

BATARYALI ELEKTRİKLİ LASTİKLİ YÜKLEYİCİNİN MİMARİ YAPISININ VE GENEL PLANININ OLUŞTURULMASI

Mustafa KARAHAN

ÖZET

Binek ve ticari araçlardan sonra iş ve inşaat makinelerinde de sıfır emisyonlu, elektrikli varyantlarının tasarlanması ve geliştirilmesi giderek yaygın ve popüler hale gelmektedir. Elektrikli araçların şarj altyapısının oluşturulması, şantiye alanlarında elektrige erişimin mümkün olması iş makinelerinin de elektrifikasyonunu hızlandırmaktadır. Elektrikle çalışan yükleyicilerin işletme maliyeti konvansiyonel dizel makinelere göre oldukça düşük kalmaktadır. Elektrifikasyon projelerinde kullanılan komponentlerin ulaşılabilir olması ve üretim adetlerinin yükselmesi maliyet etkin çözümlere ulaşmayı mümkün hale getirmektedir. Emisyon regülasyonlarının sıkılaşması ayrıca makinelerin elektrifikasyonu teşvik etmektedir.

Bu çalışmada sistemin ana mimari yapısından bahsedilmekte, hidrolik sistem ve güç aktarım paketi motor ve sürücülerinin tespiti, batarya kapasitesi, tipi ve doğru akım gerilimi seviyesinin belirlenmesi, vb. teknik detayları anlatılmaktadır. Batarya tiplerinin teknik farklılıkları, artı ve eksi yönleri araştırılarak karşılaştırılmaktadır. Elektrifikasyon çalışması yapılan aracın dizel konvansiyonel versiyonu ile saha testleri yapılarak veriler elde edilmiştir. Bu veriler sayesinde platformun ihtiyacı olan enerji gereksinimi belirlenmiştir. Batarya kapasitesi ve tipi aracın performansı, verimliliği ve üretkenliği üzerinde önemli etkiye sahiptir. Özellikle batarya paketinin aracı oluşturan güç aktarım, hidrolik sistemler, soğutma sistemi, vs. ile tam bir harmoni içinde çalışması oldukça önem arz etmektedir. Makinenin şantiye alanlarında çalışma koşulları hesaba katılarak, batarya enerji kapasitesinin optimize edilmesi anlatılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli lastikli yükleyici, Elektrifikasyon, Elektrikli iş makinesi, Batarya tipi ve kapasitesi.

ABSTRACT

Besides passenger and commercial vehicles, the design and development of zero-emission, electric variants in construction machinery are becoming increasingly widespread and popular. The creation of a charging infrastructure for electric vehicles, as well as the possibility of accessing electricity at construction sites, is also accelerating the electrification of construction machinery. The operating costs of electrically powered loaders are considerably lower than those of conventional diesel machines. The availability of components used in electrification projects, combined with increased production quantities, makes it possible to achieve cost-effective solutions. The tightening of emission regulations also encourages the electrification of machinery.

In this study, the main architecture of the system is discussed. Technical details, including the determination of the hydraulic system and powertrain motors and inverters, as well as battery capacity, type, and direct current voltage level, are explained. The technical differences, pros, and cons of various battery types are inspected and compared. Data have been obtained by conducting field tests with the diesel conventional version of the vehicle, which underwent electrification work. Thanks to this data, the energy requirement of the platform was determined. Battery capacity and type have a significant impact on the vehicle's performance, efficiency, and productivity. Data have been obtained by conducting field tests with the diesel conventional version of the vehicle, which underwent

electrification work. Thanks to this data, the energy requirement of the platform was determined. Battery capacity and type have a significant impact on the vehicle's performance, efficiency, and productivity. In particular, the battery pack must work in perfect harmony with the powertrain, hydraulic systems, cooling system, etc., that make up the vehicle. Optimizing the battery energy capacity is explained by taking into account the working conditions of the machine on construction sites.

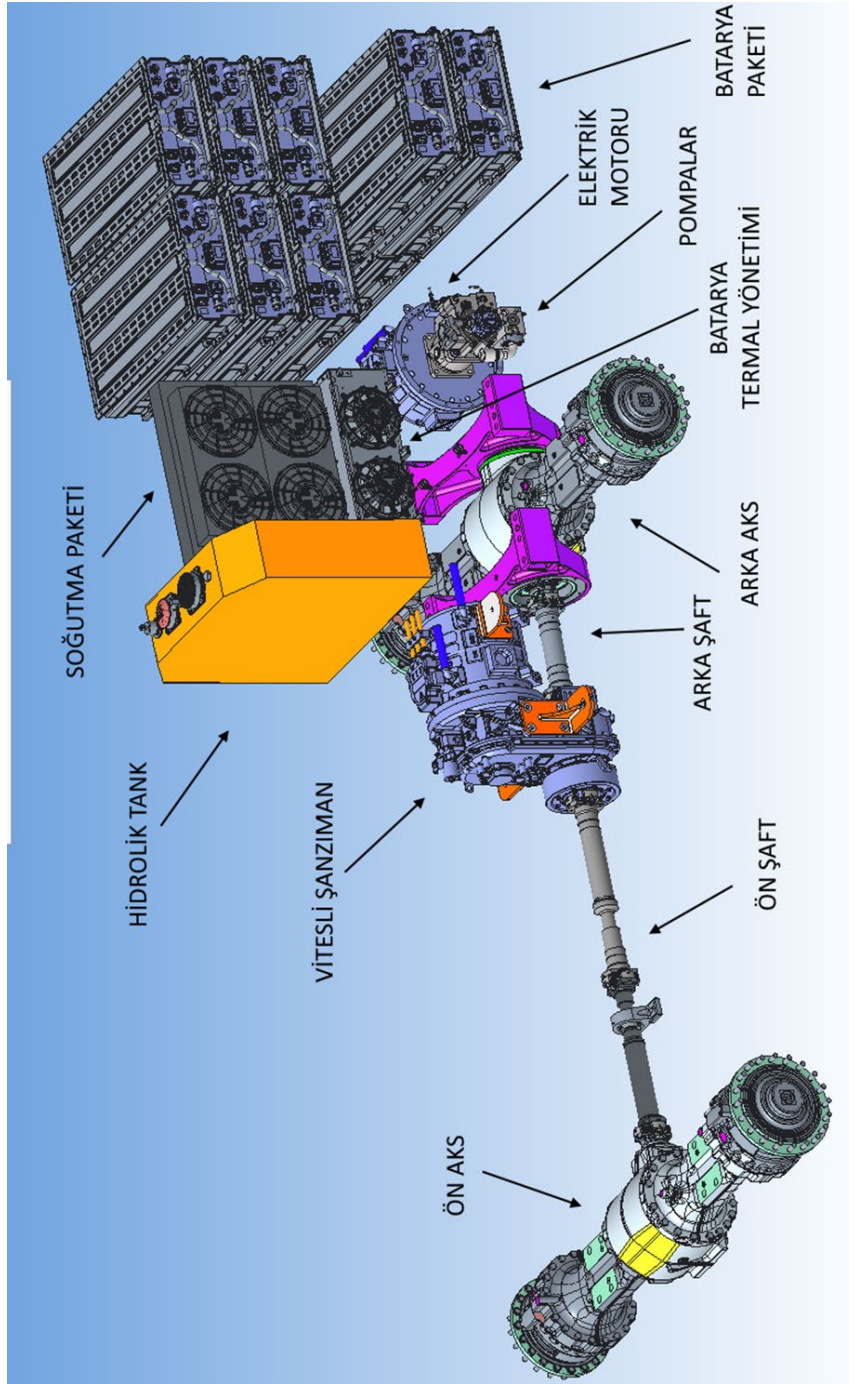
Key Words: Electric wheel loader, Electrification, Electric Construction Machinery, Battery type and capacity.

1. GİRİŞ

Dizel konvansiyonel lastikli yükleyiciler motor şanzıman arasında tork çevirici gibi yaklaşık %70 düşük verimliliğe sahip hidrodinamik kavrama barındırmaktadırlar. Hidrodinamik kavramaların dizel motorun perdövites koşulunda %40 verimliliğin bile altına düştüğü bilinmektedir. Lastikli yükleyiciler için alternatif güç aktarım mimarisinde hidrostatik yürüyüş sistemi ile aracın hareketinin sağlanmasıdır. Hidrostatik sistemler belirli devir aralıklarında düşük verimliliğe sahip olmakta ve bazı koşullarda aracın genel üretkenliği düşmektedir. Her iki mimaride dizel motor hem güç aktarım paketini hem de hidrolik sistemi tahrik etmektedir. Bu tür araçlarda tek kaynaktan iki kullanıcıyı / tüketiciyi sürmek genel verimliliği düşürmektedir. Elektrik motoru ile sürülen güç aktarım paketinde motor şanzıman arasında tork çevirici gereksinimi bulunmamaktadır. Direkt olarak motor şanzımana bağlanabilmektedir ve daha yüksek verimlilik elde edilmektedir. Lastikli yükleyiciler en yaygın Y-çevrim, yükle / taşı, yığın yükleme ve tesviye operasyonlarını gerçekleştirmektedir. Özellikle Y-çevrim ve yükle / taşı çalışma koşullarında sıklıkla fren yapılması gerekmektedir. Dizel motorlu yükleyicilerde frenleme esnasında azımsanmayacak miktarda enerji atmosfere atık ısı enerji olarak atılmaktadır. Ayrıca fren sistemin ortaya çıkan ısı enerji aks yağının ısınmasına ve aksların zarar görmesine sebep olabilmektedir. Elektrikli yükleyiciler fren sistemi enerji geri kazanımı sayesinde ortaya çıkan enerji bataryalarda depolanarak makinenin verimliliği artırılmaktadır. 19 ton sınıfı dizel motorlu lastikli yükleyici ortalama 12-14 litre/saat yakıt tüketirken aynı sınıf elektrikli varyant ise çalışmaya koşullarına göre ortalama 40-48 kWh elektrik enerjisi tüketmektedir. 12 litre dizel yakıt yaklaşık 143 kWh enerji ihtiva etmektedir. Bu rakam değerlendirildiğinde içten yamalı bir makinenin genel olarak ne kadar düşük verimliliğe sahip olduğu anlaşılmaktadır. Araçların işletme maliyetlerine bakıldığında sadece yakıt açısından bile elektrikli versiyonun sadece çevre dostu değil aynı zamanda bütçe dostu olduğu görülmektedir. Yakıt ve enerji maliyeti haricinde dizel egzoz sıvısı (DEF) ve periyodik bakım maliyeti eklendiğinde aralarındaki fark daha artmaktadır.

2. ELEKTRİKLİ LASTİKLİ YÜKLEYİCİ ANA MİMARİ YAPISI

Lastikli yükleyici makineler güç aktarım paketi ve hidrolik sistem olmak üzere iki ana yapıdan oluşmaktadır. Güç aktarım paketi aracın hareketini sağlarken, hidrolik sistem iş ekipmanı, direksiyon ve fren sisteminin ihtiyacı olan hidrolik gücü sağlamaktadır. Elektrikli yükleyici makinede her iki yapı birbirinden bağımsız elektrik motorları tarafından sürülmektedir. Konvansiyonel dizel araçlarda güç kaynağı içten yanmalı motordur, sistem tek kaynaktan beslenmektedir ve genel verimlilik düşüktür. Güç aktarım paketi ve hidrolik sistemin münferit bağımsız elektrik motorlar ile tahrik edilmesi makinenin verimliliğini yükseltmektedir. Aracın elektrik enerjisi batarya paketi tarafından sağlanmaktadır. Güç gereksinimin yüksek olduğu bu tür araçlarda doğru akım voltaj seviyesinin yüksek olması ve nispeten akım değerinin düşük olması elektrik sistem verimliliği yükseltmektedir. Güç aktarım paketi elektrik motoru ile sürülen merkezi bir şanzıman ile tahrik edilmektedir. Lastikli yükleyici platformlarında çalışma koşullarına göre ön ve arka aksa gelen yük miktarı değişkenlik gösterdiği için her iki aksın merkezi bir şanzıman tarafında tahrik edilmesi en ideal seçeneklerden birisidir. Elektrikli binek araçlarda şanzıman yapısı genel olarak tek kademeli basit bir redüktör iken, yüksek çekiş kuvvetine ve belirli bir yürüyüş hızına ihtiyaç duyan lastikli



Şekil-2. Elektrikli lastikli yükleyicinin ana mimari yapısı

3. BATARYA GERİLİM VE AKIM SEVİYESİ

Batarya paketi sistemi oluşturan diğer komponentler ile tam bir uyum içinde olması ve aracın güç ve enerji gereksinimlerini karşılaması gerekmektedir. 800 V gerilime sahip yeni nesil batarya paketleri oldukça yüksek genel sistem verimliliği sağlamaktadır. Elektrikli araçlarda gerilim seviyesi yükseldikçe hatlardaki kayıplar azalır, verimlilik artar. Ancak lastikli yükleyici ve benzer iş makineleri platformlarına motor ve sürücülerini tedarik edilebilirliği ve maliyeti hesaba katıldığında günümüz şartları için en ideal

seçenek 800 V olamayabilir. Bu sistem tedarik edilebilirlik açısından 650 V nominal, 730 V maksimum batarya gerilimine seviyesine sahip mimari yapıda dizayn edilmiştir. Elektrik gücü, gerilim ve akım çarpanlarından oluşmaktadır. Aracın daimî ve pik güç gereksinimi karşılamak için batarya paketinin yeterli deşarj akımına (discharge C-rate) sahip olması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında 19 ton boş ağırlığa sahip lastikli yükleyici platformu baz alınmıştır. Firma bünyesinde üretim hattında olan konvansiyonel dizel motorlu yükleyici ile muhtelif çalışma koşullarında testler yapılarak makinenin güç ve enerji gereksinimi belirlenmiştir. Yükleyiciler en yaygın olarak V-çevrim, yükle ve taşı, yığın yükleme, tesviye, vb. operasyonlarda çalışmaktadır. Testler neticesinde aracın ortalama daimî güç gereksiniminin 180 kW, kısa süreli pik 240 kW olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan analitik hesaplamalar ile bu rakamlar doğrulanmaktadır. Batarya paketinin yüksek strese maruz kalmaması ve hızlı yaşlanmaması için şarj ve deşarj akımlarının bataryanın kapasitene uygun olmalıdır.

4. GÜÇ AKTARIM VE HİDROLİK SİSTEM MOTOR VE SÜRÜCÜLERİNİN BELİRLENMESİ

Güç aktarım paketi motor ve sürücülerini aracın sahip olması gereken maksimum çekiş gücü ve ulaşması gereken yürüyüş hızları parametreleri hesaba katılarak tespit edilmektedir. Çekiş gücü elektrik motor tork ve hız değerlerini belirlerken batarya paketin bu motor tork ve hız çıktılarını sağlayacak akım ve gerilim değerini sağlaması gerekmekte ve batarya nominal ve maksimum akım ve gerilim değerleri sistemin gereksinimleri ile uyum içinde olmalıdır. Bataryanın maksimum şarjlı gerilim değeri motor sürücüsünün kapasitesinin üzerinde ise sürücünün hızlı bir şekilde yaşlanmasına, batarya nominal gerilim değeri motor sürücülerinin gereksinim altında ise motordan beklenen performansın alınmasına engel olabilmektedir. Hidrolik sistem pompalarını tahrik eden motor ve sürücüsü, sistemin ihtiyacı olan debi ve basınç çıktıklarına göre belirlenir. Pompa deplasmanı ve basıncı motor torkunu belirlerken, debi ve basınç çarpanı motor gücünü tayin etmektedir. Hem güç aktarım hem de hidrolik sistemden elde edilen iş çevrimi (duty cycle) verileri simüle edilerek motor ve sürücülerin yük altındaki davranışları tespit edilebilir. Motor sargıları için yükün şiddetinin yanı sıra ne kadar süre ve sıklıkta olduğu oldukça önem arz etmektedir. (1) ve (2) numaralı eşitlikler güç aktarım paketi gereksinimini analitik olarak hesaplamak için kullanılır.

$$F_t = \frac{T_M \times I_T \times I_A \times \eta_T \times \eta_A \times \eta_S}{R_W} \quad [N] \quad (1)$$

$$P_{TM} = \frac{F_t \times V}{1000 \times \eta_T \times \eta_A \times \eta_S} \quad [kW] \quad (2)$$

F_t : Çekiş kuvveti [N]
 η_T : Şanzıman verimliliği
 η_A : Aks verimliliği
 η_S : Şaft verimliliği
 R_W : Tekerlek yarı çapı [m]
 I_T : Şanzıman çevrim oranı
 I_A : Aks çevrim oranı
 P_{TM} : Şanzıman elektrik motor çıkış gücü [kW]
 V : Aracın hızı [m/sn]

$$P_P = \frac{Q \times \Delta P}{600 \times \eta_{PT}} \quad [kW] \quad (3)$$

$$P_P = \frac{V \times n \times \eta_V \times \Delta P}{1000 \times 600 \times \eta_{PT}} \quad [kW] \quad (4)$$

$$T_P = \frac{V \times \Delta P}{20 \times \pi \times \eta_{HM}} \quad [\text{Nm}]$$

(5)

$$E = P_P \times t \text{ veya } P_{TM} \times t \quad [\text{kWh}]$$

(6)

P_P : Pompa gücü [kW]

E : Enerji [kWh]

t : süre / zaman

ΔP : Basınç farkı [bar]

Q_F : Pompa debisi [lt/dk]

V : Pompa deplasmanı [cm^3]

T_P : Pompa Torku [Nm]

η_{HM} : Hidro-mekanik verimlilik

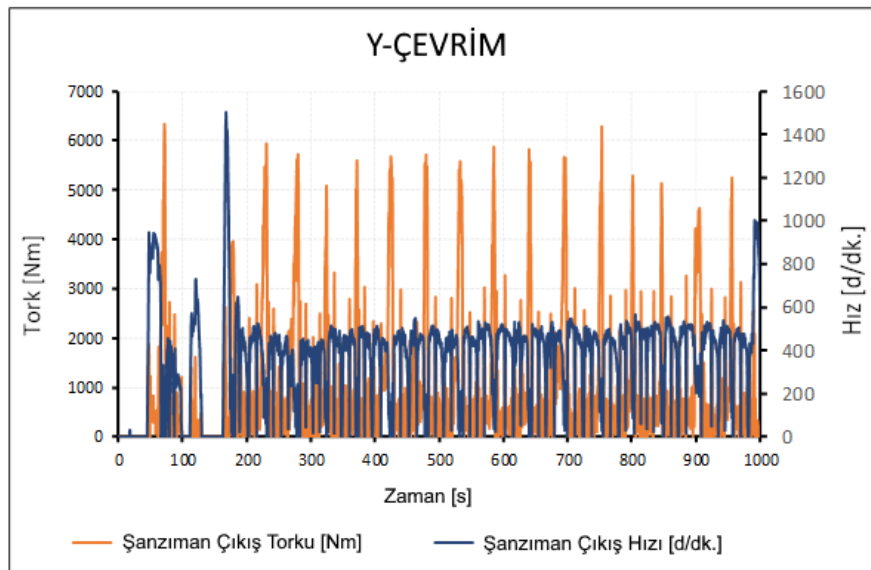
η_{PT} : Pompa toplam verimliliği

η_V : Pompa volümetrik verimliliği

5. BATARYA KAPASİTESİ

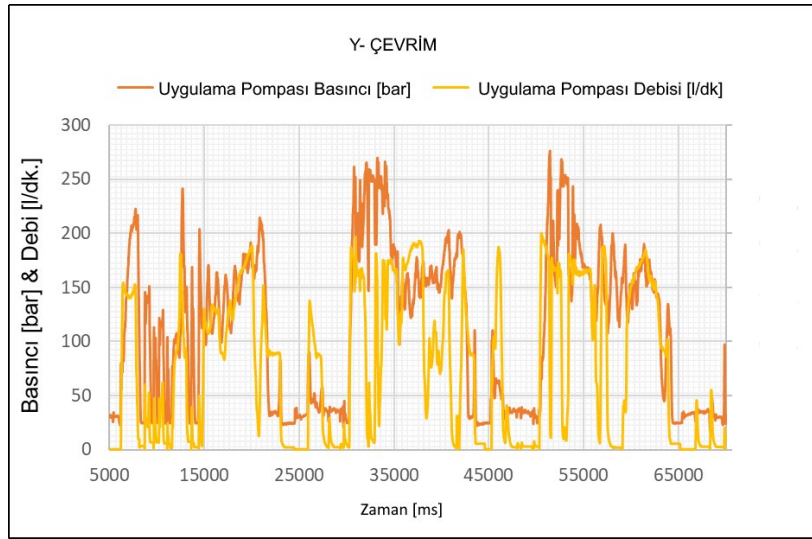
Lastikli yükleyicilerin batarya kapasitesini belirleyen çeşitli parametreler; ortalama enerji tüketimi, ortalama ve anlık güç talebi, vardiya başına ve molalar arasında gereken minimum çalışma saatleri, çalışma ortamı, ortam sıcaklığı, batarya paketi için ayrılan hacim vb.'dir. İlk olarak, ortalama enerji tüketimi ve güç talebini göz önünde bulundurarak çalışma koşullarını tanımlamak gerekmektedir.

Batarya kapasitesini belirlemede temel yaklaşım, vardiya çalışma saatleri ve molalar arasındaki süreyi tespit etmektir. Lastikli yükleyiciler genellikle yaklaşık 8-9 saat vardiya aralıklarında çalışmaktadır. Makine 4,5-5 saat çalıştıktan sonra, bir saatlik dinlenme molası verilmektedir. Bu çalışma için test edilen yükleyicinin ağırlığı 19 ton ve kova hacmi $3,2 \text{ m}^3$ tür. Güç aktarımının Y-çevrim test verileri Şekil 3' de gösterilmiştir. Tork ve hız değerleri kullanılarak güç hesaplanmıştır (1) ve (2). Y-çevriminin pompa debi ve basınç değerleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 5.' de tesviye esnasında tesviye şartları için şanzıman çıkış hız ve tork değerleri gösterilmektedir.

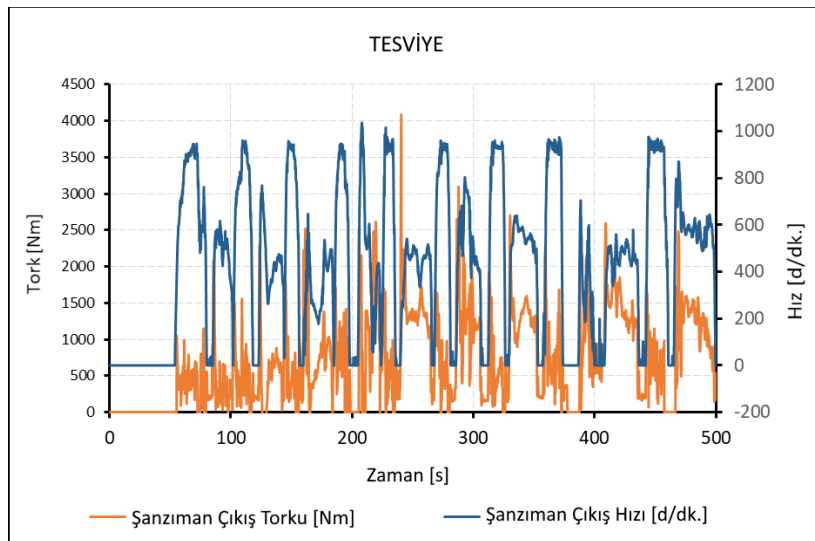


Şekil-3. Y-Çevrim test şanzıman test verileri

Hidrolik sistemin gücü, debi ve basınç değerleri (3) , (4) eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Enerji değeri, güç ve zaman çarpanlarından oluşur ve hesaplanır (6). Y-çevrim, yığın yükleme, tesviye ve yükle/ taşı dahil olmak üzere test verilerine göre, makine çeşitli çalışma koşullarında saatte ortalama 40 kWh enerji tüketmektedir. Ancak ağır hizmet koşulları ve çok soğuk veya sıcak ortam şartları hesaba katıldığında, ortalama enerji tüketimi 48 kWh' a kadar yükselmektedir. Daha iyi yaklaşım ise makinenin yüksek enerji tüketim koşullarını dikkate almaktır. Vardiyanın başlangıcından molaya kadar olan 5 saatlik bir çalışma süresi için enerji tüketimi 240 kWh' e eşittir. Yüksek performans ve uzun batarya ömrü için lityum bataryaların toplam kapasitenin en fazla %95 şarj ve %15 altına deşarj edilmemesi önerilmektedir. Bu nedenle batarya paketinin toplam brüt kapasitesi 300 kWh, net kapasitesi ise 240 kWh olarak belirlenmiştir. Brüt kapasite 300 kWh' den yüksek olabilir. Ancak, kritik parametrelerden biri makinenin genel maliyetidir. Yüksek kapasite aracın genel maliyetini artırmaktadır ve kapasitenin optimum değerde olması gerekmektedir. Diğer taraftan yüksek güçlü DC şarj istasyonu şantiye ve inşaat alanlarında kurulu olmama ihtimaline karşın 350-370 kWh gibi yüksek enerji depolama kapasitesi olan batarya paketlerinin opsiyon olarak sunulması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.



Şekil-4. Y-Çevrim hidrolik sistem test verileri



Şekil-5. Tesviye şanzıman test verileri

6. BATARYA TİPİ

Batarya tipi, inşaat makinelerinin elektrifikasyonunda önemli bir rol oynar. Batarya tipini belirleyen faktörler enerji yoğunluğu, şarj çevrim sayısı, maliyet etkinliği, güvenlik, şarj ve deşarj oranı (C-Rate), termal kararlılık, çalışma ortam sıcaklığı vs. dir. Bu çalışmada, en yaygın üç batarya tipi incelenmiştir. Bunlar NMC, LFP ve LTO' dur. Bölüm 5. 'de, kısıtlardan biri olan batarya kapasitesi 300 kWh olarak kararlaştırılmıştır. Performans açısından bakıldığında, en iyi çevrim ömrüne sahip olan LTO bataryalar iyi bir seçenek gibi görünmektedir. Ancak, enerji yoğunluğu açısından kolayca uygulanamazlar. Enerji kapasitesi 300 kWh olduğundan, LTO batarya makinedeki enerji depolama bölümünün alanına sığmaz. Ayrıca, LTO seçeneğinin maliyeti rekabetin oldukça yoğun olduğu bu sektörde uygulanabilir değildir. NMC ile LFP karşılaştırıldığında, NMC bataryalar enerji yoğunluğu, sıcaklık aralığı ve deşarj oranı açısından daha avantajlı görünmektedir. Ancak maliyet etkinliği, termal kararlılık, şarj çevrim sayısı ve güvenlik açısından NMC bataryalar en iyi seçenek değildir. LFP bataryalar ise daha fazla hacme ihtiyaç duyar ve düşük ortam sıcaklıklarında yüksek performansta çalışamazlar. Araç platformunun detaylı bir şekilde incelenmesi gerekir. Örneğin, batarya paketi için ne kadar alanın mevcut olduğu sorusunun cevabı önemlidir. Bu çalışmada incelenen araçta LFP paket batarya için ayrılan hacme sığabildiği görünmektedir. Makinenin çalışma ortam sıcaklığı aralığı -30°C ile 50°C arasında değişmektedir. Bu aralık LFP hücreler için uygun değildir. Dolayısıyla, makine bataryalarının ısıtılmasını ve soğutulmasını içeren çok yönlü bir termal yönetim sistemi barındırıyorsa, LFP bu elektrikli araç için optimum batarya tipi olabilir. Özellikle düşük sıcaklıklarda batarya iç direnci artmakta hem şarj hem de deşarj esnasında verimliliği düşmektedir. Buradaki en önemli kriterlerden birisi de deşarj oranıdır. Aracın toplam güç gereksinimi incelendiğinde 300 kWh kapasitenin, ihtiyacı karşıladığı görülmektedir. Ayrıca, pazarda bu tür makinelerin en az 15.000 saat, ideal olarak 20.000 saat kullanım ömrüne sahip olması beklenmektedir. 5 saatlik deşarj süresine ve ortalama 4.000 çevrim ömrüne sahip LFP akü paketi müşteri beklentilerini karşılayacaktır. Bataryaların karşılaştırması Tablo 1. 'de gösterilmiştir.

Tablo-1. Batarya tiplerinin karşılaştırılması

	NMC	LFP	LTO
Hücre Tipi	Nikel Mangan Kobalt	Lityum Demir Fosfat	Lityum Titanyum Oksit
Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	Yüksek	Orta	Düşük
Şarj Çevrim Sayısı	1.000-3.000	2.000-6.000	6.000- 10.000 üzeri
Maliyet Etkinliği	Orta	Yüksek	Çok Düşük
Güvenlik	Orta	Yüksek	Çok Yüksek
Şarj Oranı (C-Oranı)	1C	1C	1C-5C
Deşarj Oranı (C-Oranı)	1C-2C	1C	10C
Termal Kararlılık	Orta	Yüksek	Çok Yüksek
Sıcaklık Aralığı	İyi	Orta	Çok İyi

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında tam elektrikli bataryalı lastikli yükleyici makinenin elektrifikasyonu anlatılmıştır. Makinenin ana mimarisi oluşturulmuş ve sistemin geneli hakkında bilgi verilmiştir. Konvansiyonel dizel motorlu makinenin hangi sebeplerden dolayı düşük verimliliğe sahip olduğu ifade edilmiştir. Elektrikli bir yükleyicinin dizel konvansiyonel makineye göre kıyaslaması yapılmış ve neden daha verimli çalıştığı anlatılmıştır. Yakıt tüketimi ve elektrik enerjisi tüketim değerleri tespit edilerek mukayese edilmiştir. Elektrikli yükleyici oluşturan komponentler incelenmiştir. Yüksek gerilim hattı voltaj seviyesi tespit edilmiştir. Farklı çalışma koşulları hesaba katılarak batarya kapasitesi belirlenmiş ve seçim kriterleri tartışılmıştır. Farklı lityum batarya hücre tipleri karşılaştırılmış ve artı ve eksileri

değerlendirilmiştir. Üzerinde çalışılan platform için ideal lityum batarya tipi belirlenmiştir. Teknik içerikli bir çalışma olmasının yanı sıra ihtiva ettiği bilgiler ticari uygulanabilir minvaldedir.

KAYNAKLAR

- [1] KARAHAN, M., FIÇICI, F., “Konvansiyonel Yapıya Sahip Lastikli Yükleyici Makinenin Elektrifikasyonu ve Seri Hibrit Topolojisine Sahip Makine Mimari Yapısının Tasarımı” HPKON 2022.
- [2] KARAHAN, M., “Determination of Battery Capacity and Type in Electric Wheel Loader Machines Considering Variable Operating Conditions” ICATI 2024
- [3] Tong, Z., Miao, J., Li, Y., Tong, S., Zhang, Q., Tan, G., “Development Of Electric Construction Machinery in China: A Review Of Key Technologies and Future Directions” Journal of Zhejiang University-SCIENCE A March 11, 2011
- [4] Huang, X., Huang, Q., Cao, H., Wang, Q., Yan, W., Cao, L., Battery Capacity Selection for Electric Construction Machinery Considering Variable Operating Conditions And Multiple Interest Claims” ELSEVIER April 8, 2023
- [5] Fei, X., Han, Y., Wong, S. V., Azman, M. A., Shen, W., “Design and Testing of Innovative Type of Dual-Motor Drive Electric Wheel Loader” Energies 2024

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa KARAHAN

1983 Erzurum doğumludur. 2004 yılında Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2007 yılında aynı üniversitenin Makine Mühendisliği Mekanik Anabilim Dalından yüksek lisansını tamamladı. Yapısal, hidrolik sistem, elektrifikasyon ve güç aktarım paketi tasarım ve projelendirme alanlarında çalışmalar yapmıştır. 2016 yılından beridir Hidromek Ar-Ge Merkezi, Lastikli Yükleyici Mühendislik departmanında çalışmakta ve Mart 2018’ den beridir bölüm mühendislik yönetici olarak görev yapmaktadır.