



KONVANSİYONEL YAPIYA SAHİP LASTİKLİ YÜKLEYİCİ MAKİNEİN ELEKTRİFİKASYONU VE SERİ HİBRİT TOPOLOJİSİNE SAHİP MAKİNE MİMARİ YAPISININ TASARIMI

*ELECTRIFICATION OF THE CONVENTIONAL WHEEL LOADER AND ARCHITECTURAL DESIGN OF THE MACHINE
WITH SERIAL HYBRID TOPOLOGY*

Mustafa Karahan
Ferhan Fıçıcı

ÖZET

Bu çalışma kapsamında konvansiyonel tork çeviriciye sahip güç aktarım paketi ve hidrolik sistem pompaları içten yanmalı motor volanından tahrik edilen lastikli yükleyicinin elektrifikasyonu, güç aktarım paketi çekiş kuvveti ve ana hidrolik sistem gereksinin hesaplarının yapılması, elektrik motoru ile sürülen şanzımanın, hidrolik pompaların ve enerji depolama aygıtı süper kapasitörlerinin makineye entegrasyonu anlatılmaktadır.

Lastikli yükleyici makinelerde kullanılan tork çeviriciler (hidro-dinamik kavrama) yaklaşık %70 verimlilikte çalışmaktadır. Motor volanından alınan enerjinin yaklaşık %30' u faydalı işe dönüştürülmeden şanzıman yağ soğutucusu ile atmosfere ısı olarak atılmaktadır. Hibrit makinede tork çeviricili bir şanzımana ihtiyaç kalmamaktadır. Elektrik motorları şanzımanı direkt olarak tahrik edebilmektedir. Konvansiyonel makinelerde, dizel motor sürekli değişen ve verimliliğinin düşük olduğu yüksek hızlarda çalışmak durumundadır. Hibrit makinede dizel motor daha stabil ve verimliliğin en yüksek olduğu hız aralığında çalışabilmektedir. Aynı kaynaktan (dizel motordan) iki farklı kullanıcının (güç aktarım paketi ve hidrolik sistem pompalarının) sürülmesi makine genel verimliliğini ayrıca düşürmektedir. Hibrit makinede iki ayrı kullanıcı (güç aktarım paketi ve hidrolik sistem pompaları), birbirinden bağımsız elektrik motorları tarafından sürülebilecek ve böylece sistemin daha verimli çalışması sağlanacaktır. Tipik lastikli yükleyici çalışma koşullarında fren sistemi sık sık ve yoğun olarak kullanılması gerekmektedir. Frenleme esnasında aracın kinetik enerjisi ısıya dönüşerek atmosfere atılmaktadır. Hibrit yükleyici makinede fren sisteminden geri kazanılan enerji süper kapasitörlerde depolanarak tekrar faydalı işe dönüşmek üzere sistemde kullanılabilir. Bu çalışmada makinenin üretkenliğinden ödün vermeksizin, çok daha yüksek verimliliğe, düşük yakıt tüketimine, emisyon ve gürültü seviyesine sahip hibrit lastikli yükleyici makine tasarımı amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrifikasyon, Lastikli yükleyici, Hibrit elektrikli araç, Hibrit elektrikli lastikli yükleyici, Elektrik dönüşümü

ABSTRACT

In this study, electrification of a wheel loader with a conventional torque convertor and its power train package and hydraulic pumps driven by the flywheel of the internal combustion engine, calculations of the hydraulic system and tractive effort of the power train, integration of supercapacitors, which are energy storage devices, are mentioned.

Torque convertors, which are hydrodynamic clutches, used on wheel loaders run at approximately 70 % efficiency. 30% of the energy coming from the flywheel of the engine is released into the atmosphere through the transmission oil cooler without converting to the useful work. There is no need for a transmission with a torque convertor in the hybrid machine and electric motors can drive

the transmission directly. In the conventional machines, diesel engines run at continuously variable speeds and the high-speed ranges where the efficiency is low. In the hybrid machine, the diesel engine can run at more stable and the most efficient speed range. Besides, driving two different consumers, which are the power train and hydraulic system, by one source, the diesel engine also decreases the efficiency. In the hybrid machine, the two different consumers, which are the power train and hydraulic system are driven by independent electric motors and thereby providing the system runs more efficiently. In the typical implementations of wheel loaders, the brake system is needed to use often and intensively. During braking, the kinetic energy of the vehicle is released into atmosphere by converting to the heat. In the hybrid loader machine, the regenerative energy recovered from the brake system is stored in the supercapacitors and then it is used in the system to turn into useful work. In this study, the design of a hybrid wheel loader machine with much more efficiency, low fuel consumption, emission and noise level without compromising the productivity of the machine.

Key Words: Electrification, Wheel loader, Hybrid electric vehicle, Hybrid electric wheel loader, Electric conversion

1. Konvansiyonel Lastikli Yükleyici Makine

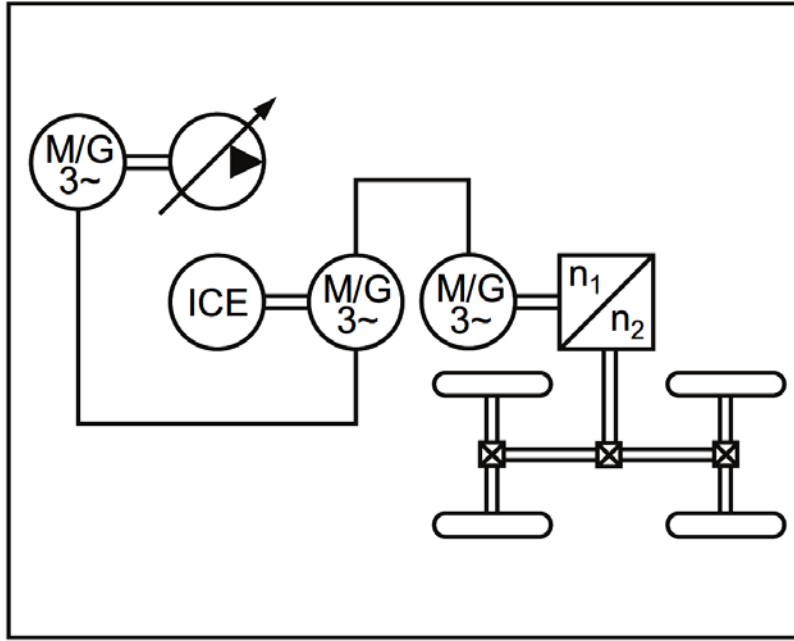


Şekil 1. Konvansiyonel lastikli yükleyici makine.

Lastikli yükleyiciler hafriyat alanında veya endüstriyel tesislerde, ön tarafa konumlandırılmış kepçesi ile yükü alarak başka bir araca veya yere taşımaya sağlayan makinelerdir. Kepçe hacim ve boş ağırlıklarına göre sınıflandırılmaktadırlar. Dizel motor aracın yürüyüş için tahrikini sağlar ve hidrolik sistemin çalışmasını sağlayan pompaları sürer. En yaygın çalışma şekilleri; V / Y çevrim, yığın yükleme, tesviye, yükle ve taşıdır.

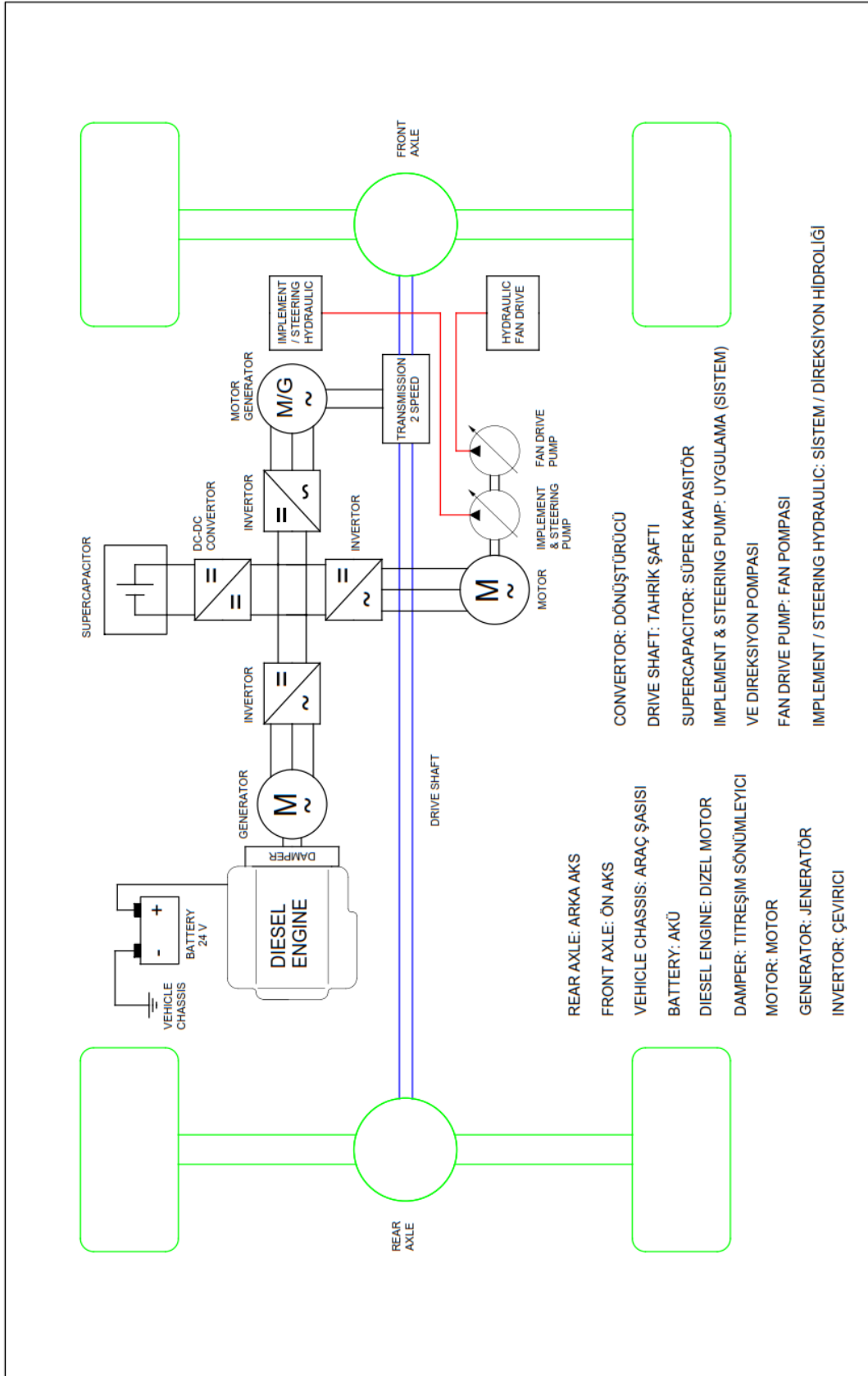
2. Konvansiyonel Makinenin Elektrifikasyonu

Dizel motor ile tahrik edilen güç aktarım paketi ve hidrolik sistem elektrik motorları ile sürülmektedir. Bu çalışmada mimari yapı seri hibrit topolojisine uygun olarak tasarlanmıştır. Elektrik motorları güç aktarım paketi ve hidrolik sistemi münferit olarak sürmektedir. Seri hibrit yapı (Şekil-2), iki farklı kullanıcının (güç aktarım paketi ve hidrolik sistem) iki ayrı elektrik motoru tarafından sürülmesi sebebiyle yüksek verimliliğe sahiptir.



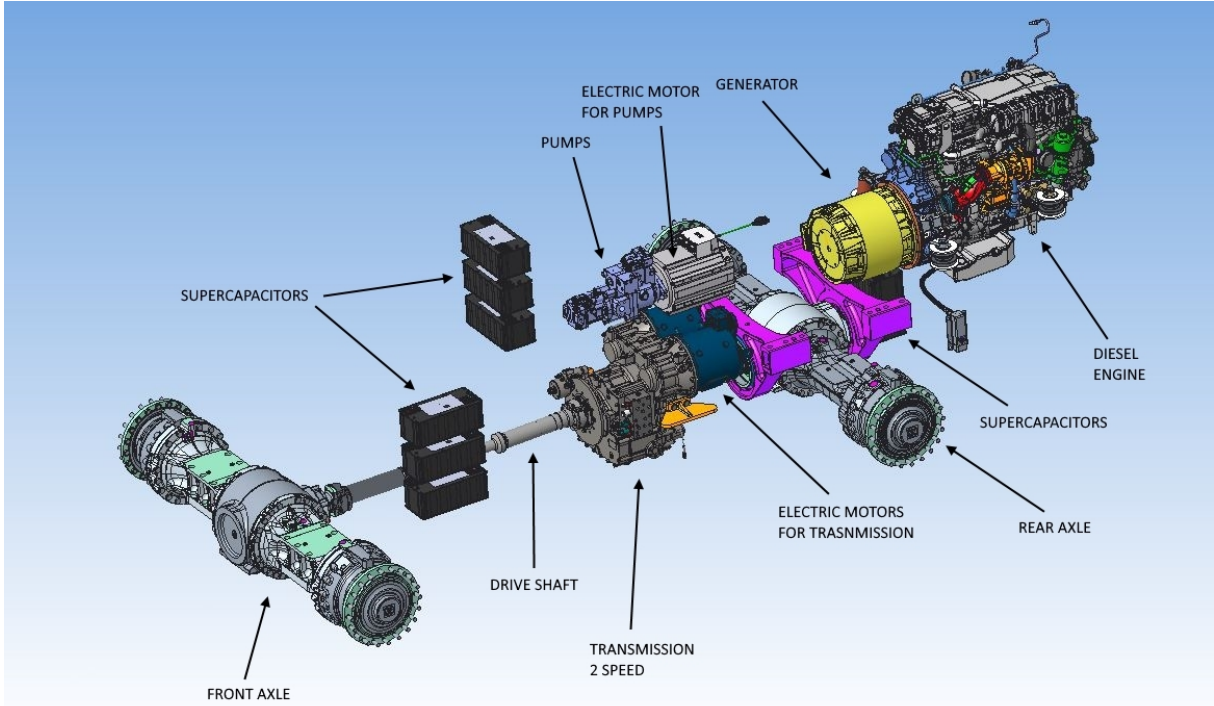
Şekil 2. Seri Hibrit Topoloji

Şekil-3' deki Hibrit lastikli yükleyicinin genel planından da görüldüğü gibi; dizel motor, konvansiyonel makineden farklı olarak direkt şanzıman ve hidrolik pompaları sürmek yerine sistemde jeneratörü sürmekte ve elektrik enerji üretmektedir. Elektrik enerjisi güç aktarım paketi ve hidrolik sistem pompalarını süren elektrik motorlarına enerji sağlamaktadır. Jeneratörde elektrik enerjisi 3 fazlı alternatif akım olarak üretilmekte ve sistemdeki çevirici sayesinde doğru akıma dönüşmektedir. Sistem doğru akım voltajı 700 V DC dir. Sistemdeki çeviricileri arasında enerji doğru akım olarak iletilmektedir. Elektrik motoru çeviricileri hem hattaki doğru akımı alternatif akıma çevirmekte hem de motorlara sağlanan gerilimi ayarlayarak hız ve güç kontrolü sağlanmaktadır.



Şekil 3. Hibrit Lastikli Yükleyici Genel Planı

Şanzımanı süren elektrik motorları aynı zamanda jeneratör olarak çalışmakta, fren esnasında direnç göstermekte ve elektrik enerjisi üretmektedir. Fren geri dönüşüm enerjisi sistemde daha sonra kullanılmak üzere süper kapasitörlerde depolanmaktadır. Süper kapasitörler lityum bataryalara göre yüksek yoğunluklu anlık enerji depolamada ve tekrar sisteme sağlamada daha yüksek verimliliğe ve istikrara sahiptir. Daha düşük ve yüksek ortam sıcaklıklarında lityum bataryalara göre daha verimli çalışmaktadır. Ayrıca şarj, deşarj çevrim sayıları ve ömürleri oldukça yüksektir. Bu sistemdeki en önemli görevlerinden birisi aracın anlık yüksek güç ihtiyacını için jeneratöre destek sağlayarak dizel motorun yüksek güç verdiği verimsiz bölgede çalışmasına engel olmaktadır. Doğru akım çeviricisi, sistem ve süper kapasitörlerin çalışma voltajı arasındaki regülasyonu sağlamaktadır. Süper kapasitörler makinenin yaygın çalışma koşulları ve fren geri kazanım enerjisi miktarı değerlendirilerek kapasitesi belirlenmiştir.



Şekil 4. Hibrit Lastikli Yükleyici Mimari Yapısı

Değişken deplasmanlı sistem uygulama / direksiyon ve fan hattı pompaları tandem olarak elektrik motoruna bağlanmaktadır. Değişken deplasmanlı her iki pompanın eş zamanlı farklı debi gereksinimleri aynı elektrik motor tarafından sağlanabilmektedir. Birçok elektrikli binek araçta, elektrik motorları devir hızına karşın sürekli tork sağlaması sebebiyle sistemde kademeli dişli kutusuna ihtiyaç kalmamaktadır. Ancak lastikli yükleyici veya benzer yapıya sahip iş makinelerinde düşük hızlardaki yüksek çekiş kuvveti ihtiyacı kademeli bir şanzıman ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Yükleme esnasında kepçenin hafriyata tam penetrasyonu için ve kepçe ile yığma yaparken yüksek çekiş kuvveti gerekmektedir.

3. Güç Aktarım Paketi Karşı Dirençlerin Hesaplanması

Yürüyüş esnasında aracın elektrik motorları lastik yer arasındaki sürtünmeye (yuvarlanma), yer çekimine ve hava direncine karşı iş yapmaktadır. Motor torku ve gücü belirlenirken karşı dirençlerin toplamı göz önünde bulundurulmaktadır. Belirli sürüş koşullarında aracın ivmelenebilmesi için çekiş kuvvetinin karşı dirençlerin toplamından daha fazla olması gerekmektedir. Hesaplamalarda hava sürtünme direncinin iş makinesi ve benzer araçlarda hızın düşük olması sebebiyle ihmal edilebileceğini görülmektedir. Karşı dirençlerin toplamı (R_T, N) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$R_T = R_g + R_r + R_a \quad [\text{N}] \quad (1)$$

$$R_g = W_T \times g \times \sin \Theta \quad [\text{N}] \quad (2)$$

$$R_r = W_T \times g \times \cos \Theta \times F_r \quad [\text{N}] \quad (3)$$

$$R_a = \frac{1}{2} \times \rho \times C_D \times A_f \times V^2 \quad [\text{N}] \quad (4)$$

R_T : Karşı direnç kuvvetlerinin toplamı [N]

R_g : Yer çekiminin oluşturduğu kuvvet [N]

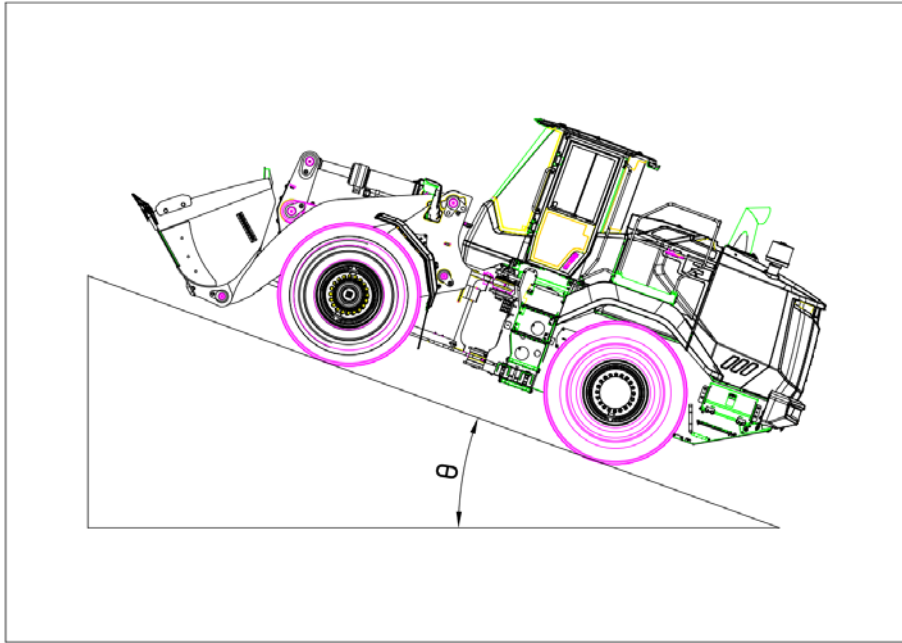
R_r : Yuvarlanma sürtünme kuvveti [N]

F_r : Yuvarlanma sürtünme katsayısı

R_a : Hava direncinin oluşturduğu kuvvet [N]

W_T : Aracın yüklü ağırlığı [kg]

g : Yerçekimi ivmesi [m/sn^2]



Şekil 5. Tırmanma açısı gösterimi

ρ : Havanın yoğunluğu $1,225 \text{ kg/m}^3$ (deniz seviyesinde, 15° sıcaklıkta)

C_D : Hava direnci katsayısı

A_f : Aracın hava direncine maruz alanı (iz düşüm alanı) [m^2]

V : Aracın hızı [m/sn]

Θ : Tırmanma açısı [derece]

4. Güç Aktarım Paketi Çekiş Kuvveti Hesaplanması

Lastikli yükleyici makinelerde çekiş kuvveti makinenin yürüyüş, tırmanma ve hafriyata nüfuz kabiliyetini belirlediği için önem taşımaktadır. Yapılan araştırma ve testlere göre, araç ağırlığının %90 ile 95 arası tekabül eden rakam, maksimum çekiş kuvveti olarak lastikli yükleyiciler için ideal olarak kabul edilmektedir. Örnek olarak; $W_E = 21.000 \text{ kg}$ boş ağırlığa sahip bir araç için $F_{Tmax} = W_E \times g \times 0,9 \sim$



0,95. $F_{Tmax} = 21.000 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m /sn}^2 \times 0,9 \sim 0,95 = 185.409 \text{ N}$ ile 195.709 N arasında ideal maksimum çekiş kuvveti olarak kabul edilebilir. Yüksek çekiş kuvveti özellikle yükleme esnasında kovanın hafriyata nüfuz etmesi ve hafriyatı yükleyebilmesi için gerekmektedir. Hesaplamalarda yüklü maksimum eğimde tırmanma şartları da dahil en yüksek toplam dirençleri yenecek çekiş kuvvetinin olması gerekmektedir ($F_t \geq F_{Tmax} \& R_t$).

$$F_t = \frac{T_M \times I_T \times I_A \times \eta_T \times \eta_A \times \eta_S}{R_W} \quad [\text{N}] \quad (5)$$

$$P_{TM} = \frac{F_t \times V}{1000 \times \eta_T \times \eta_A \times \eta_S} \quad [\text{kW}] \quad (6)$$

F_t : Çekiş kuvveti [N]

F_{Tmax} : Maksimum 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]

5. Hidrolik Güç ve Tork Hesabı

Hidrolik sistemi süren elektrik motoru gereksiniminin belirlenmesi için tork ve güç hesabı yapmak gerekmektedir. Elektrik motoru pompaların ihtiyacı olan tork ve gücü sağlaması gerekmektedir. Uygulama / direksiyon pompası ve fan pompası güç ve torkları toplanarak toplam güç ve tork ihtiyacı bulunur. Elektrik motorunu sağladığı güç ve tork minimum sistem gereksinimi kadar olmalıdır.

$$P_P = \frac{Q \times \Delta P}{600 \times \eta_{PT}} \quad [\text{kW}] \quad (7)$$

$$P_P = \frac{V \times n \times \eta_V \times \Delta P}{1000 \times 600 \times \eta_{PT}} \quad [\text{kW}] \quad (8)$$

$$T_P = \frac{V \times \Delta P}{20 \times \pi \times \eta_{HM}} \quad [\text{Nm}] \quad (9)$$

P_P : Pompa gücü [kW]

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



SONUÇ

Dizel motordan direkt tahrik edilen konvansiyonel yapıya sahip lastikli makinenin elektrik motorlarıyla sürülmesi ve elektrifikasyonu anlatılmıştır. Seri hibrit topolojisine uygun mimari sistem diyagramı oluşturulmuş ve 3D modellemesi yapılmıştır. Güç aktarım paketi çekiş kuvveti ve hidrolik sistem gereksinim hesabı anlatılmıştır. Elektrik motorları tork ve güç ihtiyacı belirlenmiştir. Enerji depolama aygıtı süper kapasitörlerin sisteme entegrasyonu anlatılmıştır. Bu çalışmada verimlilik artışı ile konvansiyonel yapıdaki eşdeğer çalışma ağırlığına ve kapasitesine sahip lastikli yükleyiciye göre üretkenlikten ödün verilmeksizin yaklaşık %25 kadar daha az yakıt tüketimi sağlayacağı öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 3191122 kodlu proje ile desteklenmiştir. Desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Filla, R. Hybrid power systems for construction machinery: aspects of system design and operability of wheel loaders. *In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2009; 43864: 611-620.
- [2] Kumaş, H., Gencer, Maraş, C., *Ağır araçlar için yol eğimi ve viraj yarıçapı dikkate alınarak en hızlı güzergâhın belirlenmesi*, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Vol 27, No 2, 385-395, 2012
- [3] Rexroth Axial piston variable pump A10VO series 32, RE 92705/2021-08-25

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 ve güç aktarım paketi tasarım ve projelendirme alanlarında çalışmalar yapmıştır. 2016 yılından beridir Hidromek Ar-Ge Merkezi, Lastikli Yükleyici Mühendislik departmanında çalışmaktadır.

Ferhan Fıçıcı

1979 yılında Bandırma'da doğdu. İlk, ortaokul ve lise eğitimlerini Balıkesir'de tamamladı. 2002 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Aynı yıl HİDROMEK'te AR-GE Mühendisi olarak göreve başladı ve 2005 yılında AR-GE Takım Liderliği görevine getirildi. 2007 yılında ODTÜ Makine Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimini tamamlayan Fıçıcı, 2012 yılından bu yana HİDROMEK'te Kazıcı Yükleyici ve Lastikli Yükleyici Mühendislik Müdürü olarak görev yapmaktadır. Evli ve 2 çocuk babasıdır.