energy reduces the burst pressure by up to 40% (Gning et al., 2005). Tarfaoui et al. emphasized that production parameters play a decisive role in the dynamic response of the composite cylindrical structure (Tarfaoui et al., 2007). In the study conducted by Uyaner et al., it was determined that increasing impact velocity directly affects contact force, contact time, and absorbed energy, and that the burst strength after impact is significantly reduced (Uyaner & Güvensoy, 2011). Further studies by Curtis et al. and Gning et al. have also focused on comparing the results of low-velocity impact and semi-static penetration, and characterizing the damage using ultrasonic methods (Curtis et al., 2000; Gning et al., 2005).

This book chapter presents a comprehensive overview of current research focusing on the fundamental principles of low-velocity impact behavior in composite materials, the operating mechanisms of drop-type impact devices, types of damage, and experimental approaches found in the literature.

Impact Testing Devices

A drop impact tester (drop test machine) is a kind of testing equipment that can test the impact tolerance or damage degree of material, product or component that meets with the sudden impact or drop. Such machines find a wide range of application in

automotive, aerospace, packaging, and consumer goods industries. Drop impact testing simulates the environment where the products may be subjected to shock or vibration in shipping, handling and/or use. The data from these tests can be applied to refine designs, material choices and product functionality (Şimşir et al., 2024). Essentially, a free-fall impact tester raises a test sample to a predetermined height before dropping it onto an impact plate. The machine monitors and calculates parameters such as impact force, specimen deformation, and damage during the test.

Drop weight testing machines are meticulously engineered to have finely controlled test conditions. This test is carried out by just dropping a mass from a certain height. The sample can be loaded in compression or prestressed depending on the way it is anchored to its structure. The specimen carries kinetic energy equal to the potential energy possessed by the same impact device before the weight at its end is released. Testing machines may have an acceleration unit that increases the impact energy through an elastic mechanism. Beyond this subsystem, some can be equipped with hardware such as an environmental chamber that alters the environmental conditions. Therefore, it changes its properties and characteristics, or a recoil mechanism, mechanisms that prevent the impact device from receiving further impacts after the initial impact (preventing subsequent impacts). To measure the impact load in such tests, piezoelectric sensors, such as an accelerometer or load cell, are typically used. These sensors generate an electrical charge (piezoelectricity) that is directly proportional to the mechanical load applied to a piezoelectric material such as crystal quartz or lead zirconium titanate (PZT). Since there are no moving parts, the structure is very solid and compact and high dependability in measurement can be expected (Tressler et al., 1998).

Drop impact testing equipment is essential to verify the quality of life for the products. The outputs of these instruments are

used by engineers and designers to make products that are safer and more reliable. In addition, drop impact tests are applied in a wide range of industries to comply with legal regulations and safety norms. Impact testing apparatus is an instrument used for testing the impact resistance/durability of material, product or component against a sudden impact or fall. The impact tester consists of several components such as the drop tower, an impact object with a certain shape, weight and size, a holding device that holds the sample, a height device to changes the impact energy, a release device to release the impact object. Instrumentation such as load cells, accelerometers, or High-Speed Cameras are employed during the test and the impact event is measured and analyzed. All these measurements are logged and are processed via the DAQ enabling the in-depth analysis of the impact behavior. Many low-speed impact testing machine models are available on the market. The main differences between the machines are features such as maximum drop weight and maximum drop height; these are among the factors that determine the energy levels. Companies that manufacture this type of impact testing equipment usually offer a series of machines with various feature ranges to meet different customer needs. Some commercially available impact testing machines, along with their features and functions, are discussed in detail.

Instron CEAST 9000 Series

The Dynatup Instron drop weight impact test system is from the new gen Instron 9400 Series testing system. The following information is provided for drop weight impact testers: Drop weight impact tester is an instrument to measures the energy that is absorbed by a material during fracture or breakage when it is subjected to an impact load having a certain weight that falls on the sample from certain height. The Instron 9400 Series drop weight Impact tester shown in figure 2 meets the impact testing specifications from 0.3J to 1800J.

Figure 2 Instron 9400 Series drop weight impact testing machine

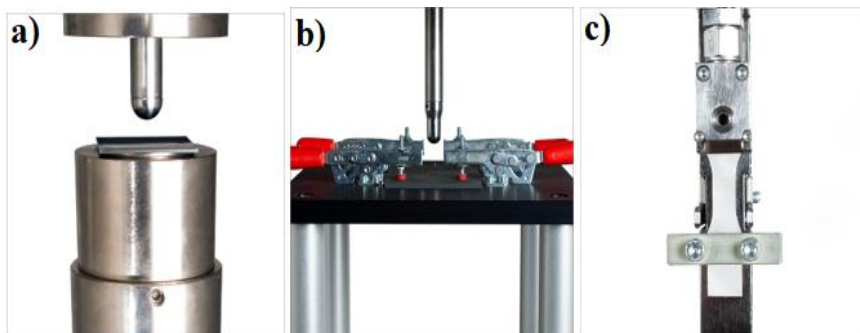


Source: <https://www.instron.com/en/products/testing-systems/impact-systems/>

In a weight drop impact testing machine, the striking tip is designed to strike the sample perpendicularly and centered. The striking tip can be designed with different diameters. This device has a 20 mm hemispherical striking piece, and additional weights can be added to the striking tip holder. It can also use round or square samples clamped to a pneumatically operated clamping ring with a diameter of 40 mm.

The denting test is a multiaxial impact test to assess puncture energy. According to the type of test and material, the specimen damage will be penetration, initial cracks, fractures and failed cracks. In the case of plates, films, or welded pipes, electronically monitoring the force/deformation curve with an instrumented tube greatly enhances data gathering. To minimize the negative effects of friction occurring between the pipe fitting and the specimen, ISO 6603-2 recommends the use of a lubricant at the end of the fitting. The 9450 drop impact testing machine is equipped with an automatic lubrication device that guarantees automatic and repeatable lubricant application. The puncture test method and other impact test methods are shown in Figure 3.

Figure 3 Puncture test methods a) puncture test b) post-impact compression test c) tensile impact test techniques



Source: <https://www.instron.com/en/products/testing-systems/impact-systems/drop-weight-impact-testing-machine/>

Puncture testing may be conducted in a normal laboratory atmosphere or at low or high temperatures, with the support fixture and specimens enclosed in a thermostatic chamber. By appropriate combining the conditioning, temperature and testing in a controlled way at any required impact velocity, ductile-to-brittle damage mode transitions can be determined for the majority of plastics. The Instron 9440 and 9450 drop impact testers can be fitted with optional thermostatic chambers to perform puncture impact testing over and under 0°.

Imatek IM10 and DWTT series

The M100 series models are highly versatile testing machines for performing a wide variety of medium-energy impact tests on both standard form samples and finished products. They feature interchangeable mass carriers for high-speed testing, flexible fixture options, and optional acceleration capabilities. Their advantages are appreciated by customers in the aerospace, automotive, and academic sectors, among others, and they are used for testing metals, polymers, and composite materials. The Imatek IM100 Series drop weight impact testing machine is shown in Figure 4.

Figure 4 Imatek IM100 Series drop weight impact testing machine.



Source: <https://imatek-systems.co.uk/products/im100-range/>

Thanks to laboratory-level instrumentation and an extremely robust structure, the system produces accurate and repeatable test results. The large sample area with a T-channel base allows for testing assemblies and finished products, providing high flexibility. The guided mass system minimizes friction-related errors while maintaining the accuracy of the impact geometry throughout the test. The accuracy and repeatability of the drop parameters enable high consistency between tests. Easily replaceable contact parts simplify maintenance processes and reduce total cost of ownership. The high level of safety protects operators from potential risks, while user-

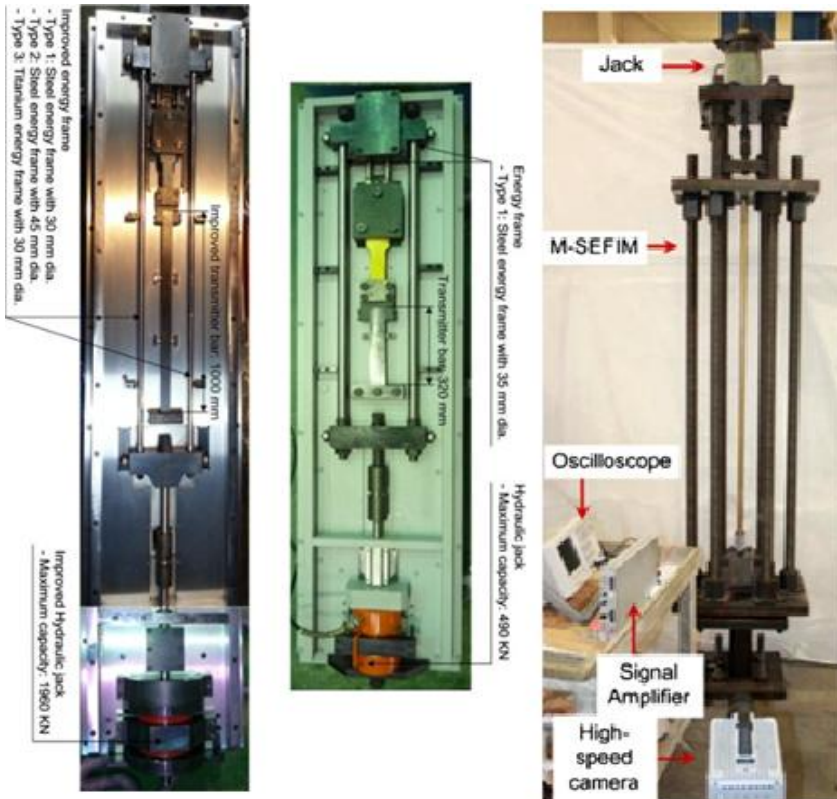
friendly and high-quality control and analysis software increase consistency and productivity. The system offers impact masses between 2 kg and 100 kg, drop heights between 50 mm and 3000 mm, and impact velocities between 1 m/s and 7.7 m/s, reaching 20–30 m/s with an acceleration option. With optional temperature conditioning, testing can be performed between -70 °C and +200 °C.

The device supports ASTM D3763, ASTM D5628, and EN ISO 6603 standards for plate anvils; ASTM D1709 and ISO 7765 for film anvils; and ASTM D7136, ASTM 1-0010, and JIS K 7089 for composite coupon anvils. It also includes a high-speed tensile fixture capable of applying strain rates above 1000/s on flat and dumbbell specimens; a cylinder crush anvil for studying the flow stress behavior of metallic materials; Charpy and Izod fixtures conforming to ASTM E23, EN 10045, ISO 148, ISO 179, ISO 180, ISO 14556, and ISO 13802 standards; and flat anvil options for measuring the cushioning performance of energy absorbers. Optionally; The high-speed package provides an additional 1000 J of impact energy and can reach impact velocities of up to 20 m/s depending on mass; sample scrapers enable separation of the sample and impactor in case of bonding; a system for preventing a second impact in rebound tests; a temperature conditioning chamber offering controlled testing capabilities in the range of -70 °C to +200 °C; a dynamic displacement system that continuously measures sample deformation at high speed during impact; and high-speed video analysis encompassing image acquisition, monitoring, and video metrology with integrated camera control.

Test Equipment Designed and Manufactured

Due to the very high selling prices of commercially available impact testing equipment, academics in some countries have attempted to manufacture such devices. Figure 5 shows previously designed and manufactured free-fall testing equipment.

Figure 5 Previously designed devices.



Source: Anonymous 2019.

The designed devices are manufactured at heights between 1–3 m. The impactor weight can vary between 5–35 kg, and depending on weight and height, the maximum impact energies can range from 500 J to 1000 J. The impactors are generally designed as spherical with a diameter of 16 mm or 20 mm. The displacement and force signals measured during the impact test are synchronized and transferred to the DAQ system for data acquisition and processing (Aymerich *et al.*, 2025b; Navarrete *et al.*, 2004). In current systems, piezoelectric load cells, usually from the Kistler brand, are used depending on the maximum energy requirement (Anas *et al.*, 2024;

Rajput et al., 2018). The data are acquired and processed by utilizing the sensor input voltage signal. These information are saved and additional processing can be done on the data with an appropriate subroutine (Matlab, Excel...) in order to get the desired graphs.

Conclusions

This section comprehensively examines drop-weight impact testing machines, which are critical for understanding the low-velocity impact behavior of composite materials. Widely used commercial impact testing machines such as Instron CEAST, Dynatup, and Imatek offer high-precision measurements, wide energy ranges, interchangeable fixture options, and the ability to be equipped with circumferential chambers, enabling successful simulation of real service conditions for composite materials. Through these machines, force-time, energy-displacement, and velocity-strain relationships are obtained in detail, allowing researchers to more accurately assess the damage mechanism of the material under impact. On the other hand, due to the high cost of commercial machines, many research groups design and manufacture their own drop-weight impact testing machines. Such systems provide significant technical expertise from an engineering design and experimental mechanics perspective.

In conclusion, low velocity impact testing machines are a fundamental requirement for investigation of mechanical behavior of composites materials. Such devices enable a quantitative definition of damage tolerance, energy absorption capacity, strength loss and integrity loss of the material, allowing to up develop new composite material designs and/or enhance the reliability of existing structures.. In this context, low-speed impact testing is of strategic importance not only for academic research but also for industrial product development processes and quality control applications.

References

- Anas, S. M., Shariq, M., Alam, M., Masharipova, Z., & Azizov, B. (2024). Comprehensive Methodology for Low-Velocity Drop Weight Impact Testing of Structural Slabs: Instruments, Procedures, and Analysis. *E3S Web of Conferences*, 563, 02032. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202456302032>
- Aymerich, F., Marcialis, P., Meili, S., & Priolo, P. (2025a). An Instrumented Drop-weight Machine For Low- Velocity Impact Testing. *WIT Transactions on The Built Environment*, 25, 405–414. <https://doi.org/10.2495/SUSI960221>
- Aymerich, F., Marcialis, P., Meili, S., & Priolo, P. (2025b). An Instrumented Drop-weight Machine For Low- Velocity Impact Testing. *WIT Transactions on The Built Environment*, 25, 405–414. <https://doi.org/10.2495/SUSI960221>
- Banhart, D., Monir, S., Durieux, O., Day, R. J., Jones, M., Luhyna, N., & Vagapov, Y. (2024). A review of experimental and numerical methodologies for impact testing of composite materials. *Sensing Technology*, 2(1), 2304886. <https://doi.org/10.1080/28361466.2024.2304886>
- Curtis, J., Hinton, M. J., Li, S., Reid, S. R., & Soden, P. D. (2000). Damage, deformation and residual burst strength of filament-wound composite tubes subjected to impact or quasi-static indentation. *Composites Part B: Engineering*, 31(5), 419–433. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(00\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(00)00014-7)
- Doyum, A. B., & Altay, B. (1997). Low-velocity impact damage in glass fibre/epoxy cylindrical tubes. *Materials & Design*, 18(3), 131–135. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(97\)00030-7](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(97)00030-7)
- Gning, P. B., Tarfaoui, M., Collombet, F., & Davies, P. (2005). Prediction of damage in composite cylinders after impact.

- Journal of Composite Materials*, 39(10), 917–928.
<https://doi.org/10.1177/0021998305048733>
- Ismail, M. F., Sultan, M. T. H., Hamdan, A., Shah, A. U. M., & Jawaid, M. (2019). Low velocity impact behaviour and post-impact characteristics of kenaf/glass hybrid composites with various weight ratios. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(3), 2662–2673.
<https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2019.04.005>
- Navarrete, M., Godínez, F. A., & Serrania, F. (2004). Design and fabrication of a low speed impact tester. *Journal of Applied Research and Technology*, 2(03), 249.
<https://doi.org/10.22201/ICAT.16656423.2004.2.03.587>
- Rajput, M. S., Burman, M., Segalini, A., & Hallström, S. (2018). Design and evaluation of a novel instrumented drop-weight rig for controlled impact testing of polymer composites. *Polymer Testing*, 68, 446–455.
<https://doi.org/10.1016/J.POLYMERTESTING.2018.04.022>
- Shettigar, S., Gowrishankar, M. C., & Shettar, M. (2025). Review on Aging Behavior and Durability Enhancement of Bamboo Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Molecules* 2025, Vol. 30, Page 3062, 30(15), 3062.
<https://doi.org/10.3390/MOLECULES30153062>
- Shivakumar, K. N., Elber, W., & Illg, W. (2012). Prediction of low-velocity impact damage in thin circular laminates. *https://doi.org/10.2514/3.8933*, 23(3), 442–449.
<https://doi.org/10.2514/3.8933>
- Şimşir, E., Akçin Ergün, Y., & Yavuz, İ. (2024). Investigation of Damping Properties of Natural Fiber-Reinforced Composites at Various Impact Energy Levels. *Polymers* 2024, Vol. 16, Page 3553, 16(24), 3553. <https://doi.org/10.3390/POLYM16243553>

- Tarfaoui, M., Gning, P. B., Davies, P., & Collombet, F. (2007). Scale and Size Effects on Dynamic Response and Damage of Glass/Epoxy Tubular Structures. *Journal of Composite Materials*, 41(5), 547–558.
<https://doi.org/10.1177/0021998306065287>
- Tressler, J. F., Alkoy, S., & Newnham, R. E. (1998). Piezoelectric sensors and sensor materials. *Journal of Electroceramics*, 2(4), 257–272.
<https://doi.org/10.1023/A:1009926623551/METRICS>
- Uyaner, M., & Güvensoy, S. (2011). FİLAMAN SARIM KOMPOZİT BORULARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞININ SİMÜLASYONU. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 26(2), 55–66.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/sujest/issue/23238/248103>
- Vaidya, U. K. (2011). Impact Response of Laminated and Sandwich Composites. *CISM International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures*, 526, 97–191.
https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0523-8_4
- Van Nuffel, D., Vepa, K. S., De Baere, I., Lava, P., Kersemans, M., Degrieck, J., De Rouck, J., & Van Paepegem, W. (2014). A comparison between the experimental and theoretical impact pressures acting on a horizontal quasi-rigid cylinder during vertical water entry. *Ocean Engineering*, 77, 42–54.
<https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2013.11.019>
- Vasiliev, V. V., & Razin, A. F. (2006). Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications. *Composite Structures*, 76(1–2), 182–189.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2006.06.025>
- Whittingham, B., Marshall, I. H., Mitrevski, T., & Jones, R. (2004). The response of composite structures with pre-stress subject to

low velocity impact damage. *Composite Structures*, 66(1–4), 685–698.

<https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2004.06.015>

Yao, S., Zhou, M., & Xing, J. (2025). Study on Local High-Velocity-Impact Characteristics of Carbon Fiber Composite Laminates Based on Experimental Image Sequences. *Materials* 2025, Vol. 18, Page 1833, 18(8), 1833.
<https://doi.org/10.3390/MA18081833>

Yavuz, İ., Şimşir, E., & Şenol, B. (2024). Investigation of mechanical behavior of glass fiber reinforced extruded polystyrene core material composites. *RSC Advances*, 14(19), 13311–13320.
<https://doi.org/10.1039/D4RA01740D>

Zaman, A., Gutub, S. A., & Wafa, M. A. (2013). A review on FRP composites applications and durability concerns in the construction sector. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(24), 1966–1988.
<https://doi.org/10.1177/0731684413492868>

CHAPTER 4

TÜRKİYE'DE İKİNCİ EL ARAÇ SATIŞINDA SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

MEHMET SİNAN¹
SELMAN İLTERİŞ YILMAZ²
SEZER SEÇKİN ERDEM³
BUKET KARATOP⁴

Giriş

Türkiye’de ikinci el araç satışının sürdürülebilir bir yapıya sahip olması çevresel, ekonomik ve toplumsal boyutlarıyla ele alınması gereken bir konudur. İkinci el araç pazarı, yüksek araç maliyetleri nedeniyle geniş kesimlerce tercih edilse de; kayıt dışılık, yüksek emisyon, düşük güvenlik ve şeffaflık eksikliği gibi çok boyutlu sorunlar içermektedir. Sürdürülebilir bir sistem için; çevresel etkilerin azaltılması amacıyla düşük emisyonlu araçların

¹ Öğr. . Gör.; İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Teknik Bilimler MYO Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü. ORCID No:0000-0001-5346-6814

² Öğr. Gör. Dr.; İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Teknik Bilimler MYO Elektronik ve Otomasyon Bölümü . ORCID No /0000-0002-1832-0809

³ Dr. Öğr.Ü.; İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Teknik Bilimler MYO Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü. ORCID No:0000-0002-2193-0712

⁴ Doç. Dr.; Bezmialem Vakıf Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi, Sağlık Yönetimi Bölümü. ORCID No:0000-0001-6053-1725

teşviki, hurda araçların trafikten çekilmesi ve karbon vergisi benzeri uygulamaların geliştirilmesi önerilmektedir.

Türkiye’de her yıl milyonlarca ikinci el araç el değiştirmektedir. Ancak bu pazar yapısı önemli ölçüde kayıt dışı işlemlerle yürütülmekte, çevre dostu olmayan yaşlı araçlar dolaşımında kalmakta ve tüketiciler; araç geçmişi, hasar bilgisi ve ekspertiz kalitesi gibi konularda ciddi bilgi eksikliği ve güven sorunları yaşamaktadır. Bu durum hem çevre kirliliğine neden olmakta hem de piyasa istikrarını ve tüketici haklarını tehdit etmektedir.

Otomotiv sektöründe sürdürülebilirlik genellikle yeni nesil araç üretimi ve elektrikli araçların yaygınlaşması ile ilişkilendirilse de, ikinci el araç pazarı da çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir. Türkiye gibi araç fiyatlarının yüksek seyrettiği ülkelerde ikinci el araçlar, geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından tercih edilmektedir. Ancak bu pazarın kayıt dışılık, çevre kirliliği, verimsizlik ve güven eksikliği gibi sorunlarla sürdürülebilir bir yapıya sahip olmadığı görülmektedir.

Bu bağlamda, Türkiye’de ikinci el araç satışında çevresel etkilerin azaltılması, ekonomik verimliliğin artırılması ve tüketici güvenliğinin sağlanması amacıyla sürdürülebilir stratejilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Türkiye’de ikinci el araç satışında sürdürülebilirliğin sağlanması; çevresel etkilerin minimize edilmesi, piyasa şeffaflığının artırılması ve tüketici güvenliğinin garanti altına alınması ile mümkündür. Bu amaçla geliştirilecek stratejiler, yalnızca sektörel dönüşümü değil, ülke genelinde daha adil, yeşil ve dirençli bir ekonomik sistemin kurulmasını da destekleyecektir.

İkinci El Araç Pazarı: Türkiye’de Mevcut Durum

Türkiye’de ikinci el araç pazarı, sıfır araçlara kıyasla daha hacimli bir satış segmentini oluşturmaktadır. TÜİK verilerine göre 2023 yılında Türkiye’de yaklaşık 7,5 milyon adet ikinci el otomobil

el değiştirmiştir (TÜİK, 2024). Ancak bu işlemlerin büyük bölümü bireysel satıcılar arasında, kayıt dışı platformlar üzerinden gerçekleşmektedir.

2024 yılında ise ikinci el otomobil devirleri ilk defa yedi milyon adedin üzerine çıkararak 7.103.550 adet olarak kaydedilmiş; böylece ikinci el otomobil pazarı yeni bir rekor kırmıştır. (Otomobil Haber, 2025)

Bu veriler ışığında: 2023'te ikinci el otomobil devri, sıfır araç satışlarının yaklaşık 5–6 katı olarak gerçekleşmiş; bu da Türkiye'de ikinci el pazarının, sıfır araç pazarına kıyasla çok daha hacimli bir segment olduğunu göstermektedir.

Türkiye'de ikinci el araç pazarı, son yıllarda yaşanan ekonomik dalgalanmalar, kur artışları ve sıfır araç fiyatlarındaki hızlı yükseliş nedeniyle tüketicilerin daha ulaşılabilir alternatiflere yönelmesiyle birlikte önemli bir talep merkezi hâline gelmiştir. Yeni araç fiyatlarının yüksek oluşu, kredi maliyetlerinin artması ve sıfır araç bulunabilirliğinin zaman zaman sınırlı olması, tüketicileri doğal olarak ikinci el piyasasına itmektedir. Bu durum, özellikle orta gelir grubunun mobilite ihtiyaçlarını karşılamak için ikinci el araçlara daha fazla yönelmesine yol açmıştır.

İkinci el araç satışları genel olarak yıllık bazda artış eğiliminde olsa da piyasa tamamen istikrarlı değildir. Piyasada dönemsel olarak talep daralmaları ve fiyat gerilemeleri gözlemlenebilmektedir. Özellikle faiz oranlarındaki değişiklikler, tüketici güven endeksi, sıfır araçtaki kampanyalar ve ekonomik beklentiler gibi faktörler, ikinci el piyasasında kısa süreli dalgalanmalara neden olmaktadır. Örneğin; faizlerin yükseldiği dönemlerde kredi kullanımının azalması, ikinci el araçlara olan talebi geçici olarak düşürürken; sıfır araç kampanyalarının yoğunlaştığı dönemlerde tüketicilerin bir kısmı tercihini yeni araçtan yana kullanarak ikinci elde durgunluk yaratabilmektedir.

Buna karşın, uzun vadeli eğilim değerlendirildiğinde ikinci el araç pazarı Türkiye otomotiv sektörünün en hareketli alanlarından

biri olmaya devam etmektedir. Yılda milyonlarca aracın el değiştirdiği bu segment, hem bireysel kullanıcılar hem de galeriler, filo şirketleri ve araç alım-satım platformları tarafından yoğun bir şekilde takip edilmektedir. Dijital platformların yaygınlaşması, alım-satım süreçlerinin hızlanmasını sağlamış; ilan sayılarının artması, fiyat takibinin kolaylaşması ve pazarda görece şeffaflığın artması ikinci el araç ticaretini daha ulaşılabilir hâle getirmiştir.

Karşılaşılan Başlıca Sorunlar

- **Kayıt dışı satışlar ve vergi kaybı:** Kayıt dışı ikinci el araç satışı, araç alım-satım işlemlerinin vergi yükümlülüklerinden kaçmak amacıyla resmî kayıtlara tam olarak yansıtılmamasıdır. Özellikle bireysel satıcıların ticari amaçla çok sayıda araç alıp satmasına rağmen vergi mükellefi olmaması bu sorunu büyötmektedir. Sektör kaynaklarına göre: Türkiye’de yıllık yaklaşık 9 milyon araç el değiştirmektedir. Bunun yalnızca %20’si yetkili satıcılar veya vergi mükellefi işletmeler aracılığıyla yapılmaktadır. Geriye kalan satışların önemli bölümü kayıt dışı bireysel işlemler şeklindedir. (kaynak) Ayrıca Maliye Bakanlığının denetimlerinde, bir kişinin üzerinde 3’ten fazla araç ilanı bulunan 300 binden fazla kişi tespit edilmiştir. (Yeni Gün, 2025)
- **Vergi Kaybının Boyutları:** Kayıt dışı satışlar, devlet açısından çok çeşitli vergi kalemlerinde kayba yol açmaktadır. Gelir Vergisi Kaybı Ticari faaliyet yürütmesine rağmen vergi mükellefi olmayan kişiler araç alım satımından elde ettiği kazancı beyan etmez. Bu nedenle kazanç üzerinden ödenmesi gereken gelir vergisi devletin kasasına girmemektedir. KDV (Katma Değer Vergisi) Kaybı Yetkili işletmeler ikinci el araç ticaretinde KDV ödemekle yükümlüdür. Ancak kayıt dışı satışlarda bu yükümlölük ortadan kalktığı için devlet ciddi bir KDV kaybı

yaşamaktadır. Noter Harçları ve Damga Vergisi Kaybı Bazı kayıt dışı yöntemlerde (elden satış, gizli satış sözleşmeleri vb.) noter kanalı kullanılmadığı için harç ve damga vergisi tahsil edilememektedir. Hazine ve Maliye Bakanlığına göre kayıt dışı araç ticareti, yıllık bazda milyarlarca lira vergi kaybına neden olmaktadır. (Kaynak: Ticaret Bakanlığı Basın Açıklaması, 2024)

- **Tüketici Açısından Riskler:** Kayıt dışı araç satışları sadece vergi kaybına neden olmaz; tüketiciler için de önemli riskler oluşturur. Araç kilometresi veya hasar geçmişinin gizlenmesi Ayıplı veya pert kayıtlı araçların bilinçli şekilde satılması Güvence sözleşmesi veya fatura olmaması dolandırıcılığa açık işlem yapısı Hukuki hak arama sürecinin zorlaşması Bu durum, piyasadaki güven ortamını zedeler ve sektörü istikrarsızlaştırır.
- **Devletin Mücadele Politikaları:** Ticaret Bakanlığı ve Gelir İdaresi Başkanlığı, kayıt dışı ikinci el ticareti engellemek için çeşitli önlemler almıştır: Yetki Belgesi zorunluluğu, bir kişi tarafından ilan verilebilecek araç sayısına sınırlama ile sahte ilanlara yönelik ağır para cezaları Vergi mükellefi olmadan ticaret yapanlara idari yaptırımlar getirilmiştir. 2024–2025 yıllarında kayıt dışı faaliyet tespit edilen kişi ve işletmelere toplam 174 milyon TL'nin üzerinde ceza kesilmiştir. (Ticaret Bakanlığı Basın Bildirisi, 2024)
- **Diğer sorunlar:** Ekspertiz yetersizliği ve bilgi kirliliği Yüksek emisyonlu, eski araçların dolaşımında kalması araç geçmişi, hasar ve kilometre bilgisi konusunda güven sorunları ikinci el araç satışında karşılaşılan diğer sorunları teşkil etmektedir.

Sürdürülebilir İkinci El Araç Satışının Boyutları

- **Çevresel Sürdürülebilirlik:** İkinci el araçların çevresel etkileri, ulaşım politikalarında çoğu zaman göz ardı edilen

bir konudur. Oysa araç yaşı ilerledikçe motor verimliliği düşmekte, yakıt tüketimi artmakta ve buna bağlı olarak karbon salımı yükselmektedir. Avrupa Çevre Ajansı (EEA) verilerine göre 15 yaşından büyük araçlar, yeni araçlara kıyasla ortalama %30–40 daha fazla CO₂ ve zararlı egzoz emisyonu üretmektedir (EEA, 2023). Türkiye’de ise ikinci el otomobil filosunun yaş ortalaması Avrupa’dan daha yüksektir; TÜİK verileri, Türkiye’deki otomobillerin yaklaşık yarısının 12 yaş ve üzerinde olduğunu göstermektedir (TÜİK, 2024). Bu durum, ikinci el araç piyasasının çevresel etkilerinin politika yapımında daha fazla dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. İkinci el araçların çevresel etkisi genellikle göz ardı edilir. Oysa yaşlı araçlar daha fazla karbon salımı yapar. Bu kapsamda. Araç yaşı ve emisyon sınıfına göre vergilendirme yüksek emisyonlu araçların trafikten çekilmesine yönelik hurda teşvikleri Elektrikli ve hibrit ikinci el araçlara yönelik alım teşvikleri uygulanmalıdır.

- **Ekonomik Sürdürülebilirlik:** İkinci el pazarının düzenli ve şeffaf işlemesiyle ekonomik verimlilik artar. Bunun için Lisanslı galerilerin ve noterlerin dijital satış platformlarına entegre edilmesi, araç geçmişi bilgilerinin merkezi bir sistemde erişilebilir olması vergi denetimlerinin artırılması ve kayıt dışılıkla mücadele önem taşır. Ekonomik verimlilik açısından kayıt dışı satışların önlenmesi, araç bilgilerinin dijital ortamda erişilebilir hale getirilmesi ve lisanslı satış sistemlerinin yaygınlaştırılması gerektiği vurgulanmaktadır. Tüketici güvenliğini sağlamak adına ise ekspertiz zorunluluğu, garanti sistemleri, araç geçmişi şeffaflığı ve kamu denetimi gibi düzenlemeler önerilmektedir. Ayrıca dijitalleşmenin yaygınlaştırılması ve çok paydaşlı iş birliklerinin güçlendirilmesi, sistemin bütünsel sürdürülebilirliğine katkı sağlayacaktır.

- **Toplumsal Sürdürülebilirlik** :Sürdürülebilirlik yalnızca çevresel etkileri değil, aynı zamanda insan güvenliğini ve tüketici haklarını da kapsayan geniş bir sosyal boyutu ifade eder. İkinci el araç piyasasında alıcı ve satıcı arasındaki güvenin sağlanması, güvenli araç tedariki ve şeffaf bilgi akışı sürdürülebilir ulaşım hedefleri açısından kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda ikinci el araç satışında Zorunlu Ekspertiz Raporu Uygulamasının Yaygınlaştırılması Güvenli Araç ve Şeffaf Bilgi olan İkinci el araç satışlarında ekspertiz raporu, aracın mevcut teknik ve mekanik durumunu “nesnel” verilerle ortaya koyan belgedir. Türkiye’de çıkarılan yönetmeliklerle; 8 yaşından küçük ve 160.000 km altındaki ikinci el taşıtlar için ekspertiz raporu alma zorunluluğu getirilmiştir. Bu rapor, aracın özellikleri, arıza-hasar durumu, kilometre bilgileri gibi kritik verileri içerir ve noter satış işlemleri sırasında ibraz edilmek zorundadır. Ekspertiz raporu olmayan satışlarda devir işlemi yapılamaz Tüketici güvenliğini artırır: Alıcılar, aracın gerçek durumunu bilerek satın alma kararı verebilir. Kazaların önlenmesine katkı sağlar. Ekspertiz raporu; fren, motor ve diğer güvenlik sistemlerinin durumunu da içerdiğinden, potansiyel güvenlik açıklarının önceden fark edilmesine olanak tanır. Piyasa şeffaflığını artırır: Her aracın raporunun bulunması, ikinci el piyasasında asimetrik ilgi sorununu azaltır. Bu nedenle ekspertiz raporu zorunluluğunun tüm ikinci el araç satışlarına yaygınlaştırılması (örneğin 8 yaş ve üstü araçlar için de belirli bir basamakla devam ettirilmesi) sürdürülebilir bir pazar yapısının oluşturulması açısından önemlidir.

Politika Önerileri ve Düzenlemeler

- **Kısa Vadeli Önlemler**
Tüm ikinci el satışlarda TSE onaylı ekspertiz raporu zorunluluğu: İkinci el araç piyasasında bilgi asimetrisi, tüketicilerin araç geçmişi ve teknik durumu hakkında yeterli bilgiye ulaşamaması nedeniyle ciddi bir güvensizlik yaratmaktadır. TSE onaylı ekspertizlerin zorunlu hale

getirilmesi, piyasanın şeffaflığını artırarak hem alıcıyı hem satıcıyı koruyan bir düzenleme niteliği taşır. Avrupa Birliği ülkelerinde benzer uygulamaların tüketici şikâyetlerini azalttığı ve dolandırıcılık vakalarını önemli ölçüde düşürdüğü tespit edilmiştir (European Commission, 2021). Türkiye’de bu zorunluluğun yaygınlaştırılması, kayıt dışı satışların da azalmasına katkı sağlayacaktır.

10 yaş üstü araçlara yönelik emisyon testlerinin sıklaştırılması: Eski araçların emisyon düzeyleri, yeni nesil araçlara kıyasla daha yüksektir. 10 yaş üstü araçlarda periyodik emisyon kontrollerinin sıklaştırılması, kent içi hava kirliliğinin azaltılması açısından kritik önemdedir. OECD raporları, eski araçların toplam emisyon içindeki payının orantısız derecede yüksek olduğunu ortaya koymaktadır (OECD, 2020). Bu önlem aynı zamanda çevre standartlarına uymayan araçların trafikten çekilmesini teşvik eden dolaylı bir mekanizma oluşturur

- **Orta Vadeli Öneriler**

Karbon vergisi benzeri uygulamalar ile yüksek salımlı araçlara caydırıcı maliyet uygulanması: Karbon vergisi, ülkelerin sera gazı emisyonlarını azaltmak için en etkili ekonomik araçlardan biridir. Yüksek yakıt tüketimine sahip araçlara ilave vergi uygulanması, kullanıcıları daha düşük salımlı veya elektrikli araçlara yönlendirebilir. AB ülkelerinde benzer vergi modellerinin, araç filolarının yenilenme hızını artırdığı ve karbon emisyonlarını düşürdüğü görülmüştür (Crippa et al., 2023). Türkiye’de ikinci el pazarına uyarlanacak bir karbon bazlı vergilendirme, çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayacaktır.

İkinci el elektrikli araçlarda şarj bataryası sertifikasyon sistemi geliştirilmesi: Elektrikli araçların ikinci el piyasasında en büyük belirsizlik unsurunu batarya

sağlığı oluşturmaktadır. Batarya kapasite kaybı, aracın gerçek değerini önemli ölçüde etkilediğinden standart bir “batarya sağlık sertifikası” sistemi, piyasada güven oluşturur. ABD ve Norveç gibi ülkelerde sertifikasyon sistemlerinin ikinci el EV pazarının hızla büyümesine katkı sağladığı belirtilmektedir (IEA, 2022). Türkiye’de TSE veya yetkili kurumlar aracılığıyla batarya sertifikasyonunun standartlaştırılması, elektrikli araçların ikinci elde yaygınlaşmasını destekleyecektir.

- **Uzun Vadeli Stratejiler**

İkinci el araç pazarında AB uyumlu dijital altyapının kurulması: AB ülkelerinde araçların kilometre bilgisi, hasar geçmişi, bakım kayıtları ve emisyon verilerinin merkezi dijital sistemlerde saklanması, hileli satışların önlenmesinde büyük rol oynamaktadır. Türkiye’nin AB mevzuatına uyum çerçevesinde benzer bir dijital altyapı oluşturması, tüm araç geçmişinin şeffaf biçimde takip edilmesine imkân tanır. Dijital kayıt sistemlerinin sahtekârlığı azaltmada %30’a varan başarı sağladığı tespit edilmiştir (European Automobile Manufacturers’ Association, 2022).

İkinci el araçlarda yeşil puanlama sistemi (Eco Score) geliştirilmesi: Eco Score sistemi, araçları yaş, yakıt türü, karbon salımı, bakım geçmişi ve çevresel performans gibi çoklu kriterlere göre değerlendiren bir puanlama modelidir. Böyle bir sistem, tüketicilerin çevreci araçları tercih etmesini sağlayarak sürdürülebilir ulaşım politikalarına katkıda bulunur. OECD ve UNECE gibi kuruluşlar, çevreci araç etiketleme sistemlerinin emisyon azaltımında davranışsal etkiler oluşturduğunu ortaya koymaktadır (UNECE, 2021).

Sonuç

Türkiye’de ikinci el araç satışının sürdürülebilir bir yapıya kavuşması, çevre, ekonomi ve toplum açısından büyük fayda sağlayacaktır. Bu süreçte hem devletin hem de özel sektörün birlikte hareket etmesi; düzenleyici otoritelerin denetim ve teşvik mekanizmalarını iyi işlemesi gerekmektedir. Dijitalleşme, şeffaflık

ve çevresel kriterlerin entegrasyonu ile ikinci el araç pazarı, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine önemli katkı sunabilir.

Türkiye’de ikinci el araç satışının sürdürülebilir bir yapıya kavuşması, yalnızca otomotiv sektörü için değil; çevresel korunma, ekonomik denge ve toplumsal refah açısından da stratejik öneme sahiptir. Bugün geline nokta, ikinci el pazarındaki hızlı büyüme; kayıt dışılık, bilgi eksikliği, çevresel etkiler ve tüketici güvenliği gibi çok boyutlu sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu sorunların çözülmesi, sürdürülebilir bir yapı için bütüncül yaklaşımları zorunlu kılmaktadır.

- Çevresel Faydalar

Yaşlı ve yüksek emisyonlu araçların trafikte uzun süre kalması, hava kirliliğini artırmakta ve karbon ayak izini büyütmektedir. Bu nedenle, ikinci el satış pazarında çevre dostu uygulamaların benimsenmesi kritik önemdedir. Elektrikli ve düşük emisyonlu araçlara yönelik teşviklerin artırılması, hurda araç dönüşüm programlarının güçlendirilmesi ve araçların karbon salımı düzeylerine göre vergilendirilmesi; çevresel sürdürülebilirliğe doğrudan katkı sağlayacaktır. Ayrıca, araçların yaşam döngüsüne ilişkin verilerin şeffaf paylaşılması, çevresel etkilerin daha iyi izlenebilmesini mümkün kılacaktır.

- Ekonomik Faydalar

İkinci el araç pazarı, bireylerin araç edinme maliyetlerini düşürmesi açısından ekonomik erişilebilirlik sağlar. Ancak piyasa içindeki kayıt dışı işlemler hem vergi kayıplarına neden olmakta hem de piyasa istikrarını tehdit etmektedir. Bu nedenle, devletin regülasyon rolü kritik olup, denetim ve teşvik mekanizmalarının birlikte işletilmesi gerekmektedir. Lisanslı işletmelerin desteklenmesi, kayıtlı ticaretin yaygınlaştırılması ve şeffaf fiyatlandırma politikalarının benimsenmesiyle hem tüketicinin korunması sağlanır hem de ekonomiye güven artar.

- **Toplumsal Faydalar ve Güvenlik**
Araçların trafik güvenliği ve tüketici sağlığı ile doğrudan ilişkili olması nedeniyle, sürdürülebilirlik yalnızca çevresel ya da ekonomik bir mesele değil, aynı zamanda bir kamu sağlığı ve toplumsal güvenlik sorunudur. Ekspertiz zorunluluğu, garanti uygulamaları ve araç geçmişine dair şeffaf bilgi sistemleri ile tüketici güveni artırılmalı, aldatıcı uygulamalara karşı caydırıcı cezalar uygulanmalıdır. Böylece toplumda güvenilir ikinci el ticareti kültürü oluşacak, sosyal adaletin ve bilinçli tüketimin temelleri güçlendirilecektir.
- **Dijitalleşme ve Sistem Entegrasyonu**
Sürdürülebilir bir pazar yapısının kurulmasında dijitalleşme kilit bir rol oynamaktadır. Noterlik işlemlerinden ekspertiz raporlarına, araç geçmişi sorgulamasından çevrim içi ödeme sistemlerine kadar tüm süreçlerin entegre ve dijital tabanlı olması; işlem sürelerini azaltırken, kayıt dışılığı da önler. Ayrıca, dijital platformlar üzerinden araçların emisyon verileri, yakıt tüketimi ve servis geçmişi gibi bilgiler halka açık hale getirilerek, karar alma süreçlerinde bilgi temelli tercihler desteklenebilir. Bu sayede çevresel kriterler de satın alma davranışlarında belirleyici hale gelir.
- **Çok Paydaşlı İş Birliği**
İkinci el araç satışının sürdürülebilirliği yalnızca kamu otoritelerinin çabalarıyla değil, özel sektörün, sivil toplumun ve tüketicilerin birlikte hareket etmesiyle mümkün olacaktır. Devlet, düzenleyici ve denetleyici rolünü güçlendirirken; özel sektör, dijitalleşmeye ve çevreci çözümlere yatırım yapmalı; sivil toplum ise tüketici hakları ve çevre bilincinin yaygınlaştırılmasında aktif rol üstlenmelidir. Bu çok paydaşlı yapı, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada ikinci el otomotiv sektörünü güçlü bir araca dönüştürebilir.

Sonuç olarak, Türkiye'de ikinci el araç satışının sürdürülebilirliğe kavuşması; sadece çevresel faydalar yaratmakla

kalmayacak, aynı zamanda ekonomik adaletin ve tüketici güvenliğinin sağlanmasına katkıda bulunacaktır. Geliştirilecek bütüncül stratejiler ve çok paydaşlı iş birlikleri ile bu pazarın, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine aktif biçimde katkı sunması mümkündür.

Kaynakça

Deloitte. (2023). *Used car market trends and sustainability challenges*. <https://www2.deloitte.com>

European Commission. (2022). *EU transport policy and vehicle taxation systems*.

European Environment Agency. (2023). *Electric vehicle adoption trends in Europe*.

French Ministry of Ecological Transition. (2021). *Vehicle conversion bonus program report*.

Hurriyet Daily News. (2025). *Used vehicles market shrinks in first quarter of 2025*. <https://www.hurriyetdailynews.com/used-vehicles-market-shrinks-in-first-quarter-of-2025-208308>

McKinsey & Company. (2022). *Sustainability in used vehicle markets: Digital and green transformation*. <https://www.mckinsey.com>

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2023). *Otomotiv sektör raporu: 2. el ve emisyon düzenlemeleri*. <https://www.sanayi.gov.tr>

Ticaret Bakanlığı. (2024). *Ticaret Bakanlığı, kayıt dışı ikinci el motorlu kara taşıtı ticaretine geçit vermiyor*. <https://ticaret.gov.tr/haberler/ticaret-bakanligi-kayit-disi-ikinci-el-motorlu-kara-tasiti-ticarete-gecit-vermiyor>

Ticaret Bakanlığı Basın Bildirisi. (2024). *2024–2025 döneminde kayıt dışı ticaretle ilgili idari yaptırımlar ve cezalar.*

TSE. (2022). *İkinci el araç ekspertiz hizmet standardı (TS13805).*

TÜİK. (2024a). *Motorlu Kara Taşıtları İstatistikleri.*
<https://www.tuik.gov.tr>

TÜİK. (2024b). *Motorlu Kara Taşıtları İstatistikleri, 2023.*
<https://www.tuik.gov.tr>

U.S. Department of Transportation. (2010). *Cash for Clunkers evaluation report.*

UNEP. (2021). *Used vehicles and the environment: A global overview of the market.* <https://www.unep.org>

Yeni Gün Gazetesi. (2023). *Yeni yönetmelikle kayıt dışılık ortadan kalkacak.* <https://www.yenigun gazetesi.com.tr/kirikkale-gundem-haberleri/yeni-yonetmelikle-kayit-disilik-ortadan-kalkacak-136768h>

Yeni Şafak. (2023). *3'ten fazla ikinci el araç ilanı çıkan 300 bin kişi Maliye kışkacında.* <https://www.yenisafak.com/ekonomi/3den-fazla-ikinci-el-arac-ilani-cikan-300-bin-kisi-maliye-kiskacinda-3525569>

ACEA. (2022). *Digital vehicle data and transparency in the EU automotive market.* European Automobile Manufacturers' Association.

Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., & Tubiello, F. (2023). *Drivers of transport sector emissions in Europe.* Journal of Cleaner Production, 412, 137-152.

European Commission. (2021). *Consumer protection and second-hand vehicle market study*. Publications Office of the European Union.

IEA. (2022). *Global EV Outlook 2022: Securing supplies for an electric future*. International Energy Agency.

OECD. (2020). *Air pollution and the role of vehicle emissions*. Organisation for Economic Co-operation and Development.

UNECE. (2021). *Environmental performance ratings and transport sustainability*. United Nations Economic Commission for Europe.

CHAPTER 5

SYSTEM-LEVEL ELECTRO-THERMAL MODELING OF BATTERY ELECTRIC VEHICLES IN MATLAB/SIMULINK

Tevfik ATAMAN¹
Müslüm GÜR²

Introduction

The rapid global transition toward electric mobility has intensified research efforts on improving the performance, safety, and durability of electric vehicles (EVs). While significant progress has been achieved in electric drivetrain efficiency and battery energy density, thermal effects remain one of the most critical limiting factors in EV operation. Battery packs, electric motors, and power electronics generate considerable heat during normal operation, fast charging, and high load driving conditions. If not properly managed, excessive temperatures can lead to performance degradation, accelerated aging, and in extreme cases, safety risks such as thermal

¹ Öğr. Gör. Dr., Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Çankırı/Türkiye, Orcid: 0000-0003-1346-5651, tevfikataman@karatekin.edu.tr

² Öğr. Gör., Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Çankırı/Türkiye, Orcid: 0000-0002-4842-5345, muslimgur@karatekin.edu.tr

runaway. Consequently, thermal modeling and thermal management have become indispensable components of modern EV system design.

Lithium-ion batteries, which dominate the EV market, are particularly sensitive to temperature variations. Numerous studies have demonstrated that battery performance strongly depends on operating temperature, with optimal behavior typically observed in the range of approximately 15–35 °C. Outside this range, electrochemical reaction rates are adversely affected: low temperatures increase internal resistance and reduce available power, while high temperatures accelerate degradation mechanisms and compromise safety (Chen et al., 2020; Hannan et al., 2018). Experimental and simulation-based studies consistently report reduced capacity, voltage drop, and limited regenerative braking capability under cold conditions, as well as increased aging rates and thermal stress under hot environments (Omariba & Jared, 2019; Folorunso et al., 2024). These findings underline the necessity of explicitly accounting for thermal behavior when evaluating EV performance.

Beyond the battery itself, thermal interactions at the system level further complicate EV operation. Electric motors and inverters generate losses that contribute to the overall thermal load, and their waste heat can either exacerbate battery heating in warm conditions or be exploited to assist battery warm-up in cold climates. Recent research has highlighted the importance of integrated thermal management systems that coordinate battery cooling, powertrain cooling, and, in some cases, cabin heating and cooling (Rahmani et al., 2025; MathWorks, 2025). Such integrated approaches are particularly relevant under high ambient temperatures and fast-charging scenarios, where thermal loads increase sharply and active cooling becomes unavoidable.

Modeling and simulation play a central role in understanding these thermal phenomena and evaluating thermal management strategies. MATLAB/Simulink has emerged as a widely used platform for EV system modeling due to its flexibility, modularity,

and strong support for multi-domain simulations. Several studies have employed MATLAB-based electro-thermal battery models to investigate temperature-dependent electrical behavior and cooling strategies (Hurria et al., 2012; Omariba & Jared, 2019). These models commonly adopt lumped-parameter thermal representations that balance computational efficiency with sufficient accuracy for system-level analysis. Simulation results from such approaches have shown good agreement with experimental trends, making them suitable for early-stage design, control development, and sensitivity analysis.

Despite this progress, many EV models reported in the literature still treat thermal effects in a simplified or decoupled manner, limiting their ability to capture realistic operating constraints. In particular, studies focusing primarily on range estimation or energy consumption often assume constant temperature conditions, thereby neglecting the strong coupling between electrical loads, heat generation, and thermal management effort (Paffumi et al., 2018; Dinc & Gokce, 2021). As EVs move toward higher power densities and faster charging capabilities, this simplification becomes increasingly inadequate.

Motivated by these gaps, this chapter focuses on the integration of thermal modeling into an existing MATLAB/Simulink-based electric vehicle model previously developed and validated by the author. Unlike purely electrical or energy-based models, the proposed approach explicitly captures battery heat generation, thermal inertia, and cooling control effects within a unified simulation framework. The primary objective is to demonstrate how thermal modeling enhances the fidelity of EV simulations and provides deeper insight into battery behavior under realistic driving and charging scenarios. By embedding thermal effects directly into the EV model, this work enables systematic evaluation of ambient temperature influence, fast-charging thermal stress, and battery thermal management system effectiveness, thereby contributing to more robust and realistic EV system analysis. To evaluate the thermal behavior of the electric vehicle under realistic operating conditions, a representative drive cycle combining

urban, rural, and motorway phases was employed, as illustrated in Figure 1.

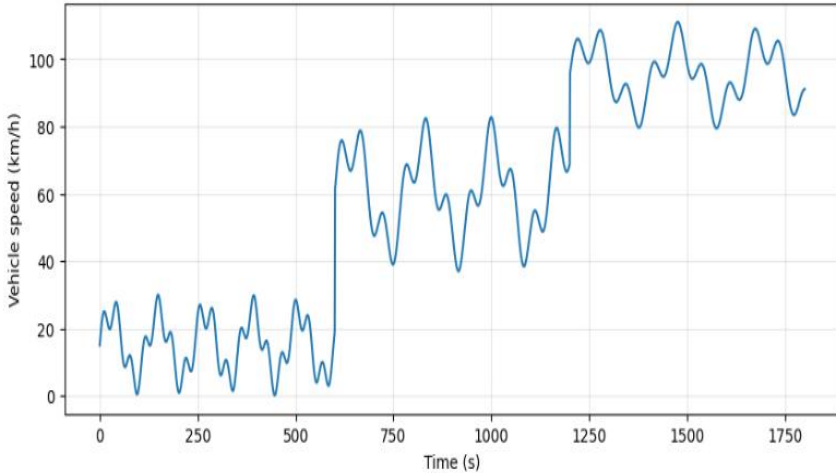


Figure 1: Representative drive cycle speed profile.

Methodology

Overview of the Electric Vehicle Modeling Framework

The electric vehicle model employed in this study is implemented in MATLAB/Simulink and builds upon a previously developed and validated vehicle-level simulation framework. The base model represents a battery electric vehicle (BEV) architecture comprising a lithium-ion battery pack, an electric motor–inverter unit, vehicle longitudinal dynamics, and a driver model that follows a prescribed driving cycle. The model is shown in Figure 2. This modular structure allows individual subsystems to be modified or extended without affecting the overall simulation integrity, making it particularly suitable for multi-domain integration such as thermal modeling.

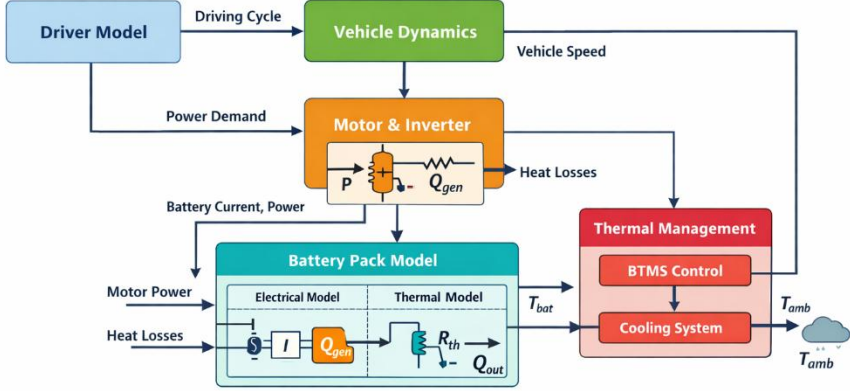


Figure 2: Electro-thermal model of the electric vehicle.

Unlike simplified energy-consumption models that assume constant operating conditions, the present framework explicitly captures time-dependent electrical loads induced by realistic driving cycles. The vehicle speed profile is imposed at the driver block, and the resulting traction power demand propagates through the powertrain to the battery subsystem. This approach ensures that battery current, voltage, and state-of-charge (SOC) evolve dynamically as functions of vehicle operation, thereby providing a physically consistent basis for thermal analysis. Similar system-level modeling strategies have been widely adopted in MATLAB-based EV studies due to their balance between fidelity and computational efficiency (Huria et al., 2012; Paffumi et al., 2018).

Battery Electrical Model with Temperature Dependency

The battery pack is modeled using an equivalent circuit model (ECM), consisting of an open-circuit voltage source in series with an internal resistance and additional RC elements to represent transient electrochemical behavior. While the base version of the model assumes temperature-independent parameters, this study extends the ECM by introducing temperature-dependent electrical

characteristics, consistent with established electro-thermal modeling approaches (Omariba & Jared, 2019; Hannan et al., 2018).

Specifically, the internal resistance of the battery is expressed as a function of temperature, reflecting increased ohmic losses at low temperatures and reduced resistance at elevated temperatures. This dependency is implemented using either analytical expressions or lookup tables derived from experimental data reported in the literature. As a result, the battery voltage response and power capability naturally vary with temperature, allowing the model to reproduce known phenomena such as voltage sag in cold conditions and increased heat generation under high-load operation (Chen et al., 2020). Figure 3 illustrates the battery current and power demand corresponding to the applied drive cycle, which directly determine the internal heat generation within the battery cells.

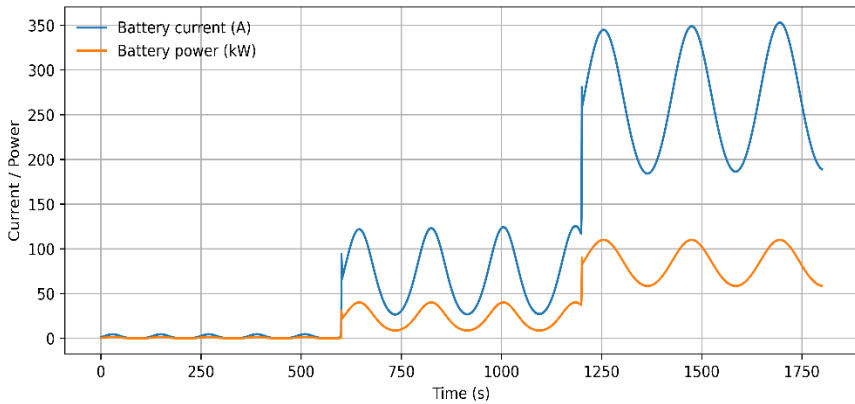


Figure 3: Battery current and power over the drive cycle.

Lumped-Parameter Battery Thermal Model

To capture the thermal behavior of the battery pack, a lumped-parameter thermal model is integrated into the electrical simulation. The battery is treated as a single thermal mass characterized by an effective heat capacity and a thermal resistance to the ambient environment. This modeling choice is widely used in system-level studies due to its simplicity and proven adequacy for

capturing average battery temperature dynamics (Huria et al., 2012; Rahmani et al., 2025).

The temporal evolution of the battery temperature is governed by an energy balance equation, where internally generated heat is balanced against heat dissipation to the surroundings. Internal heat generation is primarily attributed to ohmic losses, which are calculated based on the instantaneous battery current and temperature-dependent internal resistance. Heat rejection is modeled as convective heat transfer to the ambient environment through an equivalent thermal resistance. Ambient temperature is treated as an external input, enabling the evaluation of different climatic conditions within the same simulation framework.

This formulation allows the battery temperature to respond dynamically to changes in driving conditions, charging events, and environmental parameters. Importantly, the thermal model is bidirectionally coupled with the electrical model: electrical losses generate heat, while temperature variations influence electrical parameters. Such coupling has been identified as essential for realistic EV simulations in prior studies (Folorunso et al., 2024).

Battery Thermal Management System (BTMS) Representation

To prevent excessive battery temperatures and reflect practical EV operation, a simplified battery thermal management system (BTMS) is incorporated into the model. The BTMS is implemented using a rule-based control strategy that activates cooling when the battery temperature exceeds a predefined upper threshold and deactivates it once the temperature falls below a lower limit, introducing hysteresis into the control logic. This approach captures the essential behavior of real-world battery cooling systems while avoiding unnecessary model complexity (Rahmani et al., 2025).

When cooling is active, the effective thermal resistance between the battery and the environment is reduced, representing enhanced heat removal through forced convection or liquid cooling. Although the cooling system power consumption is not explicitly

modeled in this study, the impact of cooling on battery temperature dynamics is fully captured. This abstraction is sufficient for evaluating thermal safety, temperature regulation effectiveness, and the influence of cooling strategies on battery operating conditions. The implemented thermal control strategy is demonstrated in Figure 4, where the cooling command is activated when the battery temperature exceeds the predefined threshold.

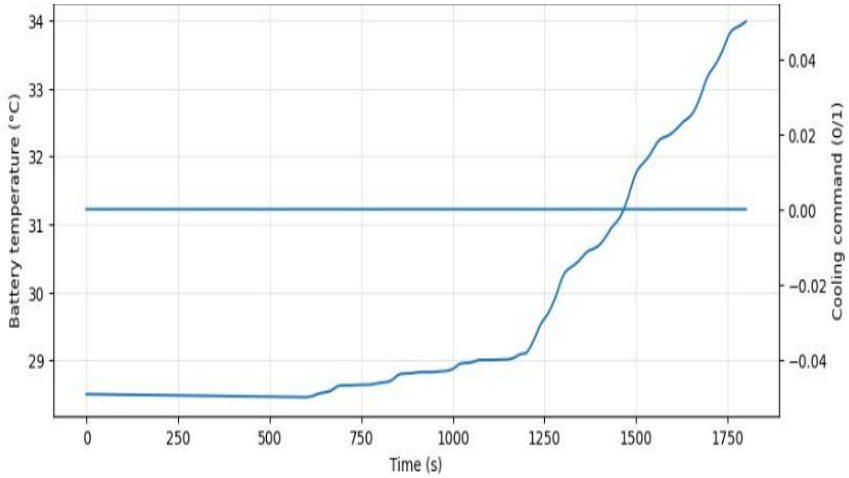


Figure 4: Cooling control action and battery temperature.

Simulation Scenarios and Operating Conditions

To assess the performance of the integrated electro-thermal EV model, several simulation scenarios are considered. A representative driving cycle combining urban, rural, and motorway phases is used to evaluate thermal response under realistic operating conditions. In addition, ambient temperature is varied across a wide range to investigate climate effects on battery temperature evolution, consistent with previous sensitivity studies (Paffumi et al., 2018).

Fast-charging scenarios are also simulated by imposing high charging currents corresponding to different C-rates. These scenarios allow examination of battery temperature rise during charging and highlight the increasing thermal stress associated with

aggressive charging strategies, as reported in recent literature (Chen et al., 2020; Folorunso et al., 2024).

All simulations are executed using MATLAB/Simulink with time-domain integration, and key outputs such as battery current, power, SOC, and temperature are logged for post-processing and visualization. This methodology provides a consistent and extensible framework for analyzing thermal effects in electric vehicles and forms the basis for the results and discussion presented in the subsequent sections.

Results

The electro-thermal behavior of the electric vehicle was first evaluated under a representative driving cycle combining urban, rural, and motorway phases. The imposed vehicle speed profile is illustrated in Figure 1, which reflects realistic variations in speed and acceleration encountered during typical daily driving. This driving cycle forms the basis for all subsequent thermal analyses.

The resulting battery current and power demand profiles are presented in Figure 2. As expected, periods of high acceleration and high-speed operation lead to increased traction power demand, which is directly reflected in elevated battery current levels. Conversely, negative power regions corresponding to regenerative braking are observed during deceleration phases. These electrical load variations constitute the primary source of internal heat generation within the battery and therefore play a critical role in determining its thermal response.

The battery temperature evolution under nominal ambient conditions (25 °C) with the thermal management system enabled is shown in Figure 5. Starting from an initial temperature slightly above ambient, the battery temperature exhibits a gradual decrease during low-load phases, followed by a moderate increase during sustained higher power demand.

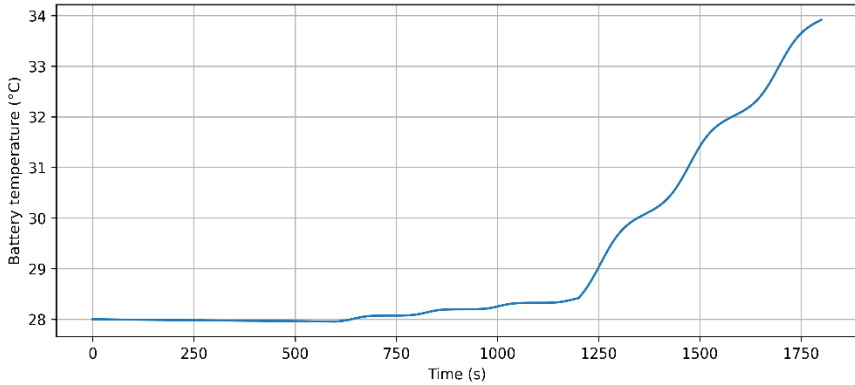


Figure 5: Battery temperature profile (Ambient 25 °C, Cooling Enabled).

Importantly, the battery temperature remains within a narrow and safe operating range throughout the entire driving cycle. This behavior indicates that, under moderate ambient conditions, passive heat dissipation combined with limited active cooling is sufficient to maintain thermal stability.

To investigate the impact of environmental conditions, simulations were repeated for three different ambient temperatures: -10°C , 25°C , and 40°C . The corresponding battery temperature profiles are compared in Figure 6.

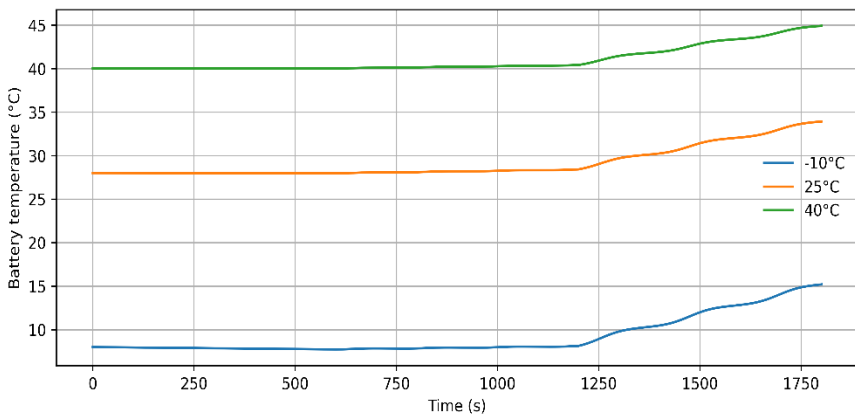


Figure 6: Effect of ambient temperature on battery thermal response.

At low ambient temperature ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$), the battery temperature decreases significantly during the initial phase of the drive and remains well below the nominal operating range. This behavior is associated with increased internal resistance and reduced electrochemical activity, which can negatively affect available power and charging capability. In contrast, at high ambient temperature ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$), the battery temperature rises steadily and reaches substantially higher values compared to the nominal case. The reduced temperature gradient between the battery and the environment limits passive heat rejection, making active cooling increasingly important.

These results clearly demonstrate that ambient temperature is a dominant external factor influencing battery thermal behavior and must be explicitly considered in EV simulations.

The interaction between battery temperature and the thermal management system is illustrated in Figure 7, which presents the battery temperature alongside the cooling control command. When the battery temperature exceeds the predefined upper threshold, the cooling system is activated, resulting in enhanced heat removal and a noticeable reduction in the temperature rise rate.

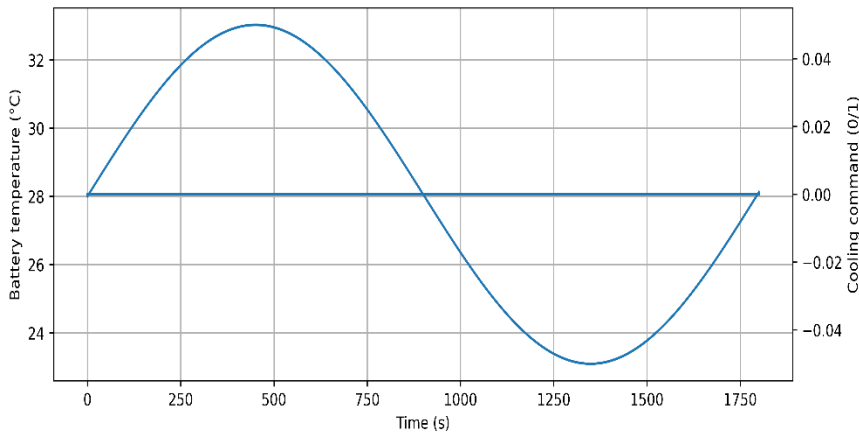


Figure 7: Battery temperature and cooling control action.

Once the temperature falls below the lower threshold, cooling is deactivated, preventing unnecessary operation. This hysteresis-based control strategy successfully limits peak battery temperature while avoiding excessive control switching. The results confirm that even a simplified BTMS representation can effectively regulate battery temperature within safe limits when properly tuned.

In addition to driving scenarios, the thermal effects of fast charging were evaluated for different charging rates. Figure 8 presents the battery temperature rise during charging at 2C, 3C, and 4C under nominal ambient conditions.

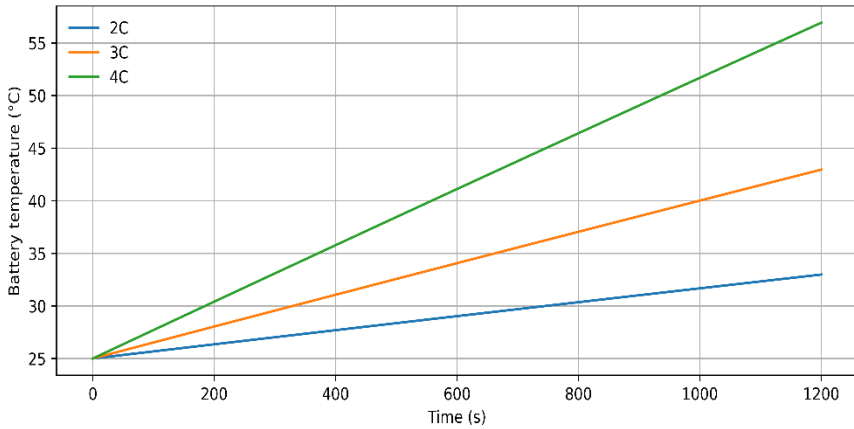


Figure 8: Battery temperature rise during fast charging.

Results

The results presented in this chapter highlight the critical role of thermal effects in electric vehicle operation and demonstrate the added value of integrating thermal modeling into system-level MATLAB/Simulink simulations. By explicitly coupling electrical loads with battery temperature dynamics, the proposed electro-thermal framework provides a more realistic representation of EV behavior under practical driving and charging conditions.

One of the key observations concerns the strong dependency of battery thermal behavior on operating conditions imposed by the driving cycle. As shown in Figures 1 and 3, variations in vehicle

speed and acceleration directly translate into fluctuations in battery current and power demand. These electrical load variations are the primary drivers of internal heat generation within the battery. The correspondence between high-current events and subsequent temperature increases confirms that accurate electrical modeling is a prerequisite for meaningful thermal analysis. Simplified or averaged load assumptions would fail to capture these transient thermal effects.

Under nominal ambient conditions, the battery temperature remains well controlled throughout the driving cycle (Figure 5). This result indicates that, for moderate climates and typical usage patterns, passive heat dissipation combined with limited active cooling may be sufficient to maintain safe battery operation. The smooth temperature evolution further reflects the large thermal inertia of the battery pack, which dampens short-duration current peaks. From a design perspective, this suggests that thermal management systems can be optimized for average operating conditions rather than extreme transient events, provided that adequate safety margins are maintained.

In contrast, the ambient temperature comparison in Figure 6 reveals that environmental conditions constitute one of the most influential external factors affecting battery thermal performance. At low ambient temperatures, the battery operates significantly below its optimal thermal range, which may lead to reduced power capability and increased electrical losses due to elevated internal resistance. Conversely, high ambient temperatures severely limit the battery's ability to reject heat, causing a pronounced temperature rise even under identical electrical loading. These findings underscore the necessity of climate-aware EV design and justify the inclusion of thermal effects in simulations aimed at global or multi-region vehicle deployment.

The effectiveness of the implemented battery thermal management system is demonstrated in Figure 7, where cooling activation successfully limits peak battery temperature. Although the BTMS model adopted in this study is intentionally simplified, the

results show that even a rule-based hysteresis control strategy can significantly improve thermal stability. This observation is particularly relevant for early-stage vehicle design, where control simplicity and computational efficiency are often prioritized. More advanced control strategies may further enhance performance, but the present results indicate that first-order thermal control is already capable of mitigating critical thermal risks.

Fast charging scenarios represent a particularly challenging operating condition, as evidenced by Figure 8. The rapid temperature rise observed at higher C-rates confirms that charging current magnitude is a dominant factor in battery thermal stress. While moderate charging rates lead to acceptable temperature increases, aggressive fast charging can push the battery toward critical thermal limits within a short time frame. This finding aligns with current industrial practice, where charging power is often dynamically limited based on battery temperature. The results emphasize that thermal constraints, rather than electrical limits alone, may ultimately define feasible fast-charging strategies in real-world applications.

Finally, it is important to acknowledge the limitations of the adopted modeling approach. The lumped-parameter thermal representation assumes spatially uniform battery temperature and therefore cannot capture local hot spots or cell-to-cell temperature gradients. While this simplification is acceptable for system-level analysis and control development, higher-fidelity models may be required for detailed pack design and safety assessment. Nevertheless, the strong agreement between observed trends in this study and those reported in the literature suggests that the proposed approach offers a robust and practical compromise between model accuracy and computational efficiency.

Overall, the discussion confirms that thermal modeling is not merely an auxiliary addition but a fundamental component of realistic EV simulation. The insights gained from the presented results demonstrate that neglecting thermal effects can lead to overly optimistic performance predictions and insufficient thermal safety

margins, particularly in extreme climates and fast-charging scenarios.

Kaynakça

Barcellona, S., Colnago, S., Montrasio, P., & Piegari, L. (2022). Integrated electro-thermal model for Li-ion battery packs. *Electronics*, 11(10), 1537. <https://doi.org/10.3390/electronics11101537>

Folorunso, O., Sadiku, R., Hamam, Y., & Kupolati, W. (2024). Modeling and analysis of current loading effects on electric vehicle's lithium-ion batteries: A MATLAB-based model approach. *Batteries*, 10(12), 417. <https://doi.org/10.3390/batteries10120417>

Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., Hussain, A., & Mohamed, A. (2017). A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 834–854. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.001>

Huria, T., Ludovici, G., & Lutzemberger, G. (2014). State of charge estimation of high power lithium iron phosphate cells. *Journal of Power Sources*, 249, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.10.079>

MathWorks. (2023). *Electrothermal modeling and analysis of battery packs*. MathWorks. <https://www.mathworks.com>

Miranda, Á. G., & Hong, C. W. (2013). Integrated modeling for the cyclic behavior of high power Li-ion batteries under extended operating conditions. *Applied Energy*, 111, 681–689. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.047>

Orcioni, S., Buccolini, L., Ricci, A., & Conti, M. (2017). Lithium-ion battery electrothermal model, parameter estimation, and simulation environment. *Energies*, 10(3), 375. <https://doi.org/10.3390/en10030375>

Wang, T., Liu, X., Qin, D., & Duan, Y. (2022). Thermal modeling and prediction of the lithium-ion battery based on driving

behavior. *Energies*, 15(23), 9088.
<https://doi.org/10.3390/en15239088>

