

EMERGENCY RESPONSE APPROACHES FOR ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES IN TURKEY

Orhan TOPAL

ABSTRACT

Electric and hybrid vehicles, which are increasingly used in traffic in daily life, pose a significant risk for possible traffic accidents. This fire risks originating from high voltage drive batteries due to mechanical deformations that may occur in accident situations involving electric and hybrid vehicles and/or sometimes in cases where adequate maintenance & repairmen processes cannot be operated. These risks are usually due to the exposure of the cells of the high voltage drive battery to a situation outside the defined operating range in terms of mechanical, thermal or electrical. These conditions cause the temperature to rise and therefore the battery cells to heat up. This temperature increase also accelerates unwanted chemical reactions in the cells, so causing higher temperature levels to be reached. It can be also induced the high voltage propulsion batteries to enter a self-reinforcing and unstoppable chemical reaction cycle. In a similar process, even the thermal runaway situation on the basis of only one cell causes thermal risks that can spread to all other modules and even affect the propulsion battery completely. It is known that this situation is among the main safety hazards for electric and hybrid vehicles.

Keywords: Emergency Response Methods in Electric and Hybrid Vehicles, Battery Fires in Electric and Hybrid Vehicles, Rescue Services

Dr., Aselsan A.Ş, Ulaşım, Güvenlik, Enerji ve Otomasyon Sistemleri Sektör Başkanlığı

Mail: otopal@aselsan.com.tr

 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3857-5689>

Makale Atıf Bilgisi: Topal, O. (2023). "Türkiye'de Elektrikli ve Hibrit Araçlar için Acil Müdahale Yaklaşımları". *Çevre, Şehir ve İklim Dergisi*. Yıl: 2. Sayı: 3. ss. 190-206.

Makale Türü: Araştırma
Geliş Tarihi: 16.10.2022
Kabul Tarihi: 30.11.2022
Yayın Tarihi: 31.01.2023
Yayın Sezonu: Ocak 2023

TÜRKİYE’DE ELEKTRİKLİ VE HİBRİT ARAÇLAR İÇİN ACİL MÜDAHALE YAKLAŞIMLARI

Orhan TOPAL

ÖZ

Günlük hayatta, trafikte kullanımı artan elektrikli ve hibrit araçlar, olası trafik kazaları için önemli bir risk teşkil etmektedir. Elektrikli ve hibrit araçların karıştığı kaza durumlarında meydana gelecek mekanik deformasyonlar nedeniyle ve/veya kimi zaman yeterli bakım & onarım süreçlerinin işletilemediği durumlarda, yüksek gerilim tahrik bataryalarından kaynaklı yangınlarla karşılaşılma riski bulunmaktadır. Söz konusu risk, genellikle yüksek gerilim tahrik bataryasına ait hücrelerin mekanik, termal veya elektriksel açıdan tanımlanan çalışma aralığının dışında bir duruma maruz kalmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumlar beraberinde sıcaklığının yükselmesine, dolayısıyla batarya hücrelerinin de ısınmasına yol açmaktadır. Bu sıcaklık artışı, hücrelerdeki istenmeyen kimyasal reaksiyonları da hızlandırarak daha yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşılmasına; sonrasında yüksek gerilim tahrik bataryalarında kendi kendini güçlendiren ve durdurulamaz bir kimyasal reaksiyon döngüsüne girmesine neden olmaktadır. Benzer bir süreçte yaşanacak, yalnızca bir hücre bazındaki termal kaçak durumu dahi diğer bütün modüllere sirayet edebilen, hatta tahrik bataryasını tamamen etkileyebilecek termal risklerle karşı karşıya kalınmasına neden olabilir. Bu durumun elektrikli ve hibrit araçlara esas başlıca güvenlik tehlikeleri arasında yer aldığı bilinmektedir. İşbu çalışma ile Türkiye’de elektrikli ve hibrit araçlara özel etkin ve yerinde acil müdahale ve kurtarma hizmetleri konusunda dikkat edilmesi gereken hususlar ve uygulanacak doğru yöntemler ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli ve Hibrit Araçlarda Acil Müdahale Yöntemleri, Elektrikli ve Hibrit Araçlarda Batarya Yangınları, Kurtarma Hizmetleri

Giriş

Avrupa Birliği'nin ilgili standartlarından olan EU (2019/631) regülasyonu doğrultusunda 2020 yılından itibaren, yeni üretilen otomobiller için ortalama emisyon değerinin 95 g CO₂/km olarak belirlendiği, bu değer kademeli olarak 2030 ve 2050 yılını esas alan %100 sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda daha düşük seviyelere çekilmesinin hedeflendiği ifade edilmiştir (Europäische Kommission, 2018). Bu durum elektrikli araçlara olan ilgini artmasına neden olmaktadır. Öyle ki ilk defa 2022 yılında Avrupa'da elektrikli araçların satış değerlerini içten yanmalı motorlu araçların satış değerini geçebileceği dair öngörüler ortaya konulmuştur (Miller, 2022). Anadolu Ajansı, Türkiye'de 2021 yılı resmi kayıtlara göre elektrikli otomobil satışının bir önceki yıla göre %237,2 artarak 2.846 adet; hibrit otomobil satışlarını ise %105,1 artarak 49.493 adet olarak gerçekleştiğini yayınlamıştır (AA, 2022; Türkiye Enerji Görünümü, 2021).

Otomotiv sektöründe üretilen araçlar için kullanılan yakıt/enerji kaynakları, araç türüne göre değişmektedir. Araç üreticileri, aynı araç modelini, aynı platform ile konvansiyonel, hibrit veya tamamen elektrikli olarak piyasaya sunabilmektedir. Araç tasarımına esas tahrik sistemi ve ilgili bileşenlerinin farklılaşması, kullanılan yakıt türleri nedeni ile aynı görünüme sahip olmalarına rağmen, yürütülecek acil durum müdahale gereksinimlerinde farklı yaklaşımları zorunlu kılmaktadır.

Elektrikli ve hibrit araçların karıştığı, özellikle ağır hasarla sonuçlanan trafik kazalarında, kimi zaman kaza sonrasında meydana gelen yangınlarda, acil müdahale hizmetlerine katkı sunmak adına, özellikle bu konuda önemli çalışmaların yürütüldüğü Almanya ve İsveç itfaiye kuruluşları tarafından yürütülen mevcut çalışmalar incelenmiş, iyi uygulamalar ve ilgili kaynaklar göz önünde bulundurularak işbu çalışmaya esas yaklaşım sunulmuştur (Wisch vd., 2015). Bunun ile birlikte elektrikli araç üreticilerinin paylaştığı acil durum dokümanlar ve bazı büyükşehirlerin itfaiye teşkilatları ile yapılan mülakatlar baz alınarak; Türkiye için elektrikli ve hibrit araçların karıştığı kazalara yönelik, acil müdahale faaliyetlerini esas alan genel bir uygulama prosedürü ortaya konulmuştur.

Otomotiv sektörü için elektrikli sistemler göz önünde bulundurulduğunda, yüksek gerilim kavramı DC sistemler için >60 V ila ≤ 1500 V ve AC sistemler için ise >30 V ila ≤1000 V olarak tanımlanmaktadır (UNECE, 2021: Regülasyon No. 12; DGUV Information 8686). Elektrikli ve hibrit araçlar için çoğunlukla, sistem seviyesi gerilim değeri 400 V DC ile 800 V DC aralığında tasarlanmaktadır (Suarez ve Martinez, 2019). Elektrikli araçlar için yapılan sistem tasarımlarında arttırılan gerilim seviyesi; enerji kayıplarını azaltırken, şarj sistemlerinden kullanılan güç seviyelerinin de daha yüksek değerlere çıkarılmasına imkân sağlamaktadır. Böylelikle elektrikli araçların daha kısa sürelerde şarj olmaları

mümkün kılınmaktadır. Bu yaklaşıma Porsche’nin Taycan 4S ve Hyundai’nin Ioniq 5 örnek gösterilebilir (Nedelea, 2022; Porsch, 2022). Elektrikli ve hibrit araçlarda sistem seviyesi gerilim değerlerinin artırılması, koruma önlemleri ve olası acil durum senaryolarında daha fazla güvenlik marjı gerektirmektedir.

İçten yanmalı motorlu araçlarda olduğu gibi elektrikli ve hibrit araçlar da sürüş sırasında ve olası bir trafik kazası durumunda, güvenliği sağlamak için genel güvenlik gereksinimlerinin karşılanacağı koşullar esas alınarak tasarımlar yapılmaktadır. Avrupa’da olduğu gibi Türkiye’de de trafiğe çıkacak bütün araç konseptleri için Araç Tip Onayı kapsamında Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu (UNECE) tarafından belirlenen standartların sağlanması konusunda ilgili süreçler yürütülmektedir. Bu kapsamda M1 kategorisindeki elektrikli araçlar ve yüksek gerilim tahrik bataryaları, içten yanmalı motorlu araçlar için de yaygın olarak kullanılan UN-ECE R 94/95 ve Euro NCAP vb. testleri uyarınca, yüksek koruma sınıflarında tasarımlar yapılmaktadır. Olası kazalarda öngörülen çarpışma senaryoları, her araç tipi için özel gereksinimler barındırmakta; çarpışmalar sırasında araçta bulunanlar yolcular ve sürücü için riskleri minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda ortaya konulan hususlar, konvansiyonel motorlu araçlar ile elektrikli ve hibrit araçlar için temel de aynıdır. Ancak elektrikli ve hibrit araçlarda farklı olarak, tahrik batarya sistemlerine özel ilave güvenlik gereksinimleri bulunmaktadır. UNECE R100 standardı kapsamında, elektrikli ve hibrit araçlara ait yüksek gerilim tahrik bataryaları için mekanik stres, yangına dayanıklılık, harici kısa devre, aşırı şarj ve aşırı ısınmaya karşı koruma başta olmak üzere birtakım testler uygulanmaktadır. Elektrikli araçlarda kullanılan yüksek gerilim bataryalarının gerekli tip onay süreçleri için mutlaka söz konusu standardı sağlayacak şekilde testlerden geçmesi gerekmektedir.

Meydana gelen kazalarda, olay mahallinde elektrikli ve hibrit araçların yüksek gerilim tahrik batarya sistemlerinin elektriksiz olarak deşarj edilmesi mümkün değildir. Bu nedenle yüksek gerilim tahrik batarya sistemlerinin durumu sürekli olarak izlenmeli ve kesinlikle gerekli tedbirler alınmadan temas edilmemelidir. Ayrıca yüksek gerilim tahrik bataryalarının sahip oldukları dış muhafazaları nedeniyle, batarya hücrelerin doğrudan soğutulması zordur. Bu sebeple meydana gelen elektrikli ve hibrit araç yangınlarında, geleneksel araç yangınlarından daha fazla yangın söndürme sıvısının kullanımı gerekmektedir. Genellikle elektrikli ve hibrit araçlardaki yüksek gerilim tahrik bataryaları, otomobilin gövde kısımlarından yalıtılmış olarak tasarlanmaktadır. Olası bir kaza durumunda bataryalar hasar gördüğünde patlayabilir ya da meydana gelen bir elektrik kaçağı durumunda araç dışının metal aksam olması nedeni ile de olumsuzluklara neden olabilir. Elektrikli ve hibrit araçla meydana gelen kaza durumlarında, kullanılan yüksek gerilim kabloların enerjisiz olması, yüksek

gerilim tahrik bataryasının elektriksel olarak izole edilmesi ile mümkündür. Beraberinde elektrikli ve hibrit ¹ araçların şarj olurken yaşanabilecek kaza durumlarında da şarj istasyonunun ve yardımcı bataryanın (akü) benzer şekilde elektriksel olarak izole edilmesi gerekmektedir. Acil durum ekiplerinin yaşanabilecek bu tür kaza vb. acil durumlarda, yüksek/düşük gerilim sistemlerinin ve bağlantı kablolarının enerjili olabileceğini göz önünde bulundurarak; ilgili bağlantıların devre dışı bırakılması ve/veya gerekmesi durumunda bağlantıların (kabloların) kesilebilmesi için kablo güzergâhlarının ve kullanılması durumunda MSD gibi devre kesici ekipmanın araç içinde konuşlandırıldığı lokasyonu bilmesi kritik önem arz etmektedir.

Elektrikli ve hibrit araçlarda yer alan yüksek gerilim tahrik bataryaları, kaza durumlarında potansiyel tehlike kaynakları olması nedeni ile söz konusu acil durumlar için tasarıma esas girdiler arasında; yüksek gerilim sistemleri - şasi arasında elektriksel izolasyonun sağlanması, iletken parçalar arasında yeterli hava aralığı bulundurulması, yalıtım direnci izleme sistemi kurulması, meydana gelebilecek elektriksel arklara dayanıklı konektör kullanımı, yüksek gerilim uyarı etiketleri ve yüksek gerilim bileşenleri için turuncu renkli kablolardır kullanılması olarak sıralanabilir (DGVU 8686, 2022). Ayrıca kazalar sırasında olası çarpışma sonrası, tahrik sistemine özel montaj bölgeleri, gövde koruması ve bataryalardan kaynaklı toksik elektrolit sızıntısı durumları için de alınması gereken önlemler bulunmaktadır (Electric Vehicle Safety, 2021: Ek-20). Diğer taraftan bir diğer önemli husus da kazazedeler ve acil müdahale ekiplerinin, elektrik çarpma tehlikesine karşı korunmasıdır. Olası bir çarpışma durumunda, çarpışma önleme sistemleri ile entegre ve çarpışma anı öncesinden başlayarak, yüksek gerilim tahrik batarya sisteminin izolasyonunun veya mümkün kılınması ile yüksek gerilim tahrik bataryasının deşarjının sağlanması en etkin yöntem olarak değerlendirilmektedir (UNECE, 2022: Regülasyon No. 94 ve No.95).

1. Elektrikli ve Hibrit Araç Kazalarında Temel Risk Faktörleri

Elektrikli ve hibrit araçların karıştığı kazalarda ve acil durumlarda yapılacak müdahale sırasındaki riskler elektriksel, termal ve kimyasal olmak üzere 3 temel kategoriye değerlendirilebilir. Bu kapsamda ilk olarak elektriksel risklere dair aşağıdaki hususlara yer verilmiştir.

Normal koşullarda elektrikli ve hibrit araçların güç tahrik sisteminde yer alan kontaktörler, araçlarda bulunan hava yastıklarının açılması ve/veya kaza durumunda, çarpışma sensörü marifeti ile tetiklenerek, yüksek gerilim tahrik batarya sistemi ile diğer tahrik sistem bileşenlerinin arasındaki elektriksel bağlantısının kesilmesini sağlamaktadır. Beraberinde tahrik motor sürücüsü

1 Plug-in hibrit araçlar

içerinde yer alan kapasitörlerin deşarj dirençleri üzerinden boşaltılması ve tahrik motorunun rotorunun kısa devre yapılması gibi ilave önlemler de olası tehlikelerin önüne geçilmesini mümkün kılmaktadır (VDA,2020).

Elektrikli araçlarda sistem mimarisinde yer alan IT topraklama yapısı, yüksek gerilim kaynaklı elektrik çarpması riskini azaltmaktadır. Bununla birlikte, batarya kutuplarına kısa devre yapılmasının veya batarya hücrelerine doğrudan temas edilmesinin, elektrik çarpmasına ve ark oluşumuna neden olacağı bilinmesi gerekir. Araçların sistem tasarımında sigorta yer verilmemesi durumunda ise yüksek gerilim tahrik bataryasının doğrudan kısa devre yaparak, deşarj olmasına neden olunabilir. Böyle bir durum istenmeyen sonuçların doğmasına neden olabilmektedir. Özellikle acil müdahale ekiplerinin, yukarıda belirtilen hususlar ile birlikte, elektrikli ve hibrit araçlarda yer alan turuncu kablolarla, beraberinde yüksek gerilim tahrik batarya ve ilgili bileşenlerine ait iletken kısımlara güvenli bir mesafede bulunması gerekir. Genel olarak acil müdahale ekiplerine yönelik, araç üzerinde yer alan komponentlerde gerilim bulunmadığına dair net bir gösterge ya da sistem ara yüzü bulunmamaktadır. İlgili araç üreticilerinin özel direktifleri doğrultusunda yapılacak müdahalelerde mutlaka önce yüksek gerilim sisteminin manuel olarak devre dışı bırakılması gerekmektedir. Bu amaçla birçok elektrikli ve hibrit araçlarda MSD bulunmaktadır (VDA,2020).

Elektrikli ve hibrit araçların karıştığı kazalarda, acil müdahale ekipleri, genellikle yüksek gerilim sistemlerinin nasıl devre dışı bırakılacağını ve yüksek gerilim enerji kablolarının söz konusu araçta hangi güzergâhtan geçtiğini bilmemesi en büyük sorunu teşkil etmektedir. Konvansiyonel motorlu araçlarda yer alan 12 V /24 V düşük gerilim bataryasının (akü) kutup başlarının sökülmesi ile elektrikli sistemler devre dışı bırakılabilirken; elektrikli ve hibrit araçlarda yer alan yüksek gerilim tahrik batarya sistemlerinde ilgili güvenlik anahtarlamalarına (MSD konektörü) kimi zaman erişim zorluğu bulunmakta; kimi zaman yerinin tespit edilememesinden dolayı oldukça zorlu sürece maruz kalınmaktadır . Elektrikli ve hibrit araçlarda acil müdahale ekiplerinin ve/veya kazazedelerin maruz kalacağı en önemli bir diğer risk ise elektrik akımına maruz kalınması durumudur.

Elektrikli ve hibrit araçlarda oluşabilecek diğer bir risk faktörü ise termal risklerdir. Araçlarda meydana gelen yüksek değerdeki kısa devre akımlarından, kimyasal olarak hücrelerde depolanan enerjiden, harici bir yangından veya tahrik bataryalarının diğer sıcak bileşenlerle temasından kaynaklanabilir. Lityum tabanlı bataryaların en verimli olduğu, ideal çalışma sıcaklığı 20 °C ila 40 °C arasındadır. Çoğu lityum tabanlı bataryalara ait hücreleri 60 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çalıştırılmaya veya depolamaya uygun değildir. Bu kapsamda yüksek gerilim tahrik bataryalarına özel ısıtma ve soğutma sistemleri kullanılmakta olup, bu manada kritik öneme sahiptir. Kullanılan NMC ve

LTO gibi lityum tabanlı batarya konseptleri için kullanılan batarya soğutma sistem arızaları, benzer şekilde termal risklere yol açabilmektedir. Kullanılan sıvı (glikol/su karışımı) soğutmalı sistemlerin hatlarda meydana gelebilecek sızıntılar, kompresör vb. soğutma sistem donanımlarına dair arızalar, yeterli ve etkin soğutma yapılmamasına, dolayısı sistemler de termal hataya sebep olabilmektedir.

Yüksek sıcaklıklarda, lityum tabanlı batarya hücrelerinin içindeki basınç artabilir, yanıcı gazlar açığa çıkabilir ve hücreler tutuşabilir. Yaşanan olası bir termal kaçak durumu, bataryada yer alan enerjinin tamamının kontrollü bir şekilde elektrik enerjisi olarak değil, kontrolsüz bir şekilde termal enerji olarak açığa çıkmasına neden olmaktadır. Böyle bir durumda, söz konusu bir lityum bataryada açığa çıkan termal enerji, elektriksel olarak depolanan enerjiden 7 ila 11 kat daha fazla olabilmektedir. Ortaya çıkan ısı, yaşanan kimyasal reaksiyonu hızlandırarak, bataryanın aşırı ısınmasına neden olurken, ekzotermik reaksiyon sonucu oksijen üretimi nedeni ile de çıkabilecek olası bir yangının kontrol edilmesi zorlaşmaktadır. Geleneksel yangın söndürme yöntemleri kullanılarak yapılacak bir müdahale ile olumlu sonuç alınması mümkün değildir (Spotnitz ve Franklin, 2003). Yaşanan termal kaçak durumlarında hızla çok yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılmakta ve kimyasal olarak lityum bileşenin tutuşmasına neden olmaktadır. Normal koşullarda lityum tabanlı bataryaların hava geçirmez, sızdırmaz yapılarına rağmen, meydana gelen mekanik hasar veya olası harici yangın durumlarında, termal strese maruz kalması nedeni ile aşındırıcı toksik maddelerin ve beraberinde yanıcı bileşenlerin (toz, gaz veya sıvı) açığa çıkmasına neden olabilir.

Yüksek gerilim tahrik bataryalarında kullanılan lityum bileşeni oldukça reaktiftir ve hızlı oto katalitik² reaksiyonlara eğilimlidir. Bunun ile birlikte lityum, nispeten düşük bir erime noktasına (181 °C) sahiptir. Bir batarya hücresi içindeki erimiş lityum, kontrol edilemeyen durumlara neden olur. Elektrikli ve hibrit araçlarla yaşanacak olası kaza sonrasında ortaya çıkan yangın durumlarında, 200 °C 'nin üzerindeki sıcaklıklar, batarya hücrelerindeki elektrolitlerin erimesine, sonrasında da batarya hücrelerinde birtakım farklı reaksiyonların gelişmesine neden olabilmektedir (Spotnitz and Franklin, 2003). Bu reaksiyonlar termal kaçak sürecini tetiklemektedir. Diğer taraftan ortaya çıkan sıcaklık artışı, parlamalara ve kıvılcım atımlarına neden olmaktadır. Yüksek gerilim tahrik bataryalarına yakın konumda yer alan havalandırma ünitelerinden gelen taze hava, yanıcı bileşen (O₂) içermesi, tutuşma için yeterli kaynak sunması ile de patlama yaşanması muhtemel durumlara yol açmaktadır (Larsson vd., 2018). Yaşanan sıcaklık değişimi ve beraberinden meydana gelen reaksiyonlar, bataryanın hücre tipi ve bataryanın sağlık durumu gibi birçok etmene bağlıdır (Zhang vd., 2018; Geisbauer vd., 2020).

2 Bir kimyasal tepkimede ortaya çıkan ürünün, tepkime hızını artırması

Termal kaçak durumları, yüksek gerilim tahrik bataryasının kaza sonrası hasar durumuna bağlı olarak, kazadan hemen sonra veya gecikmeli meydana gelebilir. Bunun ile birlikte kimi zaman hiç meydana gelmediği durumlar da söz konusu olabilmektedir (Sheikh vd., 2017; Sahraei vd., 2021). Bu doğrultuda acil müdahale ekiplerinin özellikle olası gecikmeli durumları değerlendirmesi oldukça zorlu bir hal almaktadır. Bir elektrikli araç türü olan Chevrolet Volt ile gerçekleştirilen yandan çarpma testi kapsamında, gerçekleştirilen kaza senaryosundan üç hafta sonra yüksek gerilim tahrik bataryasının kısa devre yaparak ve alev aldığı kayıt altına alınmıştır (Isidore, 2011; Wojdyla, 2020).

Diğer taraftan lityum tabanlı bir yüksek gerilim bataryasının su ile temas etmesi de (yangın söndürmede için kullanılan su) tehlikeye yol açabilmektedir. Alkali metalin yüksek re aktivitesi nedeniyle, su molekülleri (H_2O) bileşenlerine ayrılmakta; dolayısı ile ortamda hidrojen oluşumuna neden olmaktadır. Hidrojen/hava karışımlarının meydana gelen düşük elektrostatik boşalmalar veya elektriksel ateşlemelerle ortaya çıkabilecek kıvılcımlar nedeni ile de olası gaz patlamaları tetiklenebilmektedir. Ayrıca lityum tabanlı bataryaların su ile etkileşiminin sebep olduğu diğer bir tehlike ise elektrotlar arası potansiyel gerilim farkından kaynaklanmaktadır. Kutuplar arasındaki gerilimin (DC) potansiyel farkı, su ile oluşabilecek kısa devre durumunda benzer şekilde patlamaya neden olabilmektedir. Meydana gelecek bu ve benzeri durumlar yüksek gerilim tahrik bataryalarında can güvenliği açısından da tehlike arz etmektedir.

Kimyasal riskler arasında değerlendirilen bir diğer risk faktörü ise batarya hücrelerinden açığa çıkan gaz ve sıvı haldeki yanıcı ve aşındırıcı elektrolit sızıntılardan kaynaklanan tehlikelerdir. Söz konusu bu kimyasallar, benzer şekilde tutuşma sebep teşkil edebilmektedir (VDA, Accident Assistance). Muhtemel bir çarpışma, yüksek gerilim tahrik batarya sisteminin, modül yada hücrelerinin deformasyonuna, içerisinde yer alan kimyasalların da bu suretle sızıntısına veya söz konusu hücrelere su/hava girmesine yol açabilmektedir. Böyle bir durumda ortaya çıkabilecek toksik, aşındırıcı, yüksek oranda reaktif özellikte olan kimyasallar ile temas edilmesi ciddi yaralanmalara, hatta ölüm tehlikesine sebep teşkil edebilmektedir (Hatai vd., 1986).

2. Elektrikli ve Hibrit Araçların Karıştığı Olası Kaza Senaryoları

Elektrikli ve hibrit araçların karıştığı kaza durumları için acil müdahale ekiplerinin karşılaşılabilecekleri muhtemel senaryolar aşağıda sıralanmıştır.

- Kaza mahallinde yangının olmaması ve elektrikli veya hibrit aracın tahrik bataryasında sorun görülmemesi,
- Kazaya maruz kalan elektrikli veya hibrit aracın tahrik bataryasının hasarlı olması veya kritik bir durumda olduğu tespit edilmesi, sonrasında bataryada yangın çıkmasının muhtemel olduğu değerlendirilmesi,

- Kaza maruz kalan elektrikli veya hibrit aracın tahrik bataryası hasarlı olması ve de yangın başlaması,
- Kaza maruz kalan elektrikli veya hibrit aracın yanması ancak yüksek gerilim tahrik bataryasının henüz bu aktif yangına dahil olmaması,

Elektrikli ve hibrit araçların karıştığı kazalarda, meydana gelen yangın durumunda öncelikle yangının kaynağı tespit edilmelidir. Bu kapsamda yangının bataryadan kaynaklı olup, olmadığı çok önemlidir. Bataryanın hasarlı ve yanıyor olması durumunda, bataryada termal kaçaklara neden olabilir. Bu nedenle daha fazla hasarı önlemek için bütün yüksek gerilim tahrik batarya grubunun ivedilikle soğutulması gerekmektedir.

Diğer yaklaşım ise yüksek gerilim tahrik bataryasının hasar görmediği ve yangının henüz bataryaya sirayet etmediği durumdur. Bataryanın meydana gelen yangına henüz karışmadığı varsayımıyla, vakit kaybetmeksizin yangını kontrol altına almak için geleneksel söndürme yöntemleri uygulanmasına geçilmelidir. Elektrikli ve hibrit araçlarda soğutma, batarya yangınlarını söndürmenin en iyi yoludur. Yangın söndürüldükten sonra, belli bir süre zarfında söz konusu yanan araç takip edilmelidir. Batarya dışarıdan zarar görmemiş gibi görünse dahi batarya hücrelerinin içindeki kimyasal reaksiyonlar yeniden yangın çıkma potansiyeli taşımaktadır (Blum vd. , 2015; Kagermeier, 2020). Sıcaklığı ve dolayısıyla diğer hücrelere termal yayılma riskini azaltmak için yüksek gerilim tahrik bataryasının soğutulmasına, bu maksatla mümkün olduğunca fazla soğutma sıvısı kullanmasına özen gösterilmelidir. Bu yönüyle bir elektrikli veya hibrit araç yangınına söndürmek için gereken yangın söndürme sıvısı miktarı, içten yanmalı bir araç yangınına kıyasla büyük oranda farklılık gösterir (Blum vd., 2015). Müdahale sonrası kazaya karışan hasarlı elektrikli veya hibrit aracın olay mahallinden götürülmeden önce, mutlaka yüksek gerilim sistemlerinin devre dışı bırakılması gerekmektedir (VDA, 2020).

Kaza sonrası yüksek gerilim tahrik bataryasında meydana gelen ısı oluşumu veya mekanik deformasyon kaynaklı hücre bazında ortaya çıkan basınç nedeniyle (belirli bir limiti aşarsa) havalandırma açıklıklarından gaz çıkışı olacaktır. Bataryalarda kullanılan hücre tipine göre değişen miktarda gaz çıkışı meydana geldiğinden, çıkardığı sesler bu konuda dikkat edilmesi gereken değerlendirme unsurları arasındadır (Geib vd., 2020). Benzer şekilde patlamanın meydana geldiği bir tahrik bataryasına dair yapılacak bir başka tespit ise yaşanan elektrolit sızıntısı kaynaklı koku yayılımıdır (Doughty ve Crafts, 2006). Ayrıca, gaz salınımı için portatif gaz detektörlerinin kullanılması önemli bir fayda sağlayacaktır.

Elektrikli ve hibrit araçlarda kullanılan lityum bazlı yüksek gerilim tahrik bataryasına ait hücre sıcaklığı, güvenlik açısından iyi bir göstergedir (Cabrera, 2016; Geisbauer vd.,2020). Sıcaklığı ölçmek için kullanılacak yöntem olarak

batarya hücrelerine doğrudan bağlanacak termokupl üzerinden elde edilecek veriler veya bir termal kamera vasıtası ile yapılan ölçümler esas alınabilir. Bu kapsamda özellikle gün ışığının olduğu durumlarda araç şasisi üzerinden metal aksama sahip yüzeyler arasında diğer ışık kaynaklarının da (gündüz gün ışığının, gece ise kullanılan özel aydınlatma unsurlarının) yansımaları da değerlendirmeye alınmalıdır. Termal kamera ile sıcaklık ölçümü için uygun kamera kurulumuna ve tahrik bataryasının harici bir ışık kaynağına maruz kalmayan yüzeyine odaklanması önemlidir. Ayrıca termokupl kullanılarak elde edilecek sıcaklık ölçüm yönteminde ölçüm noktaları arasındaki termal direnç nedeni ile batarya hücreleri içindeki gerçek sıcaklık değerinin okunmasında gecikmeler veya ölçülen sıcaklık değerinin olduğundan düşük çıkması durumları da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu doğrultuda olası yanlış ölçüm sonuçları ile karşı karşıya kalınabileceğinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Mümkün olması durumunda her iki yöntemin birlikte kullanılması, daha etkin sonuçlar alınması için fayda teşkil edecektir.

3. Acil Müdahale Ekiplerinin Uygulaması Tavsiye Edilen Yaklaşımlar

Elektrikli veya hibrit aracın karıştığı kaza sonrası, muhtemel hasar alan bir yüksek gerilim tahrik bataryası, esas olarak ana tehlike kaynağıdır ancak acil müdahale ekiplerinin, batarya üzerinden (batarya yönetim sistemi sağlanan) gerçek verilere doğrudan erişim imkânı olmadığı için bataryaların nihai durumu güvenilir bir şekilde belirlenememektedir (Wöhrl vd., 2020). Bu nedenle bataryaların durumunun kaza sonrasında doğru bir şekilde analiz edilmesi için bazı temel hususların gözlemlenerek ya da ölçüm yapılarak elde edilmesi gerekir. Bu kapsamda aşağıdaki yöntemler uygulanması tavsiye edilmektedir.

Elektrikli ve hibrit araçlarla meydana gelen kaza durumunda öncelikle sahada keşif ve hızlı durum tespiti yapılması çok kritiktir. Kaza mahalline ulaşıldığında ilk olarak acil müdahale ekipleri tarafından aracın görsel olarak incelenmesi gerekmektedir. Temel husus kazaya karışan aracın elektrikli/hibrit bir araç olup/olmadığı tanımlanmasıdır. Kaza yapan konvansiyonel motoru araçlar ile elektrikli ve hibrit araçlar için farklı önlemlerin alınması gerekmektedir bu neden ile kaza mahallinde, aracın türünü belirlenmesi kritiktir. Aracın dış kısmındaki amblemler öncelikli görsel unsurlar olmakla birlikte bu amblemlerin çarpışma sonrasında sıklıkla görünmez duruma gelmesi ya da yerinde olmaması mümkün olabilmektedir. Bu yüzden aracın mutlaka her tarafını incelenmesi ve mümkün olması durumunda kaputun altındaki ve aracın iç kısmındaki görsel unsurların da mutlaka değerlendirilmesi gerekmektedir. Yüksek gerilim uyarı etiketleri, araç marka/modeli, şarj portu, egzoz sistemi olmaması, gösterge panelinde yer alan elektrikli ve hibrit araçlara özel görseller veya turuncu yüksek gerilim kabloları bu kapsamda elektrikli ve hibrit araçlar için en temel ayırt edici özellikler olarak

değerlendirilebilir (Staatliche, 2017). Ayrıca Avrupa'da bazı ülkelerde ilgili yasalar çerçevesinde, elektrikli araçlar için plakalarında "E" harf sembolünün kullanılmasına dair de zorunlu olmayan yaklaşımların sunulduğu bilinmektedir.

Kaza mahallinde yapılacak müdahaleler öncesinde ilgili aracın hareket edemeyecek şekilde sabitlenmesi gerekmektedir. Kaymaya karşı gerekli tedbirler alınması sonrası, yangın mücadele çalışmaları başlatılmalıdır. Ardından kimyasal sızıntısı ve elektriksel sistemlere dair kontroller yapılmalıdır. Acil müdahale ekipleri için riskler ortadan kaldırıldıktan sonra kurtarma çalışmalarına geçilmesi uygun olacaktır.

Sonrasında zaman kaybetmeksizin aracın tahrik sisteminin incelenmesi de gerekir. Bataryasının deformasyonuna, elektrolit veya soğutucu gibi sıvıların sızmasına, patlamaya ve duman oluşumuna da özellikle dikkat edilmelidir. Bu kapsamda beyaz duman tespit edilmesi, hücrelerin içinde devam eden elektrolit yangınının bir göstergesi olabileceği değerlendirilebilir (Luo vd., 2018; DGUV, 2020).

Yapılacak ilk kontroller sonrasında aracın hareketiz kalacak şekilde konumlandırılması esastır. Bu durum acil durum müdahalesinde bulunacak ekiplerin ve/veya kazazedelerin, aracı yanlışlıkla hareket ettirmesi sonucu muhtemel tehlikelerin önüne geçmesi için önemlidir. Elektrikli ve hibrit araçlarda içten yanmalı motorlu araçlardan farklı olarak motor sesi bulunmamaktadır. Bu durum kimi zaman araç çalışıyor olmasına rağmen, çalışmıyor olarak algılanmasına neden olabilmektedir. Olası acil durum sırasında müdahale edecek ekiplerin, elektrikli aracın muhtemel hareket yönleri olan ön ve arka kısımdan uzak durmaları, aracın yan kısımlarından müdahale için yaklaşması uygun görülmektedir.

Elektrikli ve hibrit araçları için acil durumlar için uygulanacak ilk müdahale kapsamında, araç tamamen hareketsiz hale getirilmesi sonrası yüksek gerilim sistemlerinin devre dışı bırakılması gerekmektedir. Bu kapsamda aşağıdaki prosedürlerin uygulanması tavsiye edilmektedir.

- Gösterge panelindeki aracın sürüşe hazır olduğunu belirten uyarı ışığı kontrol edilmelidir. Eğer aktif olduğu görülüyorsa, araç güç düşmesinden/kontak anahtarından kapatılmalıdır.
- Aracın yardımcı bataryasının (akü) bağlantısının kesilmesi gerekmektedir, bu anlamda 12 V / 24 V akünün negatif (-) ucundan kablonun yerinden çıkarılması uygun olacaktır.
- Ayrıca yüksek gerilim tahrik bataryasının, sistemden izolasyonunu sağlamak için ise sistemde yer alan Interlock hattının tespit edilerek, bağlantısının kesilmesi ve MSD çıkarılması (varsa) çıkarılması gerekmektedir. Böylelikle sistem koruma tedbirleri devreye girerek, gerekli acil müdahaleye uygun koşullar sağlanmış olacaktır.

Elektrikli ve hibrit araçlarda acil durum müdahale süreçlerine başlamadan önce yukarıdaki prosedürlerin uygulanması sonrası, en az 5 dakika boyunca müdahale etmeksizin beklenilmesi gerekmektedir. Böylelikle yüksek gerilim sistemlerinde yer alan kapasitanslarda deşarjlar gerçekleşecektir. Bu süreçte açıkta yer alan kablolar elektrik akımına kapılma riskini barındırdığı göz önünde bulundurularak, kesinlikle temas edilmemelidir. Sonrasında söz konusu araca dair hiçbir bileşenin ve kablonun bağlantısına, interlock hattı devre dışı bırakılmadan veya MSD açılmadan müdahale edilmemelidir. Söz konusu belirtilen bu öncelikli güvenlik tedbirleri sonrası yardımcı bataryanın (akü) kutup başları da çıkarıldıktan sonra müdahale işlemlerine başlanmalıdır. Benzer şekilde bu süreçlerden sonra yine müdahaleye başlanılmadan önce en az 5 dakika daha beklenmesi uygun olacaktır zira hava yastığı sisteminin hatalı çalışmasından kaynaklanan yaralanma riski bulunmaktadır. Yüksek gerilim bataryalarının ve bileşenlerini araçtan deplasmanı sırasında mutlaka izolasyon ve koruma amaçlı harici olarak toplama yapılması da gerekmektedir (VDA 2020).

Elektrikli ve hibrit araçların dahil olduğu kazalara müdahale sürecinde, ekiplerinin araçta kesme, yeryer parçalama işlemleri yapması gerekebilmektedir. Bu suretle yaşanabilecek riskleri arttırmamak adına, araca en az zarar vererek; özellikle hava yastığı sistemine, turuncu renkli yüksek gerilim kablolarına ve diğer yüksek gerilim bileşenlerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Araçta ağır hasar meydana gelmesinden ötürü, yüksek gerilime haiz bileşenler açığa çıkmış ise ilk müdahale ekiplerinin gerekli önlemleri almaları, buldukları zemine elektriksel yalıtım sağlayan kaplama malzemeleri sermeleri ve uygun kişisel koruyucu donanımlar ile müdahale etmeleri gerekmektedir.

Son olarak elektrikli ve hibrit araçlar park halinde iken bir kazaya maruz kalması da söz konusu olabilmektedir. Böyle bir durumda benzer yaklaşımlar gözetilerek aracın yüksek gerilim sistemlerinin aktif olma durumu göz önünde bulundurulmalıdır. Bu minvalde parklanma sırasında kliması / ısıtması aktif olarak çalışan bir elektrikli araç esas alınabilir ve söz konusu tehlikeler bu durumda da geçerlidir zira yüksek gerilim tahrik bataryası bu durumda aktiftir. Duran elektrikli veya hibrit araca çarpıldığında hava yastıkları genellikle devreye girmez; bu sebeple bağlı sistemlere entegre koruma önlemlerinin de devreye girmesi mümkün olamayabilir. Elektrikli veya hibrit aracın durur konumunda meydana gelen kazalar sonrası, aracın yüksek gerilim sistemlerinin manuel olarak devre dışı bırakılması gerekmektedir. Ayrıca elektrikli veya plug-in hibrit araçların şarj gereksinimleri için kullanılan şarj istasyonlarına bağlı iken (şarj esnasında) bir çarpma ile gerçekleşen kaza durumunda ise şarj kablosunu, şarj istasyonundan (mümkünse) veya araçtan çıkarılması uygun olacaktır. Mutlaka şarj sisteminin enerjisini kesilmesi sağlanmalıdır. Şarj kablosu ve/veya konektöründe herhangi bir görünür hasar belirtisi olup, olmadığını kontrol

edilerek; olası hasarlı bölgelerin elektriksel olarak izolasyonu sağlanmalıdır. Son olarak şarj istasyonlarının araçtan bağımsız olarak, kaza durumunda hasar görmesi koşulunda (şarj istasyonuna çarpılması durumu) ise enerji besleme noktası tehlike arz edebilir. Bu kapsamda besleme noktasının bağlı bulunduğu transformatör üzerinden enerjinin kesilerek, detaylı kontrollerini yapılması yine tavsiye edilmektedir.

Değerlendirme ve Sonuç

Bu çalışmada elektrik ve hibrit araçlarda meydana gelen acil durumlarda yaşanan kazalar ve beraberinde/sonrasında çıkabilecek yangın durumlarında yüksek gerilim tahrik bataryalarının etkilenme riski göz önünde bulundurulmuştur. Acil müdahale işlemleri normal içten yanmalı motorlu araçlara göre daha kritik olup, acil müdahale ekipleri başta olmak üzere ilgililerin çok dikkatli olmasını gerektirmektedir. Bu doğrultuda lityum bazlı bataryaların yüksek sıcaklıklarda dışarı akan kimyasal maddelere sahip olduğu ve alev alabileceği mutlaka değerlendirilmelidir. Yüksek gerilim tahrik bataryalarında meydana gelen yangınlar söndürme işlemleri sonrasında yeniden alevlenme durumunun da söz konusu olabileceği unutulmamalıdır. Kaza mahallini terk etmeden önce bir termal kamera kullanarak, yüksek gerilim batarya grubunun tamamen soğuduğundan emin olunması gerekmektedir. Diğer müdahale ekiplerine de yüksek gerilim tahrik bataryasının yeniden yanma riskine sahip olduğunu mutlaka bildirilmelidir. Bu duruma esas yüksek gerilim tahrik bataryalarının açık bir alanda, belli bir süre zarfında, 15-20 metre çevresinde tehlike arz etmeyecek şekilde konumlandırılması ve mutlaka gözetim altında tutulması gerekmektedir. Elektrikli ve hibrit aracın olası kaza sonrası yüksek gerilim batarya grubundan dökülen elektrolit sıvısına doğrudan temas edilmesi veya oluşan bu sıvı birikintisi üzerine basılabileceği benzer şekilde kimyasal gazların da yayılımından kaynaklı riskler de dikkate alınmalıdır. Müdahale edecek personellerin ilgili standartlara haiz, uygun nitelikte kişisel koruyucu donanımlara (baret, vizör, oksijen maskesi, eldivenler ve ayakkabılar) sahip olması gerekmektedir.

Bu çalışmada elektrikli ve hibrit araçlarda yüksek gerilim tahrik bataryaları için kullanılacak MSD dair gelişime açık yönler olduğu tespit edilmiştir. Özellikle bu donanımların söz konusu araçlarda kullanımının zorunlu hale getirilerek, yapılarına dâhil edilecek ilave DC devre kesiciler marifeti ile daha etkin kullanımın sağlanması gerektiği değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, elektromobilité kavramına esas elektrikli veya hibrit araçların yalnızca %100 sıfır emisyon yaklaşımına dair iyi birer alternatif olmalarının yansırı, aynı zamanda alternatif teknolojiler kadar güvenli ve erişilebilir olmaları gerektiği düşünülmektedir. Bu durumun yaşanılacak acil durumlar için görev yapacak ekiplere doğru, etkin ve bütüncül yaklaşımların ortaya konulmasını zorunlu kılmaktadır.

Kaynaklar

Blum, A.-Long, R.T. (2015) "Full-scale Fire Tests of Electric Drive Vehicle Batteries". *SAE Int. J. Passeng. Cars Mech. Syst.* 8, 565–572.

Cabrera-Castillo, E.-Niedermeier, F.-Jossen, (2016) A. Calculation of the state of safety (SOS) for lithium ion batteries. *J. Power Sour.* 324, 509–520.

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). Hinweise für die Brandbekämpfung von Lithium-Ionen-Akkus bei Fahrzeugbränden. July 2020. Available online: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/3907> (accessed on 24 November 2020).

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V., (DGUV). DGUV Information 8686 Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen. April 2012. Available online: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/889> (accessed on 15 February 2021).

Doughty, D.-Crafts, C. (2006) Freedom CAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications: Sandia Report SAND2005-3123; Sandia National Laboratories: Albuquerque, NM, USA; Livermore, CA, USA.

Durlak A. (2022). "2021 Yılında Elektrikli ve Hibrit Otomobil Satışları Katlandı", *Anadolu Ajansı*, Available online: <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/2021de-elektrikli-ve-hibrit-otomobil-satislari-katlandi/2467733#:~:text=T%C3%BCrkiye'de%20ge%C3%A7en%20y%C4%B1l%20elektrikli,alan%20C3%BCnC3%A7C3%BCnc%C3%BC%20motor%20tipi%20ol> (accessed on 23 April 2022).

Europäische Kommission. *Saubere Mobilität: Parlament und EU-Staaten Einig über Neue CO2-Grenzwerte für Autos*. Available online: https://ec.europa.eu/germany/news/20181218-co2-grenzwerte-autos_de (accessed on 3 April 2022).

Geib, C.-Nebl, C.-Huber, J.-Schweiger, H.-G. (2020) "Herausforderung Elektrofahrzeuge: Hilfestellung für den Einsatz". *Brandwacht*, I/2020; pp. 18–20. Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr. München. Available online: https://www.brandwacht.bayern.de/mam/archiv/beitraege_pdf/bw_1_2020_s18_20_e-autos2.pdf (accessed on 24 November 2020).

Geisbauer, C.-Wöhr, K.-Mittmann, C.-Schweiger, H.G. (2020) "Review of Safety Aspects of Calendar Aged Lithium Ion Batteries". *J. Electrochem. Soc.* 167, 90523.

Global Technical Regulation on the Electric Vehicle Safety (EVS): Addendum 20 (2018). Available online: <https://unece.org/transport/standards/transport/vehicle-regulations-wp29/global-technical-regulations-gtrs> (accessed on 19 August 2020).

Hatai, J.K.-Weber, J.N.-Doizaki, K. (1986), "Hydrofluoric Acid Burns of the Eye: Report of Possible Delayed Toxicity". *J. Toxicol. Cutan.Ocul. Toxicol.* 5, 179–184.

Isidore, C. Volt fire 3 Weeks After Crash Prompts Safety Probe. Available online: https://money.cnn.com/2011/11/11/autos/volt_crash_fire/index.htm (accessed on 20 May 2022).

Isidore, C. Volt fire 3 Weeks After Crash Prompts Safety Probe. Available online: https://money.cnn.com/2011/11/11/autos/volt_crash_fire/index.htm (accessed on 20 August 2022).

Istanbul Metropolitan Municipality Fire Department, Records on Road Accidents, were obtained after the data request requested via CIMER.

Kagermeier, E. (2020) Wie gefährlich sind Brände bei E-Autos wirklich? Available online: <https://www.br.de/nachrichten/wissen/wiegefaehrlich-sind-braende-bei-e-autos-wirklich,RoPFuv7> (accessed on 7 September 2020).

Larsson, F.-Bertilsson, S.-Furlani, M.-Albinsson, I.-Mellander, B.E. (2018), Gas explosions and thermal runaways during external heating abuse of commercial lithium-ion graphite-LiCoO₂ cells at different levels of ageing. *J. Power Sour.* 373, 220–231.

Luo, W.T.-Zhu, S.B.-Gong, J.H.-Zhou, Z. (2018), "Research and Development of Fire Extinguishing Technology for Power Lithium Batteries". *Procedia Eng.* 211, 531–537.

Miller J. (2022), "European sales of electric cars overtake diesel models for first time", *Financial Times*, Joe Miller in Frankfurt January 16 2022.

Nedelea, A. (2022) Hyundai Ioniq 5 Electric Crossover Teased Ahead of Imminent Reveal. Available online: <https://insideevs.com/news/465953/hyundai-ioniq-5-ev-teased-before-launch/> (accessed on 15 January 2022).

Porsche, A.G. Taycan 4S. Available online: <https://www.porsche.com/germany/models/taycan/taycan-models/taycan-4s/>(accessed on 15 January 2022).

Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 Setting CO₂ Emission Performance Standards for New Passenger Cars and for New Light Commercial Vehicles, and Repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011. 2019. Available online: <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/631/oj> (accessed on 3 April 2022)

Sabancı Üniversitesi İstanbul Uluslararası Enerji ve İklim Merkezi. (2021), *Türkiye Enerji Görünümü*. Available online: https://iiecec.sabanciuniv.edu/sites/iiecec.sabanciuniv.edu/files/inline-files/4-teo_executive_summary-unprotected_v.pdf (accessed on 23 September 2022).

Sahraei, E.-Campbell, J.-Wierzbicki, T. (2012), Modeling and short circuit detection of 18650 Li-ion cells under mechanical abuse conditions". *J. Power Sour.* 220, 360–372. *Energies* 2021, 14, 1040 19 of 21

Sheikh, M.-Elmarakbi, A.-Rehman, S. (2017). “Thermal and Electrical failure analysis of lithium-ion battery after crash”. *Karachi, Pakistan*, 19–20 May 2017.

Spotnitz, R.-Franklin, J. (2003) “Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells”. *J. Power Sour.* 113, 81–100.

Spotnitz, R.M.-Weaver, J.-Yeduvaka, G.-Doughty, D.H.-Roth, E.P. (2007). “Simulation of abuse tolerance of lithium-ion battery packs”. *J. Power Sour.* 163, 1080–1086.

Staatliche Feuerweherschule Würzburg. Alternativ Angetriebene Fahrzeuge. (2017). Available online: <https://www.ffw-seukendorf.de/wp-content/uploads/2020/01/Merkblatt.pdf> (accessed on 14 September 2020).

Suarez, C.-Martinez, W. (2019, September). “Fast and ultra-fast charging for battery electric [vehicles—a review]”. In *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 569-575). IEEE.

Trafik Kazaları Eğitim Kitabı (2014). İstanbul: İstanbul Büyükşehir Belediyesi Yayınları

UNECE Regulation No. 12. Agreement Concerning the Adoption of Uniform Conditions of Approval and Reciprocal Recognition of Approval for Motor Vehicle Equipment and Parts: Addendum 11: Regulation No. 12; UN: Geneva, Switzerland, 2012.

UNECE Regulation No. 94 Agreement Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of These Prescriptions: Addendum 93: Regulation No. 94, 3rd ed.; UN: Geneva, Switzerland, 2017.

UNECE Regulation No. 95. Agreement Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of These Prescriptions: Addendum 94: Regulation No. 95, 2nd ed.; UN: Geneva, Switzerland, 2014.

VDA Verband der Automobilindustrie—Project group. Recovery of vehicles with high-voltage systems from accidents. Accident Assistance and Recovery of Vehicles with High-Voltage Systems: Frequently Asked Questions (FAQs). Available online: <https://www.vda.de/vda/en/press/press-releases/200806-Accident-assistance-The-automotive-industry-gives-highest-priority-to-collaboration-with-rescue-teams-> (accessed on 21 May 2022).

Wang, Z.-Shi, S.-Liu, P. “Research Progress on Collision Safety of Electric Vehicles”. In *Proceedings of the 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Shanghai, China, 6–7 January 2011; pp. 153–156.

Wisch, M.-Ott, J.-Thomson, R.-Léost, Y.-Abert, M.-Yao, J. (2014) "Recommendations and Guidelines for Battery Crash Safety and Post-Crash Safe Handling". *EVERSAFE—Everyday Safety for Electric Vehicles*. Available online: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1367933&dsid=-7667> (accessed on 20 March 2022).

Wojdyla, B. (2020) The Straight Story on the Chevy Volt Battery Fire. Available online: <https://www.popularmechanics.com/cars/hybrid-electric/a11865/the-straight-story-on-the-chevy-volt-battery-fire-6601217/> (accessed on 20 November 2020).

Wojdyla, B. (2022) The Straight Story on the Chevy Volt Battery Fire. Available online: <https://www.popularmechanics.com/cars/hybrid-electric/a11865/the-straight-story-on-the-chevy-volt-battery-fire-6601217/> (accessed on 20 August 2022)

Wöhr, K.-Geisbauer, C.-Nebel, C.-Lott, S.-Schweiger, H. G. (2021). "Crashed electric vehicle handling and recommendations—state of the art in Germany". *Energies*, 14(4), 1040.

Wöhr, K.-Nebel, C.-Lott, S.-Geisbauer, C.-Le Roux, F.-Schweiger, H.-G. (2020) "Handling of accident-damaged electric vehicles". In *Automotive Technologie in Bavaria e-Car + Hydrogen; Media mind GmbH & Co. KG*: Munich, Germany, pp. 16–21. Available online: https://media-mind.info/pdf/2020/automobil_eng_2020.pdf (accessed on 25 November 2020).

Zhang, J.-Su, L.-Li, Z.-Sun, Y.-Wu, N. (2016) "The Evolution of Lithium-Ion Cell Thermal Safety with Aging Examined in a Battery Testing Calorimeter". *Batteries*. 2, 12.

