

Research Article

Otomotiv ömür testlerinin Arrhenius yöntemiyle hızlandırılması, Elektrikli güç aktarma sistemleri üzerine deneysel bir çalışma

Habib Kaymaz*

Otobüs Geliştirme, Mercedes Benz Türk AŞ, İstanbul, Türkiye

*Correspondence: habib.kaymaz@daimler.com

DOI: 10.51513/jitsa.1080140

Özet: Otomotiv testleri, araca ait herhangi bir bileşeni, sistemi veya komple aracı, arzu edilen seviyede olduğunu ispat veya regülasyonlara uygun olduğundan emin olmak için sanal, laboratuvar, stant veya gerçek kullanım koşullarında değerlendirmeden geçirmektir. Otomotiv testleri, ürün geliştirme için hayati süreçlerden biridir ve küresel otomotiv pazarlarına erişim için bir gerekliliktir. Testlerin ana hedefi, ürünün muhtemel uyumsuzluğunu yaşam döngüsünün erken aşamalarında ortaya çıkarmaktır. Testlerin aynı zamanda “güvenilir”, “tekrarlanabilir”, “düşük maliyetli” ve “çevre dostu” olması arzu edilir. Bu çalışmada, hafif hibrit bir araca ait elektrikli güç sisteminin müşteri koşullarında öngörülen ömür yeterliliği değerlendirilmiştir. Ömür testini daha güvenilir ve tekrarlanabilir yapmak için testler Arrhenius yöntemiyle hızlandırılmış ve sentetik bir kullanım verisi yerine gerçek sürüş verileri kullanılmıştır. Öngörülen bu yöntem, gerçek koşulları uygulayabilen, CAN-Bus simülasyonu ve yüksek ortam sıcaklığı sağlayabilen bir test standı üzerinde denenmiştir. Geliştirilen test standı ve uygulanan yöntem sayesinde, gerçek koşullar altında elektrikli güç sisteminin ömür testi gerçekleştirilmiş, test süresi 4,65 kat hızlandırılarak zaman ve maliyeti avantajı sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Otobüslerin elektrifikasyonu, Hibrit elektrikli güç aktarma organları, Araç testleri, Hızlandırılmış ömür testi, Arrhenius denklemi

Accelerating automotive life tests with Arrhenius method, An experimental study on electric powertrain systems

Abstract: Automotive testing is the evaluation of any vehicle component, system, or complete vehicle in virtual, laboratory, stand, or real-use conditions to prove that it is at the desired level or to ensure that it complies with regulations. Automotive testing is one of the vital processes for product development and a requirement for access to global automotive markets. The main target of testing is to simulate real-world driving conditions to disclose any weakness of the product at the early stage of its life cycle. It is desirable that the tests are also "reliable", "reproducible", "low cost" and "environmentally friendly". In this study, the predicted lifetime adequacy of a mild hybrid power system under customer conditions was evaluated. To realize the life test more reliable and reproducible, the tests were accelerated with the Arrhenius method, and real driving data was used instead of synthetic usage data. This proposed method was tested on a test stand that is capable of applying real conditions, CAN-Bus simulation, and high ambient temperature. Thanks to the developed test stand and the applied procedure, the life test of the electric powertrain system was realized under real conditions, and the test was accelerated by 4.65 times, providing time and cost advantages.

Keywords: Electrification of buses, Hybrid electric powertrain, Vehicular testing, Accelerated life test, Arrhenius equation

* Corresponding author.

E-mail address: habib.kaymaz@daimler.com

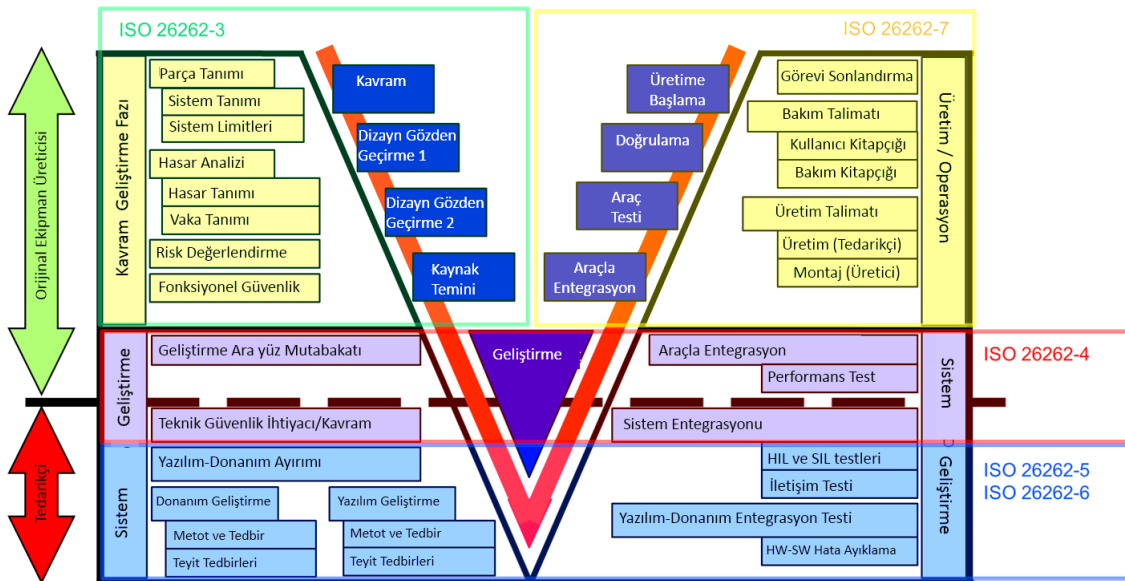
ORCID: 0000-0002-8338-004X

Received 31.10.2022; accepted 22.12.2022

Peer review under responsibility of Bandirma Onyedi Eylul University.

1. Giriş

Otomotiv endüstrisi gerek ürünleri ve gerekse üretim tarzı açısından dünyanın önemli sektörlerinden biridir ve sanayileşmiş ülkelerde ekonominin lokomotifini olarak kabul edilmektedir. Küresel üretimi 2019 yılında 90 milyonu geçen otomotiv endüstrisi, motorlu karayolu araçlarını tasarlayan, geliştiren, üreten ve pazarlayan devasa bir sektördür (OICA). Diğer endüstri kolları içinde otomotiv sektörünü farklı kılan özellik, rakamsal büyüklük veya kârlılıktan ziyade kavram geliştirmeden üretime, tedarik zinciri yönetiminden satış sonrası hizmetlere kadar bütün süreçleriyle rol-model oluşturma kabiliyetidir. Uzay-havacılık-savunma sanayisi gibi ileri teknolojiyi kullanan otomotiv endüstrisi, halen büyük bir teknolojik gelişme potansiyeline sahiptir. Müşteri talepleri yakın geçmişe kadar elektro-mekanik sistemlerle karşılanırken, günümüzde araçlar bilişim, ileri optik ve elektronik (AI, IoT, RADAR, LIDAR, Kamera, Ethernet vb) teknolojilerini kullanan karmaşık bir ürüne dönüşmüştür. Fosil kaynaklı yakıtların oluşturduğu çevresel zorluklar ve yaşanan güvenlik zaafiyeti İngilizcesi CASE (Connected, Autonomous, Shared, Electrified) olarak kısaltılan bağlantılı, otonom, paylaşımlı ve elektriksel değişimleri zorunlu kılmaktadır. Bu teknolojik gelişmeler, ilgili sistemlerin test ve onay süreçlerini de etkilemektedir. Otomotiv testleri, güvenilir ve tekrarlanabilir denemeler yaparak aracın veya alt sistemin olası zayıflığını ortaya çıkaran ürün geliştirmeye ait hayati süreçlerden biridir. Bu aynı zamanda seri üretilen karayolu araçlarının elektrik-elektronik sistemleri için işlevsel güvenlik standardı olan ISO 26262'nin de gereğidir. Bu standart, otomotiv güvenliği bütünlük düzeyi (Automotive Safety Integrity Level, ASIL) olarak tanımlanan risk sınıflarının belirlenmesini sağlar. Standart ayrıca, yeterli ve kabul edilebilir bir güvenlik seviyesi sağlamak için doğrulama ve doğrulama gereksinimlerini tanımlar. Otomotivde kullanılan elektrik-elektronik sistemlerin V model temelli geliştirme süreci Şekil 1' de verilmiştir (ISO).



Şekil 1. Otomotiv sektöründeki V model temelli geliştirme süreci

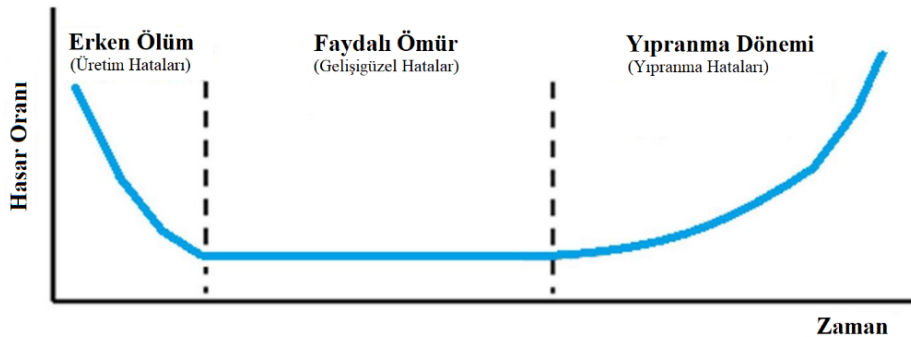
Otomotiv testleri Tablo 1'de gösterildiği gibi farklı şekillerde tasnif edilebilir. Testler, ihtiyaç bazlı olarak ulusal / uluslararası regülasyonlardan kaynaklanan zorunlu testler, üreticinin kendi iç ihtiyaçlarına göre uygunluk / doğrulama testleri ile müşteri istek ve ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik testler olarak sınıflandırılabilir. Testler, gerçekleştirildiği ortama göre model, stant, duran bir araçta veya yolda koşan bir araçta gerçekleştirilir. Araç ve yol testleri komple bir araç gerektirirken, model veya stant üzerindeki testler araçsız yapılabilmektedir. Ancak montaj, fonksiyon, performans, siber güvenlik, dayanım ve ömür testlerinden oluşan kapsam bazlı sınıflandırma test dünyasında daha fazla kullanılmaktadır. Montaj testlerinde, sorunsuz bir şekilde montaj-demontaj-servis ve bakım işlemlerinin yapılabilirliği ile konum/güzergah uygunluğu sınanır.

Fonksiyon testleriyle bir sistemden beklenen işlevsellik kontrol edilir. Performans testleri nicel kriterlere sahip hususlarda (belli bir sürede belli bir hıza çıkma veya durma, dış ortam sıcaklığı belli bir seviyede iken iç ortam sıcaklığının belli bir dereceye belirli bir sürede düşürülmesi veya çıkartılması, iç aydınlatma lambalarıyla belli bir düzeyde belli bir ışık şiddeti elde edilmesi gibi) ölçümsel işlevsellik kontrol edilir. Siber güvenlik testlerinde sistemin muhtemel zafiyetleri (vulnerability) dışardan nüfuz edilebilme (penetrasyon) durumu değerlendirilir. Dayanım testlerinde, ilgili sistem veya parçanın çalışma yükleri ve çevresel şartlarına göre elektrik, mekanik, termal veya kimyasal etkilere dayanımı test edilir. Ömür testleri kullanıma bağlı olarak aşınan, yıpranan ekipmanların arzu edilen çalışma ömrüne sahip olup olmadığını ortaya çıkarmak için yapılır. Gerçek kullanım şartlarında yapılan ömür testlerinin yanında ileride detaylandırılacak hızlandırılmış ömür otomotiv testi sıkça başvurulan testlerdir. (Kalite hatalarını ortaya çıkarmak için yapılan çok hızlandırılmış ömür testleri bu çalışma alanının dışında tutulmuştur.) Ömür testleri -çoğukez- hazır temin edilen bir sistem veya ürünle ilgili olduğundan Şekil 1 de gösterilen tedarikçi kapsamında yapılması gerekir ancak özel durumlarda otomotiv üreticisi (OEM) tarafından yapılmaktadır.

Tablo 1. Araç geliştirme testlerinin sınıflandırılması

İhtiyaç bazlı sınıflandırma	Ortam bazlı sınıflandırma	Kapsam bazlı sınıflandırma
Zorunlu testler (regülasyon, homologasyon) Tasarım doğrulama testleri Müşteri istek ve ihtiyaçlarına yönelik testler	Sanal testler Laboratuvar testleri Stant testleri Yol testleri	Montaj testleri Fonksiyon testleri Performans testleri Siber güvenlik testleri Dayanım testleri Ömür testleri

Ömür testi (life test, LT) hedef aracın tasarımına uygun olarak üretilen test stantlarında yapılır. Ömür testi beklenen yaşam döngüsü boyunca arızaları ve olası arıza modlarını ortaya çıkarmak için çalışma döngüsü ile yıpranabilecek bir ürün için tercih edilir. Ürünlerin hasar oranı, öngörülen zaman aralığında ürünün hasarlanma olasılığıdır. Hasar oran eğrisi, arızaların ne zaman meydana geldiğine bağlıdır. Küvet modeli şeklinde bir hasarlanma modeli, basitleştirici bir varsayım olarak başlangıçta insan yaşamı için tehlike modeli olarak geliştirilmiş ve ilk olarak 17. yüzyılın sonlarında hayat sigortası istatistikleriyle ilgili bir makalede kullanılmıştır. Modelin adı, Şekil 2'de gösterildiği gibi küvete benzeyen şekildedir. Başlangıç dönemi, yüksek ancak zamanla azalan bebek ölümleri veya düşük oranıyla başlar. Bunu, kazalar, cinayetler, kanser gibi rastgele ölümlerin meydana geldiği faydalı ömür dönemi olarak adlandırılan sabit bir yaşam dönemi takip eder. Yıpranma dönemi olarak adlandırılan üçüncü dönem, nüfus yaşlandıkça ve ölüm oranları arttıkça ortaya çıkar (Gaonkar Vd., 2021).



Şekil 2. Küvet modeli formundaki hasar oran eğrisi

Bu model elektrik-elektronik sistemlerinin ömür modellemesinde de kullanılmaya başlanmıştır. Güvenirlilik herhangi bir küvet modeli için zaman periyodu boyunca azalır yani ürünler zamanla bozulmaya devam eder. Erken ölüm bölgesinin, olgunlaşmamış tasarım ve üretim süreçlerinden

kaynaklanan kalite sorunları, standart dışı malzemeler, yetersiz hata ayıklama ve insan hatalarından kaynaklanan arızaları temsil ettiği varsayılmaktadır (Ebeling, 1997). Küvet modelinin ikinci bölgesi olan faydalı ömür periyodu, sabit bir hasarlanma oranı ile gösterilmektedir. Bu bölgenin, çevresel yükler, kötü amaçlı veya yanlış kullanım gibi rastgele olaylardan kaynaklanan arızaları temsil ettiği varsayılmaktadır (Dhillon, 2006). Küvet modelinin üçüncü bölgesi, yıpranma süresi olarak adlandırılır ve artan hasarlanma oranı ile karakterize edilir. Küvet modeli, yıpranma mekanizmalarından kaynaklanan arızaların sadece bu bölgede meydana geldiğini varsaymaktadır. Bir ürünün faydalı ömrünün ne kadar olduğunu, yıpranmanın nerede başladığını tespit etmek için ömür testi yapılır. Ömür testi, normal çalışma koşullarında yapılırken, hızlandırılmış ömür testi (Accelerated life testing, ALT) ise aynı sonuca daha kısa sürede ulaşmak için normal çalışma koşullarının üzerinde yapılır (Kentved, 2011). Hızlandırılmış ömür testlerinin amacı, ürünün normal kullanım koşullarında maruz kaldığı stres seviyesini artırarak hata yapma süresini kısaltmaktır (Tekcan Vd., 2011). Bu sayede, ürünün ömrü veya performansıyla ilgili analiz verileri hızlı bir şekilde üretilir. Hızlandırılmış ömür testlerinde kullanılan başlıca stres, zaman içinde ürünün performansını kademeli olarak düşüren herhangi bir kaynak olabilir. Bunlar, sıcaklık (yüksek, düşük, döngüsel), titreşim (rastgele, sinüzoidal, şok), nem, güneş radyasyonu gibi çevresel stres türleri veya voltaj, akım, mekanik (sürtünme, gerginlik, sıkıştırma) gibi kullanıma bağlı stres türleri olabilir. Buna bağlı olarak performans kriteri, direnç, çıkış gücü, amplifikasyon, ışık şiddeti, kaçak akım, mekanik mukavemet, malzeme kaybı, korozyon tabakasının kalınlığı, renk gibi ürün performansını gösteren herhangi ölçülebilir bir büyüklük olabilir. ALT, komple lityum iyon pil sistemlerinin (Chiodo Vd., 2016), güç elektroniği düzeneklerinin (Bormanis ve Ribickis, 2018) ve akıllı elektrik sayacının (Qi Vd., 2011) ömür değerlendirmesi için kullanılmıştır. Bu çalışmada ise karbon emisyonlarını ve yakıt tüketimini azaltmayı hedefleyen hibrit elektrikli araç teknolojisi ALT'ye tabi tutulmuştur.

Bu çalışma, otomotivde kullanılan elektrikli güç sistemlerinin ömür testleri için temel oluşturmayı amaçlamaktadır. Çalışmada öncelikle hafif hibrit güç sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 2'de kullanılan yöntem açıklandıktan sonra Bölüm 3'de geliştirilen test standı ve fonksiyonel test çevrimi detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Arrhenius yöntemiyle yapılan hızlandırılmış test ve sonucu Bölüm 4'de verilmiştir.

2. Hafif Hibrit Araç Güç Sistemleri

Şehir içi toplu taşıma, hibritleşme ve elektrifikasyonun sunduğu imkanlara ihtiyaç duyan alanlardan biridir. Küresel şehir içi otobüs filosunun yaklaşık 3 milyon adet olduğu tahmin edilmektedir (Bloomberg, 2018). 2015 yılında 9 metreden uzun şehir içi otobüsleri içeren küresel ağır hizmet toplu taşıma otobüslerinin pazar büyüklüğü 111000 adede ulaşmıştır. Bu büyüklüğün %17'sini (18900 adedini) hibrit veya elektrikli otobüsler oluşturmaktadır.

Hibrit elektrikli araçlar (Hybrid electric vehicle, HEV) geleneksel bir araç gibi içten yanmalı bir motora (Internal combustion engine, ICE) ve elektrikli bir araç (Electric vehicle, EV) gibi bir elektrik motoruna sahiptir. Hibrit araçlar, tekrar şarj edilebilir enerji saklama sistemleri (rechargeable energy storage system, RESS) menzil ve maliyet sorununu halledene kadar “geçiş modeli” niteliğindedir. Elektrikli araçlar otomotiv dünyasının geleceği olarak görülmektedir (Özbay Vd., 2020).

HEV aktarma organ topolojileri, seri, paralel ve karma hibrit olarak adlandırılan üç ana kategoride sınıflandırılır. Seri hibrit topolojide, bir elektrik motoru aracı tek başına hareket ettirir. ICE, yalnızca gerektiğinde fosil yakıtı elektrik enerjisine dönüştürmek için çalışır. ICE'nin aktarma organlarına doğrudan katkısı yoktur. Paralel hibrit topolojide, ICE ile elektrik motoru, aracı ayrı ayrı veya birlikte hareket ettirebilecek şekilde bağlanır. Araç yüksek hızlara ulaştığında ICE, güç talebini karşılar. Sürücünün güç gereksinimine bağlı olarak, elektrik motoru, ICE'nin yeterli olmadığı durumlarda araca ek güç sağlar. Anlık yüksek güç gereksinimleri durumunda, elektrik motoru ve ICE, aracı birlikte hareket ettirmek için çekiş sağlayabilir. Bu nedenle güç yönetimi, seri hibrit araçlardan daha karmaşıktır. Karma (seri-paralel) hibrit topolojide, ICE ve elektrik motoru, paralel hibrit araçlarda olduğu gibi aracı ayrı ayrı veya birlikte hareket ettirebilir. Ayrıca ICE, seri hibrit araçlarda olduğu gibi aktarma organlarına doğrudan katkı sağlamadan fosil yakıtı elektrik enerjisine dönüştürmek için generator gibi çalışabilir. Karma hibrit araçların güç yönetimi, paralel hibrit araçlardan daha karmaşıktır.

Hibrit araçlar için bir diğer sınıflandırma ise elektrik gücünün kabiliyetini gösteren “hibritleşme” oranıdır. Piyasadaki hibritler arasında, Tablo 2’de gösterilen mikro, hafif ve tam ve plug-in gibi farklı hibridizasyon seviyeleri vardır. Mikro hibrit modellerin çoğu, dur-kalk ve rejeneratif frenleme işlevlerine sahiptir. Hafif ve tam hibritler, ilave olarak araç tahrikine yardımcı olur (sürüş destek modu). Yalnızca tam hibrit araçlar, aracı tek başına tahrik etme yeteneğine sahiptir (elektrik modu). Plug-In hibrit araçlar (PHEV) ise tam hibrit özelliklere ilave olarak maliyeti daha düşük olan şebeke enerjisiyle de şarj olma özelliğine sahiptir (Terzi Vd., 2020).

Son yıllarda, düşük batarya gereksinimi sebebiyle hafif hibrit sistemlerin göreceli az maliyeti, birçok şehir içi otobüs üreticisinin dikkatini çekmiştir. Hafif hibrit sistem, tam hibrit araca doğru kısmi bir adım olarak düşünülebilecek paralel bir topolojidir. Bir enerji depolama sistemi (48V süper kapasitörler veya lityum iyon pil), düşük güce sahip (toplam araç gücünün %20 sini aşmayan) entegre bir elektrikli makinesi ve güç elektroniği (sürücü/invertör) kullanılarak tasarlanır.

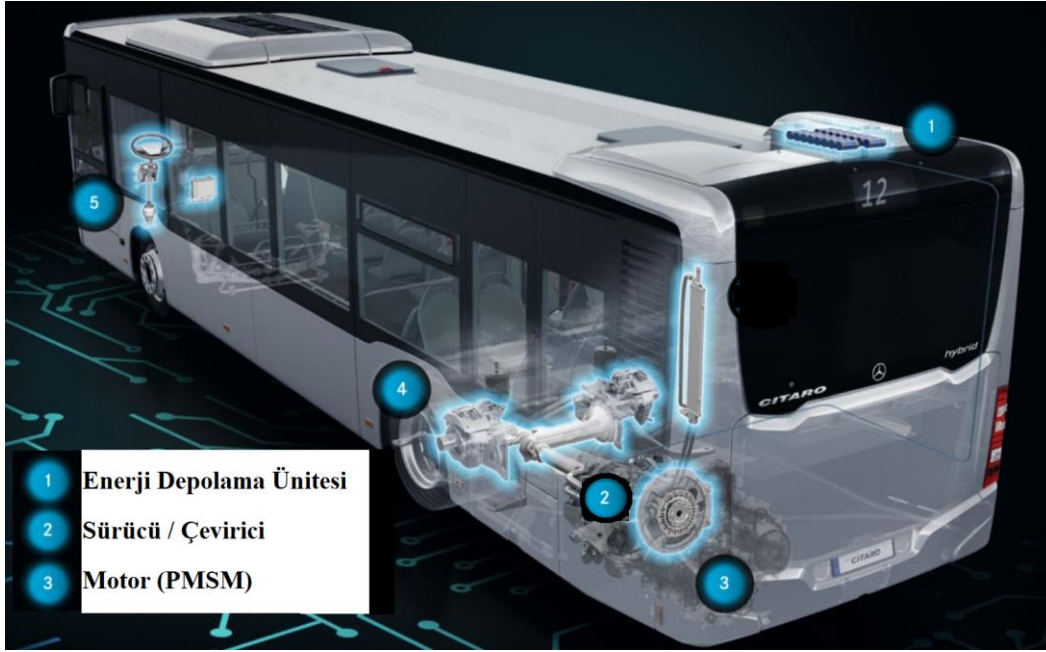
Tablo 2. Araçların hibritleşme oranı

Hibrit Fonksiyonlar	Mikro Hibrit	Hafif Hibrit	Tam Hibrit	PlugIn Hibrit
Stop-start özelliği	✓	✓	✓	✓
İlave yüklerin elektrifikasyonu	✓	✓	✓	✓
Rejeneratif mod	✓	✓	✓	✓
Sürüş destek modu		✓	✓	✓
Elektrik sürüş modu			✓	✓
Dışarıdan şarj imkanı				✓

Birçok otobüs üreticisi için hafif hibrit sistem, mevcut modelleri daha az geliştirme bütçesi ile modern teknolojilere uyarlama için makul bir seçenektir. Bu uyarlamalardan biri, daha düşük tüketim, hızlı amortisman, basit sürüş teknolojisi, düşük ağırlık ve az yer kaplamayı hedefleyen Mercedes Citaro hafif hibrit teknolojisidir. Citaro şehir otobüsünün hafif hibrit sistemi Şekil 3’de gösterilen üç ana parçadan oluşur; ICE ve şanzıman arasına entegre edilmiş disk şeklinde bir elektrikli makine, entegre sürücü/çevirici (driver/ inverter) ve enerji depolama (mild hybrid storage, MHS) birimidir. Sabit mıknatıslı senkron motor (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) olan elektrik makinesinin gücü 14 kW olup 220 Nm’ye kadar tork sağlayabilmektedir. Citaro hibrit topolojisi basittir; disk şeklindeki ve sağlam yapıya sahip elektrik motoru, ICE ile otomatik şanzıman arasına entegre edilmiştir. Citaro hafif hibrit, otobüsün yavaşlaması sırasında jeneratör görevi görür, fren pedalına basıldığında ve gaz pedalına basılmadığında sürüklenme enerjisini (coasting energy) elektrik enerjisine dönüştürür ve depolar. Hibrit teknolojisi olmadan, geri kazanılan bu enerji ısı enerjisi olarak çevreye salınmış olacaktı. Sürücünün fren talebi, pedal açısı sensörü tarafından algılanır ve rejeneratif fren sistemi kontrol ünitesine iletilir. Rejeneratif fren sistemi kontrol ünitesi, güç elektroniği kontrol ünitesi ile sürekli iletişim kurar ve fren torkunu talep eder. Güç elektroniği kontrol ünitesi, rejeneratif olarak ne kadar frenleme torkunun geri kazanılabileceğini ilişkin sinyalleri rejeneratif fren sistemi kontrol ünitesine iletir. Hibrit teknolojisi aynı zamanda otobüsün hızlanması sırasında motor gibi çalışarak gaz pedalına basıldığında depolanmış enerjiyi mekanik güce dönüştürür. Desteklenen içten yanmalı motor kalkışta daha az güç üreterek yakıt tasarrufu sağlar. Bu, yanmalı motorun verimliliğini artırarak yakıt tüketimine ve dolayısıyla emisyonların azalmasına katkıda bulunur (Mercedes Citaro).

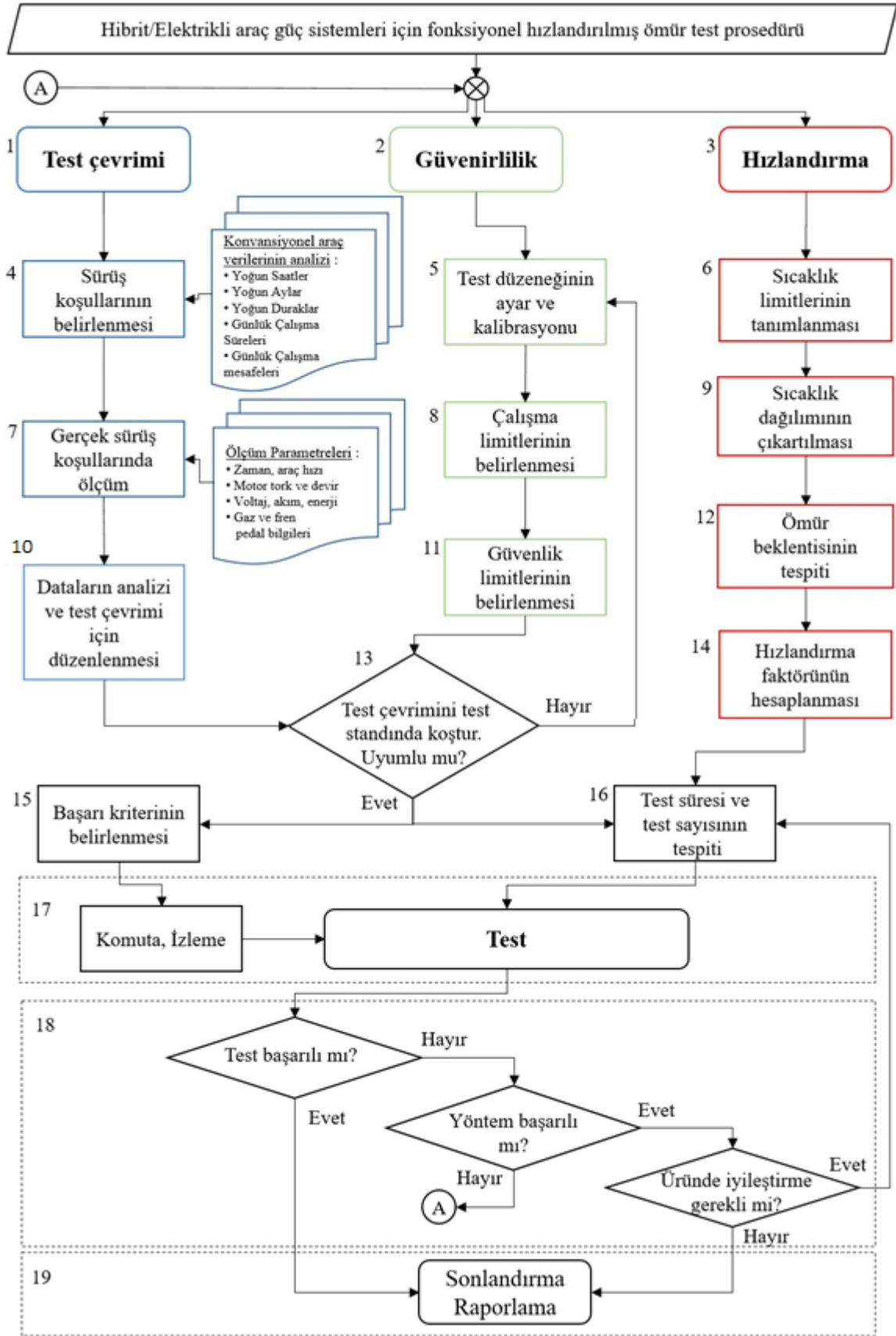
3. Kullanılan Yöntem

Hafif hibrit araçların elektrikli güç sistemleri için fonksiyonel hızlandırılmış ömür test prosedürü Şekil 4 de verilmiştir. Bu prosedür ömür testinde kullanılacak çevrim (1), güvenilirlik süreçleri (2) ve hızlandırma sürecinden (3) oluşmaktadır. Güvenirlik süreçleri (2) test düzeneğinin tekrarlanabilir ve arzu edilen biçimde çalışması için gereken asgari tebdirleri ihtiva eder. Bunlar, test düzeneğinin ayar ve kalibrasyonu (5), çalışma limitlerinin (8) ve güvenlik limitlerinin belirlenmesidir (11).



Şekil 3. Citaro şehir otobüsünün hafif hibrit sistemine ait üç ana parçası (Citaro)

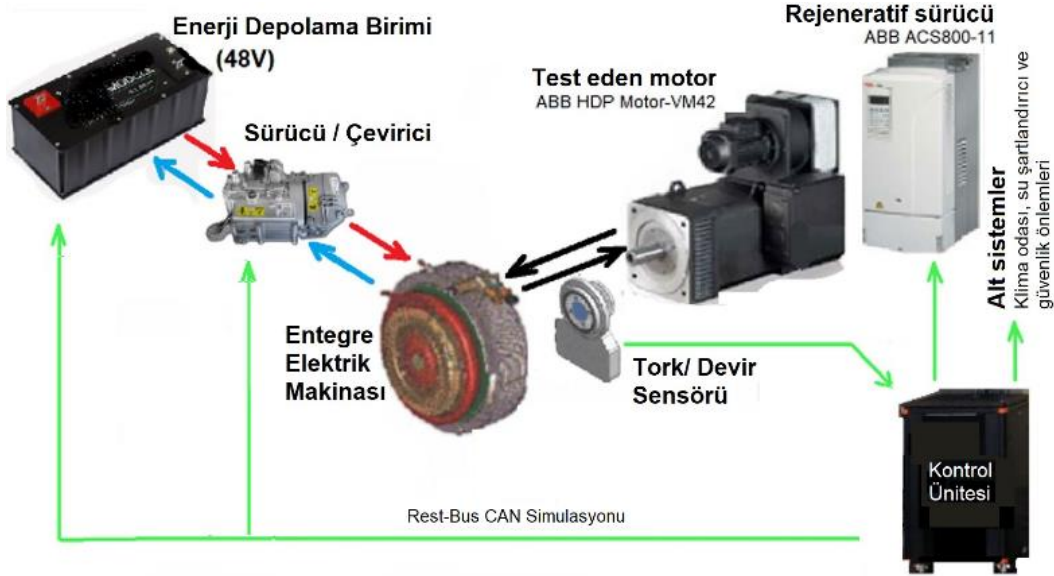
Testin üzerinde gerçekleştirildiği ve metodolojinin uygulandığı düzeneğin (mekanik, elektrik, yazılım ve kontrol ünitelerinin) bir bütün halinde uygun çalıştığından ve bunun çalışma süresince bozulmadığından emin olunmalıdır. Gerekli hallerde periyodik kontrol ve kalibrasyon adımları planlanmalıdır. Çalışma limitlerinin (aşırı devir, aşırı hız, aşırı ısı, düşük gerilim veya elektrik kesintisi, muhtemel hata durumlarının) tespiti ve bu durumlardaki sistem tepkisi (uyarı, stop) belirlenmelidir (8). Benzer şekilde, güvenlik limitlerinin (acil durum butonu, kapalı alan ihlali) tespiti ve bu durumlardaki sistem tepkisi (uyarı, stop) belirlenmelidir (11). Araç üzerindeki parçaların gerçek hayat şartlarında maruz kaldığı kullanım şartları ülke ve müşteri bazında değişkenlik arz etmektedir. Bu şartların tespiti için hedef pazara ait araç tipi, iklim ve atmosfer şartları, hız, devir, ivme gibi sürüş tercihleri, yol topolojisi ve yük durumu gibi gerçek sürüş koşulları (1) belirlenmelidir. Test şartlarının gereğinden yumuşak olması testin zorlayıcılık özelliğini ortadan kaldırırken, gereğinden fazla sert olması da sahada oluşmayacak hataların test esnasında oluşmasına neden olacaktır. Bu yüzden hedef pazara ait koşulların ve sürüş tercihlerinin (4) belirlenmesi önem arz etmektedir. Tespit edilen gerçek sürüş koşullarında hibrit güç sistemlerinin performansı (akım, gerilim, devir, tork, güç, sıcaklık gibi asli parametreler) ölçülmelidir (7). İstatiksel yöntemlerle uzun süreli sürüş verilerinden temsili bir test çevrimi yerine uygunluğuna karar verilmiş bir iklim ve etaba ait sürüşün tamamını veya bir kesitini test çevrimi olarak kullanmak mümkündür. Bu sayede, gerçek sürüş koşullarını yansıtan fonksiyonel bir test çevrimi elde edilir (10). Ancak bu test çevriminin hedef araç tipi ve hedef pazarın ihtiyaçlarına cevap verdiğinden emin olunmalıdır. Hibrit/elektrikli araçların güç sistemleri fonksiyonel test çevrimi ile test düzeneğinde çalıştırılmalı ve performansı ölçülerek yol testindeki performansıyla karşılaştırılmalıdır (13). Bu iki performans arasında kabul edilebilir seviyeden daha yüksek bir fark varsa 5 nolu adıma geri dönmelidir. Bu test çevrimi ile yapılacak bir ömür testi uzun süre alacağından hızlandırma prosedürü uygulanır. Burada, normal şartlar altında maruz kalınan sıcaklığı ömür testi için artırarak testin daha kısa bir sürede tamamlanması öngörülmüştür. Teste konu olan sistem ve parça sıcaklık limitlerinin tanımlanması (6) ve hedef pazar için sıcaklık dağılımının çıkartılması (9) gerekmektedir. Ayrıca, ürünün ömür beklentisi (12), başarı kriteri ve güvenilir bir testin kaç numune sayısı ile gerçekleştirileceği (test yeter sayısı) tespit edilmelidir (16). Bu üç bilginin (6, 9 ve 12) netleştirilmesiyle, hızlandırma faktörü Arrhenius yöntemi ile hesaplanır (14). Böylelikle testin ne kadar kısaltılacağı ve hızlandırılmış ömür testinin ne kadar süreceği ortaya çıkarılır (16). Test çevrimi (1), güvenilirlik (2) ve hızlandırma (3) süreçlerinin tamamlanmasıyla teste başlanılır. Test süresince izleme, ihlal, ikaz ve kontrol gerçekleştirilir (17). İlk numune testinden sonra yöntemin başarısı sorgulanır. Testin yöntemiyle ilgili bir sıkıntıda test süreci tekrar gözden geçilir. Yöntem başarılıysa test kanaat oluşturacak sayıda tekrar edilir. Ürünün iyileştirme ihtiyacı varsa test tekrarı planlanır, yoksa test süreci sonlandırılıp, raporlama yapılır.



Şekil 4. Hibrit/Elektrikli araç güç sistemlerinin ömür testinde kullanılan prosedür

4. Test

Bu çalışmada hafif hibrit güç sisteminin ömür testi yapabilmek için test düzeneği (test standı) geliştirilmiştir. Test standı, dinamik mekanik yük, devir, elektrik gücü, yüksek ortam sıcaklığı, ısıtma/soğutma ve CAN-Bus simülasyonu gibi gerçek dünya koşullarını sağlayabilmektedir. Bu test standı ile, hibrit güç sisteminin muhtemel hataları erken aşamada tespit edilerek, zaman ve maliyet avantajı sağlayacaktır. Geliştirilen test standının fiziksel diyagramı Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Hafif hibrit test sistemin fiziksel diyagramı

Hafif hibrit test standı şu alt sistemlerden oluşmaktadır:

- Kontrol ünitesi
- Test motoru ve rejeneratif sürücüler
- Tork-devir sensörleri
- Harici su şartlandırıcı (Chiller)
- İklim odası

A. Kontrol ünitesi: Ana kontrol ünitesi, test standının merkezi komuta sistemi olarak işlev görür. Önceden tanımlanmış test dizilerini çalıştırır ve gerçek zamanlı günlük kayıt yapar. Intel i7 CPU ve farklı tipte çevre birimlerine sahip endüstriyel bir PC'dir (MpiCON). Ana kontrol parametresi olan motor devir sinyali (test çevrimi), kontrol ünitesi tarafından test motorunun rejeneratif sürücüsüne gönderilir. Test edilen hafif hibrit veya test sisteminden gelen hata sinyalleri kontrol ünitesi tarafından izlenerek uyarı verilmesi veya gerekirse testin durdurulması sağlanır. Klima odası, su şartlandırıcı ve güvenlik önlemleri gibi alt sistemler de kontrol ünitesi tarafından kontrol edilmektedir. Test standını kontrol etmenin yanında, anlık değerleri görmeyi ve alarm durumlarını izlemeyi sağlayan kontrol yazılımına sahiptir. Bu yazılıma ait arayüz Şekil 6 da gösterilmiştir.

B. Test motoru ve rejeneratif sürücü: İçten yanmalı motoru simüle etmek için, entegre elektrikli makinenin ters yönünde çalışan bir test motoru ve onun rejeneratif sürücüsü kullanılmıştır. Gerçek tork ve anlık devri izlemek için test eden ile test edilen motorlar arasında bir tork/devir sensörü yerleştirilmiştir. Bu sayede, gerçekleşen değerleri görmek, kalibre etmek mümkün hale gelmektedir. Test motoru olarak yüksek dinamik performansa sahip ABB HDP Kare Kafesli Motor-VM42 H132 kullanılmıştır. Maksimum hızı 8000 rpm'e ve maksimum gücü 42 kW'a ulaşan test motoru, test edilen motora uygun olarak 1500 rpm'de 274 Nm sağlayabilmektedir (ABB HDP Series motor). Test motorunun sürücüsü olarak, kompakt halde duvara monte edilebilen bir rejeneratif sürücü olan ABB ACS800-11 55KW kullanılmıştır (ABB ACS800 driver). Rejeneratif sürücü ile, enerji şebekeye geri beslendiği için mekanik veya dirençli diğer frenleme yöntemlerine kıyasla önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanmıştır.



Şekil 6. Kontrol yazılımının arayüzü

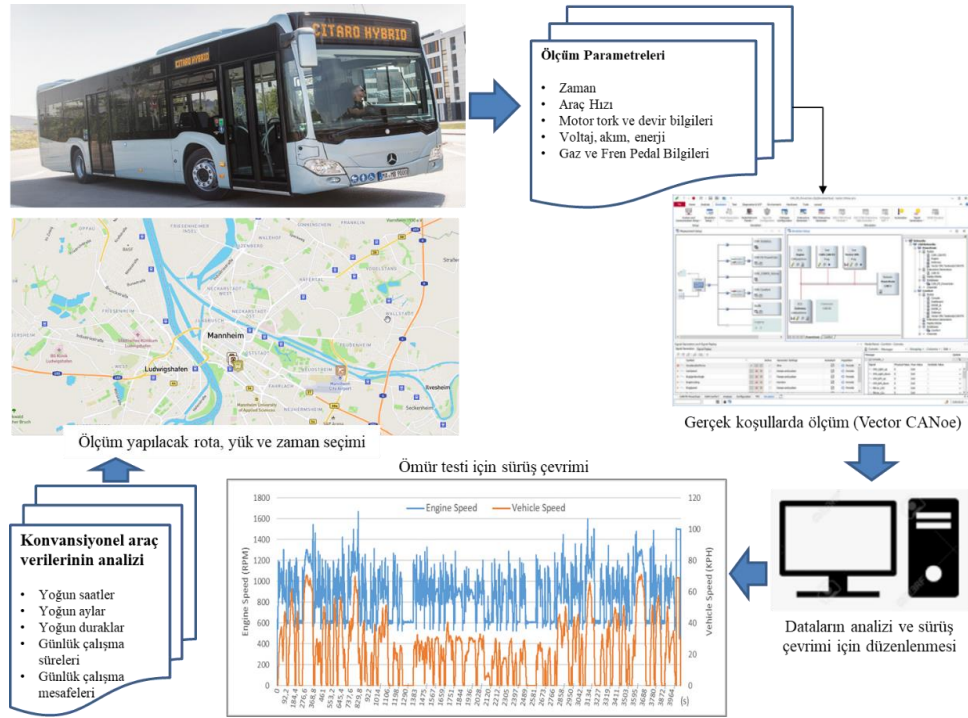
C. İklimlendirme odası: Test edilen cihazın ortam sıcaklığını istenilen seviyede tutmak için iklimlendirme odası kullanılmıştır. Oda, aynı anda iki numunenin testine olanak sağlayan 640 cm³ hacimli izole duvarlara sahiptir. Toplam 15 kW rezistif tip ısıtıcılar, solid-state röle ile kontrol ünitesi tarafından kontrol edilmektedir. Kontrol ünitesi ayrıca gerektiğinde aşırı ısıyı dışarı aktarmak için odanın çatısında bulunan iki klape motorunu ve yeterli ısı dağılımı için bir sirkülasyon fanını kontrol eder. Oda sıcaklığı kontrol ünitesi tarafından izlenmektedir.

D. Harici su şartlandırıcı (Chiller): Hafif hibrit test standından bağımsız olarak, soğutma suyunun sıcaklığını istenildiği seviyede tutmak için yüksek kapasiteli bir chiller kullanılmıştır. Soğutma suyunun su akışı, LIN iletişimi aracılığıyla hafif hibrit sistem tarafından düzenlenir. Soğutma suyunun sıcaklığı ve debisi, herhangi bir arıza durumunda uyarı vermek veya testi durdurmak için kontrol ünitesi tarafından izlenmektedir.

E. Güvenlik önlemleri: Test boyunca sürdürülebilir güvenliği sağlamak için acil durum butonu, güvenlik çit panel ihlali elektriksel olarak kontrol ünitesi tarafından izlenerek uyarı vermesi ve herhangi bir arıza durumunda testi durdurması sağlanmıştır. Ayrıca Vector tarafından geliştirilen CANoe aracılığıyla test standındaki elektronik kontrol ünitelerinin kalibrasyonu ve hata teşhisi yapılmıştır (Vector CANoe).

4.1. Fonksiyonel Sürüş Çevrimi

Dayanım ve ömür testlerini yapabilmek için “standardize edilmiş temsili araç sürüş şablonu” olarak tarif edilen sürüş çevrimlerinden faydalanılır. Sürüş çevrimlerinin dar bir zaman aralığında (genelde bir saatten daha az), hedef araç ve yol şartı için geçerli olan gerçek sürüş şartlarını en iyi şekilde temsil etmesi istenir. Bir çevrim ya yapay olarak üretilir ya da gerçek verilere dayanır. Bu, bir çevrim için hazırlanış sürecinde karar verilen bir kriterdir. Yapay (modal) çevrimler teorik olarak çeşitli modlarla oluşturulan çevrimlerdir. NEDC (Avrupa) ve 10-15 mod (Japonya) gibi çevrimler suni olarak üretildiği için ivmelenme karakteristikleri gerçek sürüş koşullarında olmayacak kadar düzdür. FTP (Amerika), Artemis, Hyzem (Avrupa’daki gayri resmi çevrim) ve WLTP gibi gerçek çevrimler ise gerçek sürüş verilerinin kullanılması ile oluşturulmuştur. Bu çevrimler sentetik çevrimlere göre daha dinamiktir ve bu çevrimler sayesinde yapay çevrimlere göre gerçeğe daha yakın emisyon değerleri ölçülür (Korkmaz Vd., 2019). Sürüş çevrimlerinin bir diğer avantajı hibrit/elektrikli araçların tasarımı ve testlerine olanak tanımasıdır. Daha önceleri sadece yakıt ve emisyon testleri için kullanılan sürüş çevrimleri, son yıllarda yapılan çalışmalarda batarya kapasitesi, elektrik motorunun gücü gibi kritik parametrelerin tayini için de kullanılmaya başlanmıştır. Geller ve Bradley, araç tasarımında sürüş çevrimlerinin optimizasyon üzerindeki etkisini nicel olarak anlamayı ve minimum simülasyon ile sağlam araç tasarımına yol açabilecek sürüş çevrimlerini belirlemeyi amaçlayan bir çalışma yapmıştır (Geller Vd., 2015).



Şekil 7. Fonksiyonel sürüş çevrimi ve elde etmek için kullanılan yöntem

Karabasoglu ve Michalek, sürüş modellerinin hibrit ve plug-in elektrikli araç güç aktarma organlarının yaşam döngü maliyeti ve emisyonları üzerindeki etkisini incelemiştir (Karabasoglu ve Michalek, 2013). Schwarzer ve Ghorbani, oluşturdukları yöntemle elektrikli araçların tasarım ve kontrol algoritmalarının iyileştirmesini yapmıştır (Schwarzer ve Ghorbani, 2013). Zaccardi ve Le Berr, 18 farklı sürüş çevrimini elektrikli araçların performans analizi için karşılaştırmıştır (Zaccardi ve Le Berr, 2013). Carlson ve arkadaşları FTP-72 çevrimini kullanarak sert sürüş stilinin paralel ve karma PHEV modelleri üzerindeki etkisini incelemiştir (Carlson Vd., 2009). Kaymaz ve arkadaşları İstanbul Metrobüs hattı için bir sürüş çevrimi oluşturmuş ve bununla hattın hibritleşme/elektrifikasyon potansiyelini incelenmiştir (Kaymaz Vd., 2019).

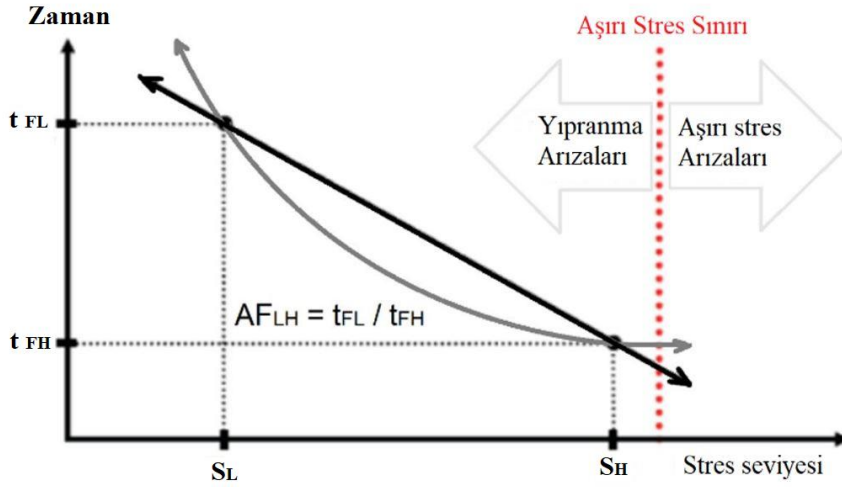
Çalışmada yapay bir test çevrimi yerine gerçek sürüş koşullarında elde edilen veriler kullanılmıştır. Gerçek sürüş koşullarının tespiti için hafif hibrit prototip bir otobüsten veri alınmıştır. Alınan veri (ölçüm) öncesinde bölge (topoloji), zaman (iklimsel/dönemsel farklar, trafik ve yolcu yoğun saatler), sürüş stiline (sert, normal veya yumuşak kullanım) seçimi önemlidir. Ölçümde elde edilen veri seti analiz edilerek, trafik sebebiyle aşırı bir duruş varsa -test verimini arttırmak için- çıkartılır ve stant üzerinde koşuturur. Stant, gerçek sürüş koşullarıyla karşılaştırılarak doğrulanır ve elektriksel büyüklükler açısından kabul edilebilir farklar oluşana değin stant kalibrasyonu ve doğrulama işlemine tekrar edilir. Mannheim şehir sürüşü (SSM) için alınan gerçek sürüş grafiği ve elde etmek için kullanılan yöntem Şekil 7 de verilmiştir.

4.2. Hızlandırılmış Ömür Testi

Hızlandırılmış ömür testlerinin (ALT) amacı, ürünün normal kullanım koşullarında maruz kaldığı stres seviyesini artırarak hata yapma süresini kısaltmaktır. Erken kayıp veya erken arızalar hariç, test sırasında meydana gelen arızalar Şekil 7 de gösterildiği gibi yıpranma ve aşırı stress arızaları olarak ikiye ayrılır. Aşırı stress arızaları zamandan bağımsız arızalardır, yıpranma arızaları ise zamana bağlıdır. Bu nedenle, yalnızca yıpranma arıza mekanizmaları hızlandırılabilir. Hızlandırılmış ömür testleri her zaman ürünün “kabul edilebilir stress sınırları” içinde yapılmalıdır.

ALT için hesaplama yöntemlerinden biri Arrhenius modelidir. Bu model, sıcaklık artışı nedeniyle hızlandırma artışını tahmin etmekte kullanılır. Arrhenius modeli, kimyasal reaksiyonlara, difüzyon veya geçiş (migration) süreçlerine bağlı hata mekanizmaları için başarıyla kullanılmıştır. Bu sayede, elektronik ekipman arızasına neden olan mekanik harici (veya dayanımsal olmayan) arıza modlarının

çoğunu hızlandırmak mümkündür (NIST/Sematech, 2013). Arrhenius hızlanma faktörü (AF_{LH}), Şekil 7'de gösterildiği gibi iki farklı stres seviyesindeki (S_L , S_H) arıza süreleri (t_{FL} , t_{FH}) arasındaki orandır.



Şekil 7. Hızlandırılmış ömür testlerinin temel prensibi

Bu çalışmada, yüksek sıcaklık bir stres kaynağı olarak kabul edilmiş ve Eş. 1'de verilen Arrhenius modeli ile hızlandırma faktörü hesaplanmıştır:

$$AF_{LH} = \frac{t_{FL}}{t_{FH}} = \frac{A_t \cdot e^{\frac{E_a}{k \cdot T_L}}}{A_t \cdot e^{\frac{E_a}{k \cdot T_H}}} = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_H} \right)} \quad (1)$$

- AF_{LH} = Hızlandırma Faktörü
- T_L = Düşük sıcaklık [K]
- T_H = Yüksek sıcaklık [K]
- t_{FL} = Düşük sıcaklıktaki hata zamanı
- t_{FH} = Yüksek sıcaklıktaki hata zamanı
- E_a = Aktivasyon enerjisi [eV] = 0.45 eV
- k = Boltzmann sabiti = $8.617 \cdot 10^{-5}$ [eV/K]
- T_{TEST} = Test sıcaklığı [$^{\circ}$ C]
- T_{FIELD} = Hedef bölgenin sıcaklığı [$^{\circ}$ C]
- P_{FIELD} = Hedef bölge sıcaklığının dağılımı [%]

Genel olarak, her yıpranma mekanizmasının kendine özgü bir aktivasyon enerjisi vardır. E_a ne kadar yüksek olursa, hızlanma faktörü ve dolayısıyla artan sıcaklığa duyarlılık o kadar yüksek olur. Elektronik ve mekanikte gözlenen yıpranma mekanizmaları için tipik aktivasyon enerjileri 0,3 eV ila 1,3 eV aralığındadır (Kentved, 2011). Bu çalışmada E_a , Mercedes-Benz Company Standard'daki referansla aynı olarak 0,45 eV alınmıştır (MBN, 2013).

İklimi daha soğuk olan bir şehrin seçilmesi hızlanma faktörünü yükseltir ve test süresini kısaltır. Bu nedenle, tablo 2'de sıcaklık dağılımı verilen İspanya Madrid, hedef pazar ihtiyacı açısından kötü durum senaryosu olarak seçilmiştir. Hafif hibrit güç sisteminin soğutma sisteminin sıcaklık dağılımı için T_{FIELD} değerine 23,3 C eklenmiştir. Soğutma sıvısının müade edilen en yüksek sıcaklığı, test edilen hafif hibrit sistem için 85 $^{\circ}$ C olmasına rağmen, sistemin performans kaybı 80 $^{\circ}$ C'de başladığından hızlandırılmış ömür testi 74 $^{\circ}$ C'de (T_{TEST}) gerçekleştirilmiştir. T_L ve T_H değerleri Eş.2 ve Eş.3'e göre hesaplanmıştır.

$$T_L = T_{FIELD} + 23,3 + 273,15 \text{ in K} \quad (2)$$

$$T_H = T_{TEST} + 273,15 = 74 + 273,15 = 347,15 \text{ K} \quad (3)$$

$$AF_{LH_OVERALL} = 1 / \sum (P_{FIELD} / AF_{LH}) \quad (4)$$

Tablo 3’de görüldüğü gibi, çalışma sırasında farklı zaman dilimlerinde farklı sıcaklıklar meydana gelmektedir. Sıcaklığın (AF_{LH_TOPLAM}) genel hızlanma faktörü, Eş. 4’te verildiği gibi tüm hızlanma faktör dağılımlarının toplamı olarak tanımlanır.

Hafif hibrit güç sisteminin etrafındaki klima odası ortam sıcaklığı, aynı hızlanma faktörünü elde etmek için ömür testi boyunca 124 °C’ye ayarlanmıştır.

Tablo 3. Sıcaklık adımları için hesaplanmış hızlandırma faktörü

T_{FIELD} (°C)	P_{FIELD} (%)	T_L (K)	T_H (K)	AF_{LH}	Ağırlıklı AF_{LH}
-6,50	0,05	289,95	347,15	19,44	0,000025
-5,50	0,15	290,95	347,15	18,28	0,000079
-4,50	0,08	291,95	347,15	17,19	0,000047
-3,50	0,10	292,95	347,15	16,17	0,000060
-2,50	0,24	293,95	347,15	15,22	0,000159
-1,50	0,21	294,95	347,15	14,33	0,000146
-0,50	0,50	295,95	347,15	13,50	0,000370
0,50	0,76	296,95	347,15	12,72	0,000596
1,50	1,24	297,95	347,15	11,99	0,001035
2,50	1,32	298,95	347,15	11,31	0,001169
3,50	2,16	299,95	347,15	10,67	0,002025
4,50	2,29	300,95	347,15	10,07	0,002273
5,50	3,22	301,95	347,15	9,50	0,003391
6,50	3,63	302,95	347,15	8,98	0,004039
7,50	3,96	303,95	347,15	8,48	0,004674
8,50	3,95	304,95	347,15	8,02	0,004925
9,50	4,14	305,95	347,15	7,58	0,005463
10,50	4,50	306,95	347,15	7,17	0,006270
11,50	3,71	307,95	347,15	6,79	0,005462
12,50	3,74	308,95	347,15	6,42	0,005821
13,50	3,72	309,95	347,15	6,08	0,006121
14,50	3,72	310,95	347,15	5,76	0,006461
15,50	3,84	311,95	347,15	5,46	0,007025
16,50	3,50	312,95	347,15	5,18	0,006757
17,50	3,63	313,95	347,15	4,91	0,007389
18,50	3,16	314,95	347,15	4,66	0,006786
19,50	3,06	315,95	347,15	4,42	0,006932
20,50	3,08	316,95	347,15	4,19	0,007342
21,50	2,63	317,95	347,15	3,98	0,006599
22,50	2,84	318,95	347,15	3,78	0,007502
23,50	2,80	319,95	347,15	3,59	0,007806
24,50	2,66	320,95	347,15	3,41	0,007788
25,50	2,69	321,95	347,15	3,25	0,008291
26,50	2,68	322,95	347,15	3,09	0,008666
27,50	2,34	323,95	347,15	2,94	0,007957
28,50	1,93	324,95	347,15	2,79	0,006920
29,50	2,14	325,95	347,15	2,66	0,008058
30,50	2,03	326,95	347,15	2,53	0,008017
31,50	2,14	327,95	347,15	2,41	0,008885
32,50	1,43	328,95	347,15	2,30	0,006240
33,50	1,64	329,95	347,15	2,19	0,007504
34,50	1,03	330,95	347,15	2,09	0,004939
35,50	0,60	331,95	347,15	1,99	0,002994
36,50	0,47	332,95	347,15	1,90	0,002461
37,50	0,15	333,95	347,15	1,81	0,000800
38,50	0,10	334,95	347,15	1,73	0,000559

$$AF_{LH_TOPLAM} = 4,65$$

Min. Beklenen Çalışma Ömrü (saat) = 40000 h

Hızlanma Faktörü ($AF_{LH_OVERALL}$) = 4,65

Hızlandırılmış Ömür Test Süresi = 8608 h

Bölüm 3’de verilen yöntem uygun olarak gerçek kullanım şartlarından elde edilen test çevrimi ile koşturulan hafif hibrit güç aktarım organlarının ömrü testi Arrhenius denklemi sayesinde 4,65 kat hızlandırılmış, saha için öngörülen 40000 saat çalışma ömrü 8608 saat olarak test edilmiştir. Testler esnasında ortaya çıkan fonksiyonel hatalar, yazılım güncellemeleri ile giderilerek testler yeniden başlatılmıştır. Yeterli sayıda numunede başarıya ulaşılması üzerine testler sonlandırılmıştır.

5. Sonuç

Bu çalışmada, şehiriçi bir otobüse ait elektrikli motor, sürücü/inverter ve enerji depolama ünitesinden oluşan hafif hibrit sistem için ömür testi standı geliştirilmiştir. Daha önce belirtildiği gibi testlerin ana hedefi, ürüne ait muhtemel uyumsuzlukları yaşam döngüsünün erken aşamalarında ortaya çıkarmaktır. Otomotiv testlerinde kaynakların doğru kullanımı ancak “güvenilir”, “tekrarlanabilir”, “düşük maliyetli” ve “çevre dostu” testler sayesinde mümkündür. Geliştirilen ömür testi standında, “gerçek kullanım şartlarına dayalı test çevrimi” ve “Arrhenius yöntemi” sayesinde fonksiyonel hızlandırma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan şu özellikler ön plana çıkmaktadır :

1. Fonksiyonel test çevrimi : İstatiksel yöntemlerle, uzun süreli sürüş verilerinden temsili bir test çevrimi belirlemek yerine uygunluğuna karar verilmiş bir iklim ve etaba ait sürüş test çevrimi olarak kullanılmıştır. Bu sayede, sentetik bir çevrim yerine gerçek sürüş şartlarını yansıtan fonksiyonel bir test çevrimi elde edilmiştir.

2. Hızlandırılmış ömür test metodolojisinin kullanılması : Normal şartlar altında öngörülen ömür testinin 40000 saatte tamamlanması öngörülmüştü. Arrhenius yöntemi ile sıcaklık artırılarak testte hızlandırılmıştır. Böylelikle test süresi 4,65 kat hızlandırılarak ömür testi 8608 saatte tamamlanmıştır.

Bu şekilde, artırılmış güvenilirlik ve düşürülmüş test süresi sağlanmıştır. Sınırlı süre nedeniyle, uygulanan hızlandırılmış yöntemini farklı testler yaparak doğrulamak mümkün olmamıştır. Bunun yerine, uzun vadeli müşteri kullanım bulgusu ile karşılaştırma yapılacak ve -ilave bir görev olarak- sonuçlar ayrı bir çalışmada paylaşılacaktır.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Çalışma tek yazara aittir.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Istanbul fabrikasında gerçekleştirilen bu çalışma Mercedes Benz Türk tarafından desteklenmiştir. Yazar, bu çalışmanın yürütüldüğü Geliştirme departmanının desteğini büyük ölçüde kabul etmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

ABB HDP Series motor (t.y.), ABB Resmi web sitesi, Erişim : 11 Mart 2021.

<https://library.e.abb.com/public/bf34eb257bd6facdc1257b130056e9da/HDP%20Series%20AC%20Induction%20Servomotors-Rev12.pdf>,

ABB ACS800 driver (t.y.), ABB Resmi web sitesi, Erişim : 11 Mart 2021. https://library.e.abb.com/public/445b5e20e72624afc1257b2400493e68/EN_ACS800_11_HW_C_screen.pdf

Bloomberg (2018), *New Energy Finance report : Electric Buses in Cities, Driving Towards Cleaner Air and Lower CO2*, Bloomberg Finance L.P. Yayın tarihi 2018.

Bormanis O. ve Ribickis L. (2018), *Accelerated Life Testing in Reliability Evaluation of Power Electronics Assemblies*, 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2018, pp. 1-5.

Carlson, Lohse-Busch, Duoba, ve Shidore, (2009), *Drive cycle fuel Consumption variability of plug-in hybrid electric vehicle due to aggressive driving*, SAE Technical Paper, <http://papers.sae.org/2009-01-1335/>

Chiodo E., Lauria, Andrenacci N. ve Pede G. (2016), *Accelerated life tests of complete lithium-ion battery systems for battery life statistics assessment*, 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Anacapri, 2016, pp. 1073-1078.

Citaro (t.y.), Citaro Hybrid Technology, Erişim : 11 Kasım 2019, <https://landtransportguru.net/mercedes-benz-citaro-hybrid/>.

Dhillon B. S. (2006), *Maintainability, Maintenance and Reliability for Engineers*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.

Ebeling C. E. (1997), *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. New York, NY, USA: McGraw-Hill.

Gaonkar A., R. B. Patil, S. Kyeong, D. Das and M. G. Pecht (2021), *An Assessment of Validity of the Bathtub Model Hazard Rate Trends in Electronics*, in IEEE Access, vol. 9, pp. 10282-10290, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3050474.

Geller, B. M., ve Bradley, T. H., (2015), *Analyzing Drive Cycles for Hybrid Electric Vehicle Simulation and Optimization*. ASME. J. Mech. Des. Nisan; 137(4): 041401. <https://doi.org/10.1115/1.4029583>

ISO (t.y.) International Organization for Standardization, ISO 26262-1:2018, Road vehicles-Functional safety, Erişim : 17 Kasım 2021, <https://www.iso.org/standard/68383.html>.

Karabasoglu O., ve Michalek J., (2013), *Influence of driving patterns on life cycle cost and emissions of hybrid and plug-in electric vehicle powertrains*, Energy Policy, Sayı 60, Sayfa 445-461, ISSN 0301-4215, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.03.047>.

Kaymaz H., Korkmaz H., Erdal H., (2019), *Characteristic Driving Parameters of BRT Istanbul and Evaluation of Hybridization/ Electrification Potential*, 1. Uluslararası Akıllı Ulaşım Sistemleri Konferansı, 19-21 Nisan 2019, Bandırma

Kentved A. B. (2011) *Acceleration factors and accelerated life testing*, A guide based on practical experiences, SPM Report No:179, Scandinavia.

Korkmaz H., Kaymaz H., Erdal H., (2019), *Development of a driving cycle for Istanbul bus rapid transit based on real-world data using stratified sampling method*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 75, , Pages 123-135, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.023>.

MBN (2013), Mercedes-Benz Company Standard, General Requirements, *LV 124 Test Conditions and Tests for Electric and Electronic Components in Motor Vehicles Part 2: Environmental Requirements* (intern document)

Mercedes Citaro (t.y.), Mercedes Benz Citaro Hybrid Technology, Erişim : 01 Kasım 2021, https://www.mercedes-benz-bus.com/en_GB/models/citaro-hybrid/efficiency/hybrid-technology.html.

MpiCON (t.y.), Industrial Controllers, Erişim : 23 Kasım 2021, <https://mpicon.com/controller/industrial-controller/>

NIST/Sematech (2013). *e-Handbook of Statistical Methods, Department of Commerce, U.S.* <https://doi.org/10.18434/M32189>

OICA (t.y.) Uluslararası Motorlu Taşıt Üreticileri Birliği, Erişim: 11 Ocak 2022, <https://www.oica.net/>

Özbay, H. , Közkurt, C. , Dalcı, A. Tektaş, M. (2020). *Geleceğin Ulaşım Tercihi: Elektrikli Araçlar, Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi* , 3 (1) , 34-50. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jitsa/issue/53369/712337>

Qi B., Sun Y., Hu W. ve Ding X., (2011), *A multi-stress Accelerated Life Tests method for Smart Electricity Meter based upon the Life-Stress Model*, The Proceedings of 2011 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, Guiyang, 2011, pp. 1136-1140.12

Schwarzer V., ve Ghorbani R., (2013), *Drive cycle generation for design optimization of electric vehicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Sayı 62, Sayfa :89-97, <http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2012.2219889>

Tekcan A. T., Kahramanoğlu G., Yatır M. N., Kirişken B., Gündüzalp M. (2011), *Saha Geri Dönüş Oranını AR-GE Aşamasında İndikatör ile Tahmin Etme Yöntemi*, EMO Bilimsel Dergi, Cilt 1, Sayı 2, Syf 67-74, Aralık 2011

Terzi, U. K., İlhan, H. E., Kaymaz, H., Erdal, H., & Çalılık, H. (2020). *A Review of Commercial Electric Vehicle Charging Methods*, Promet-Traffic&Transportation, 32(2), 291-307.

Vector CANoe (t.y.), Erişim : 22 Nisan 2021, <https://www.vector.com/int/en/products/products-a-z/software/canoe/>

Zaccardi J. ve Le Berr F., (2013), *Analysis and choice of representative drive cycles for light duty vehicles - case study for electric vehicles*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Sayı 227 Sayfa 605-616, <http://dx.doi.org/10.1177/0954407012454964>