



Karabük
Üniversitesi

Karabük
University
JOURNAL of
MECHANICAL
ENGINEERING

Karabük Üniversitesi
Makine Mühendisliği Dergisi

Year : 2020 Volume : 1 Issue : 1

**KARABÜK ÜNİVERSİTESİ MAKİNE
MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ**

Cilt: 1 Sayı: 1 Yıl: 2020

***KARABUK UNIVERSITY JOURNAL OF
MECHANICAL ENGINEERING***

Volume:1 Issue: 1 Year: 2020

e-ISSN:

DERGİ HAKKINDA

Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nün bilimsel yayın organı olan Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Dergisi ulusal ve uluslararası düzeyde makine mühendisliği alanındaki özgün araştırma makalesi, derleme ve olgu sunumu şeklinde hazırlanan güncel, özgün ve nitelikli bilimsel çalışmaları ve editöre mektupları yayımlayarak bilim dünyasına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Dergisi, Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü tarafından elektronik ve basılı ortamda yılda dört kez (Mart, Haziran, Eylül, Aralık) yayımlanan makine mühendisliği alanında, hakemli, süreli ve açık erişim olan bilimsel dergidir. Dergi, Makine Mühendisliği alanındaki en güncel bilimsel ve teknolojik gelişmeleri takip eden hem deneysel hem de kuramsal özgün çalışmaları ilgili kitlelere ulaştırmayı hedefler.

Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Dergisi, makine mühendisliği konularını kapsayan bir dergidir. Makine Mühendisliği alanındaki en güncel bilimsel ve teknolojik gelişmeleri araştırmacılara, mühendislere ve ilgili kitlelere ulaştırmayı hedefler. Dergi ulusal ve uluslararası düzeyde makine mühendisliği alanında orijinal bir araştırmayı bulgu ve sonuçlarıyla yansıtan ve bilime katkısı olan araştırma makalelerini veya yeterli sayıda bilimsel makaleyi tarayıp, konuyu bugünkü bilgi ve teknoloji düzeyinde özetleyen, değerlendirme yapan ve bulguları karşılaştırarak yorumlayan özgün çalışmaları kabul etmektedir. Ayrıca dergimizde Türkçe ve İngilizce dillerinde makale yazımı imkanı bulunmaktadır.

KARABÜK ÜNİVERSİTESİ MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ

Karabuk University Journal of Mechanical Engineering

Karabük Üniversitesi Adına Yayın Sahibi

Prof. Dr. Refit POLAT

Baş Editör | Editor in Chief

Prof. Dr. Emrah DENİZ

Yardımcı Editör | Editorial Asistant

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi KORKMAZ

Editörler Kurulu | Editorial Board

Prof. Dr. Emrah DENİZ

Doc. Dr. Okan ÜNAL

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi KORKMAZ

Dr. Öğr. Üyesi Samet USLU

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Emrah ERDOĞDU

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR

Dr. Öğr. Üyesi M. Hüseyin ÇETİN

Arş. Gör. Dr. Fatih PEHLİVAN

Danışma Kurulu Başkanı | Advisory Board in Chief

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

Danışma Kurulu | Advisory Board

Prof. Dr. Yunus ÇENGEL

Prof. Dr. Mehmet ÖZALP

Prof. Dr. Hüseyin GÜNERHAN

Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

Prof. Dr. Ayhan EROL

Prof. Dr. Serdar SALMAN

Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR

Yazı İşleri Müdürü

Arş. Gör. GÜRŞAH GÜRÜF

Yayın Türü

Bilimsel-Hakemli

Yönetim Yeri | Head Office

Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine

Mühendisliği Bölümü Merkez, KARABÜK

e-posta: makinemuh@karabuk.edu.tr

web: <https://dergipark.org.tr/kujme>

Mart 2020

Araştırma Makalesi / Research Article

Mekanik Sistemlerde Rejeneratif Frenleme ile Elde Edilebilecek Enerji Miktarının Belirlenmesi ve Verimlilik Analizi

Determination of the Energy Amount Can be Obtained by Regenerative Braking in Mechanical Systems and Productivity Analysis

Huriye BURKUCU, Sena KABAVE KILINÇARSLAN, Şeyma KORKMAZ, Abdulkadir ORAK, M. Hüseyin ÇETİN

1

Yüksek Hızlı Trenlerin Enerji Tüketiminin Analizi

Analysis of Energy Consumption of High Speed Trains

Gülüstan Tuğçe ALVALI, Sena KABAVE KILINÇARSLAN, Abdulkadir ORAK, Şeyma KORKMAZ, M. Hüseyin ÇETİN

9

Derleme Makalesi / Review Article

Değiştirilebilir Uçlu Matkap Uygulamaları Üzerine Bir Derleme

A Review on Indexable Insert Drill Applications

Aslan AKDULUM, Yunus KAYIR

20

Araştırma Makalesi / Research Article

Mekanik Sistemlerde Rejeneratif Frenleme ile Elde Edilebilecek Enerji Miktarının Belirlenmesi ve Verimlilik Analizi

Huriye BURKUCU¹, Sena KABAVE KILINÇARSLAN², Şeyma KORKMAZ¹,
Abdulkadir ORAK¹, M. Hüseyin ÇETİN^{2*}

¹Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü, Karabük
²Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük
(ORCID: 0000-0001-9480-1279) (ORCID: 0000-0001-7302-4554) (ORCID: 0000-0002-6871-980X)
(ORCID: 0000-0001-6611-4535) (ORCID: 0000-0003-0429-5507)

Öz

Bu çalışmada, raylı sistemler araçlarında faydalı frenleme olarak adlandırılan rejeneratif frenleme veriminin hesaplanması amaçlanmıştır. Bir raylı sistemler aracına frenleme sırasında etki eden zıt yönlü kuvvetler belirlenmiş ve gerekli analitik bağıntılar elde edilmiştir. Çalışma kapsamında kent içi hafif raylı sistemler araç özellikleri dikkate alınarak araç ağırlığı ortalama 160 ton (140 kişi yolcuyla beraber) olarak belirlenmiştir. Aracın sahip olduğu toplam enerji, belirli bir hız aralığında (80 – 30 km/sa) incelenmiştir. Hareket halindeki araca etki eden aerodinamik sürtünme kaybı 80 – 30 km/sa hız aralığında 126 kW olarak belirlenmiştir. Ray-teker etkileşimi kaynaklı kayıplar ise 80 – 30 km/sa hız aralığında 43,6 kW olarak belirlenmiştir. Dişli çark mekanizmasında oluşan mekanik ve elektrik motoru kayıpları 10 kW olarak kabul edilmiştir. Belirlenen hız aralığında aracın sahip olduğu toplam kinetik enerji, toplam kayıp ve üretilen rejeneratif enerji miktarlarına eşitlenerek frenleme süresi hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda 80 km/sa hızdan 30 km/sa hıza düşerken elde edilen rejeneratif enerji %24,26 verimle 4.121,94 kJ olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rejeneratif Frenleme, Enerji Verimliliği, Mekanik Sistemler, Raylı Sistemler.

Determination of the Energy Amount Can be Obtained by Regenerative Braking in Mechanical Systems and Productivity Analysis

Abstract

In this study, it is aimed to calculate the regenerative braking efficiency, which is called useful braking in railway vehicles. The forces acting of a railway vehicle during braking have been determined and the necessary analytical relations have been obtained. In this study, the average weight of the vehicle is determined as 160 tons (together with 140 passengers) considering the vehicle characteristics of urban light rail systems. The total energy of the vehicle is examined at a speed ranges (80- 30 km/h). The aerodynamic drag loss affecting the vehicle is determined as 126 kW at a speed range of 80- 30 km/h. The losses due to rail-wheel friction are determined as 43.6 kW in the range of 80- 30 km/h. The mechanical losses in gear mechanism and electrical motor losses have been accepted as 10 kW. Breaking times are calculated by equalizing the total kinetic energy of the vehicle at the specified speed range with the total loss and the amount of regenerative energy produced. As a result of the calculations, the regenerative energy obtained from 80 km/h to 30 km/h is determined as 4,211.94 kJ with 24,26% efficiency.

Keywords: Regenerative Braking, Energy Efficiency, Mechanical Systems, Railway Systems.

1. Giriş

Günümüz endüstrisinin hızla gelişmesi sonucu, enerjinin ekonomik bir şekilde elde edilmesi ve tasarruflu bir şekilde kullanılmasının önemi gün geçtikçe artmaktadır. Dünya genelinde yıllık üretilen enerjinin %20'si, ulaştırma sektöründe tüketilmektedir [1]. Ulaştırma sistemlerinde kullanılan enerji türlerini, raylı sistemlerde kullanılan elektrik ve mineral esaslı yakıt enerjisi (dizel yakıt), karayolu ve

*Sorumlu yazar: hcecin@karabuk.edu.tr
Geliş Tarihi: 11/02/2020 Kabul Tarihi: 01/03/2020

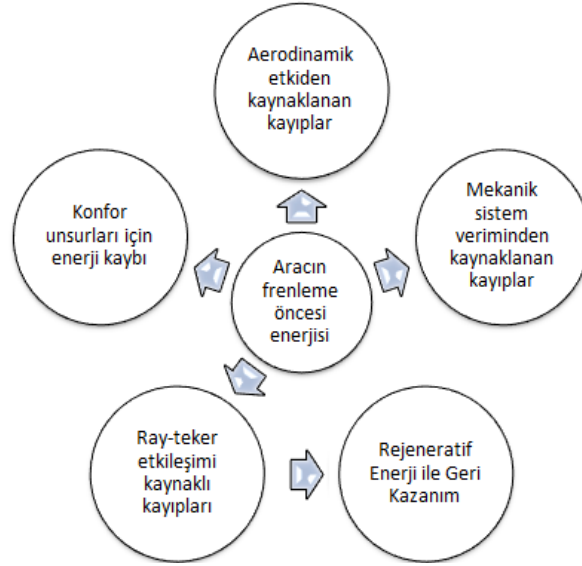
havacılıkta ise ağırlıklı olarak kullanılan mineral esaslı (benzin, dizel, LPG ve CNG) yakıt enerjisi oluşturmaktadır. Karayolu ulaşımında elektrik enerjisi kullanımı üzerine yoğun çalışmalar yapıyor olsa da istatistikî olarak, mineral esaslı kaynak kullanımı ile kıyaslanabilir durumda değildir.

Elektrik enerjisi, enerji kaynakları açısından değerlendirildiğinde, en çevreci ve verimli enerji türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple ulaşım sektöründe elektrik enerjisi kullanımının sağlanması, daha temiz bir çevre ve daha ekonomik ulaşımı mümkün kılacaktır [2]. Günümüz raylı sistemler teknolojileri incelendiğinde elektrik enerjisine büyük oranda adaptasyonun sağlandığını (konvansiyonel ve hızlı tren hatları) gözlemlemek mümkündür. Bu durum çevreci ve ekonomik bir unsur olarak gözükmeyle beraber tüketilecek enerji hacmi ve enerjinin temin edilebilirliği açısından tartışılır durumdadır. Raylı sistemler araçlarının büyük kütlelere sahip olmaları ve/veya yüksek hızlarda çalışmaları, yüksek miktarda elektrik enerjisi ihtiyacı doğurmaktadır.

2006 yılında Londra metrosunun, 1173 GWh enerji tüketimi ile Londra'nın en büyük enerji tüketicisi olduğu literatür kayıtlarında bulunmaktadır [3]. Bu örnek doğrultusunda, raylı sistemler sektöründe elektrik enerjisinin yalnızca temininin değil, verimli kullanımının da büyük önem taşıdığı sonucuna varılmaktadır. Günümüz üretim sektörlerinde enerjinin verimli kullanılmasını amaçlayan ısı yalıtımı, minimum yakıt tüketimi yaptırımları, enerji etiketlemesi gibi küresel ölçekli birçok uygulama bulunmaktadır. Raylı sistemler sektöründe ise enerji verimliliği çalışmaları incelendiğinde, akıllı sürüş teknolojileri ile enerji tasarrufu, rejeneratif frenleme ile enerjinin geri kazanımı amaçlanmakta ve bu doğrultuda adaptasyon çalışmaları yapılmaktadır. Özellikle rejeneratif frenleme ile enerjinin geri kazanımı, kazanılabilecek enerji miktarının büyüklüğü açısından önem taşıyan bir uygulama olarak dikkat çekmektedir [4].

Rejeneratif frenleme, toplu ulaşım sistemlerinde sürdürülebilirlik açısından büyük bir öneme sahiptir. Rejeneratif enerji, araç frenlemeye geçtiği esnada üretilen ve üretim miktarı itibariyle önemli oranda enerjiden tasarruf sağlayan (%20 ile %25 arası) bir uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır [5–7]. Üretilen rejeneratif enerjinin verimliliği de raylı sistem aracının tasarım ve işletme koşullarına göre değişkenlik göstermektedir [6,8–10]. Rejeneratif enerji verimi teknik olarak frenleme sırasında araca etki eden zıt yönlü kuvvetlere bağlıdır. Araca etki eden zıt yönlü dirençler; aerodinamik etki, ray-teker sürtünmesi, mekanik verimsizlik unsurları (dişli, motor, kaplin verimleri) ve konfor öğeleri (klima, aydınlatma vb. araç üstü ekipmanları) olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 1). Yapılan literatür taraması sonucu, araca etkileyen dirençlerin etkisi yüksekten düşüğe doğru; aerodinamik etki (≈ %40), ray-teker sürtünme etkisi (≈ %25), konfor öğeleri etkisi (≈ %20) ve verim kayıpları etkisi (≈ %15) şeklinde sıralanmaktadır [5,11]. Gonzalez- Gil vd. [12], kent içi raylı sistem araçlarında fren enerjisinin geri kazanımı ve yönetimi için enerji depolama ve rejeneratif frenleme teknolojilerini kapsayan uygulamaları kapsamlı şekilde incelemiştir. Literatür çalışmaları detaylı şekilde incelendiğinde rejeneratif frenleme teknolojisinin sistem güvenilirliği, enerji verimliliği ve emisyonların azaltılması açısından kent içi ulaşım için önemli bir uygulama olduğu sonucuna varılmıştır.

Rejeneratif enerji ray-teker etkileşimi sonucu (motor milinin dönüşüyle) ortaya çıkar. Enerjinin ortaya çıkabilmesi için, frenleme esnasında yuvarlanma direncine bağlı olarak azalan bir ivme ile hareketin sağlanması ve tren tekerleklerinin azalan bir açısız hızla dönme hareketini gerçekleştirilmesi gerekmektedir [13]. Dönme hareketi ile sağlanan mekanik enerji, tren tekerleklerinden aksa, akstan dişli kutusuna, dişli kutusundan kaplinler vasıtasıyla elektrik motoruna aktarılarak mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülmektedir [14].



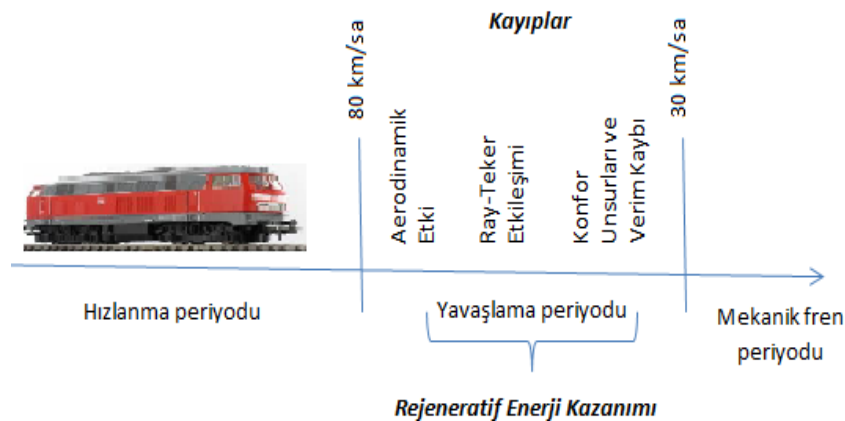
Şekil 1. Raylı sistem araçları için enerji balans diyagramı

Bu çalışmada, bir raylı sistemler aracına frenleme anında etki eden zıt yönlü kuvvetlerin hesaplamaları yapılmış ve rejeneratif frenleme uygulaması ile geri kazanılabilecek enerji miktarı belirlenmeye çalışılmıştır. Oluşturulan modelde, araç frenlemeye geçmeden önce sahip olduğu kinetik enerji miktarı belirlenmiş ve bu enerjiyle mekanik fren yapmadan ne kadar süre hareket edebileceği yani rejeneratif frenleme süresi hesaplanmıştır. Rejeneratif sürede cer motoruna tekerleklerden aktarılan net güç hesap edilmiş, toplam rejeneratif enerji miktarına ulaşılmıştır. Elde edilen enerjinin toplam frenleme enerjisine oranı hesaplanarak rejeneratif frenleme enerji verimliliği belirlenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Raylı Sistemler Aracının Modellenmesi

Çalışma kapsamında yapılan hesaplamalarda kent içi hafif raylı araç özellikleri dikkate alınmıştır. Araç ağırlığı ortalama 160 ton (140 kişi yolcuyla beraber) olarak belirlenmiştir. Kullanılan aracın teker çapı 680 mm'dir. Araç hızı 80 km/sa (22,2 m/s) değerine çıkacak şekilde modelleme yapılmıştır. Rejeneratif frenleme 30 km/sa (8,33 m/s) hız değerine düşene kadar verimli olarak gerçekleştirilebildiği için, aracın sahip olduğu toplam enerji 80 – 30 km/sa aralığında hesap edilmiştir [15]. 30 km/sa sonrası mekanik frenlemenin gerçekleştirildiği aşamadır. Aracın hızlanma, rejeneratif enerji kazanımı amacıyla yavaşlama ve mekanik frenleme periyotları için çizilen şematik Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Rejeneratif frenleme için hareket modeli

2.2. Aerodinamik Sürtünme Kayıpları

Aerodinamik kayıplar, havanın araç gövdesi üzerinde sürtünmesi sebebiyle oluşan kayıplardır. Parametre olarak; hava direnci faktörü (F_{hd}), havanın yoğunluğu (ρ_{hava}), hava direnç katsayısı (c_d), araç kesit alanı (A_{kesit}) ve araç hızı faktörlerinden ($v_{araç}$) etkilenmektedir (Denklem 1). Denklem 1’de görüldüğü üzere hava direnç kuvveti üzerindeki en etkili parametre üstel olarak etki etmesi sebebiyle araç hızı faktörüdür. Hız arttıkça araç güç tüketimi parabolik olarak artmaktadır. Bu sebeple, enerji verimliliği açısından optimum hızların belirlenmesi önem taşımaktadır. Fakat hız faktörü, özellikle toplu taşıma araçlarında trafik akışının hızlı bir şekilde sağlanma gereği sebebiyle minimize edilebilecek bir parametre değildir. Hava direnç faktörünün minimizasyonu için etkin parametreler, hava direnç katsayısı ve araç kesit alanı faktörüdür [16].

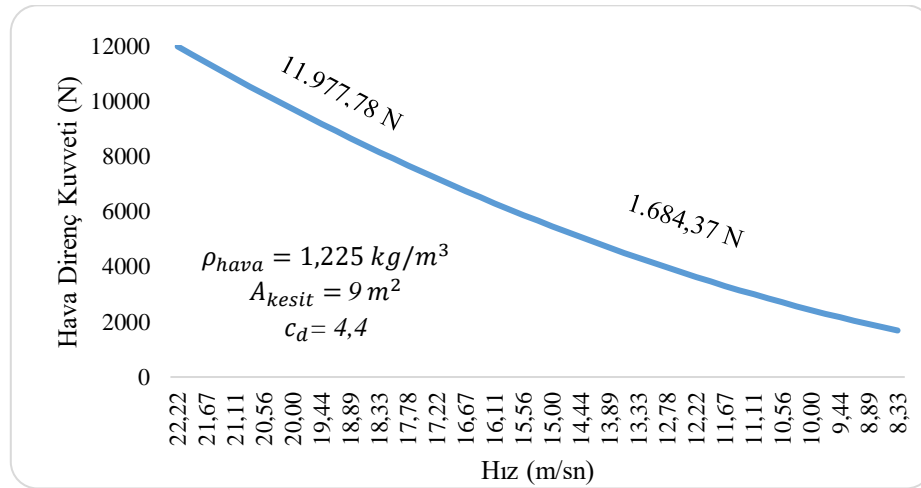
$$F_{hd} = 0,5 \cdot \rho_{hava} \cdot A_{kesit} \cdot c_d \cdot v_{araç}^2 \quad (1)$$

Çalışma kapsamında dikkate alınan metro aracının hava direnç hesabı için belirlenen faktörlere ait sayısal değerler Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’de belirtilen sayısal değerler Denklem 1’de yerine yazılarak hesaplanan hava direnci değerinin hıza göre değişimini gösteren grafik Şekil 3’te verilmiştir.

Tablo 1. Aerodinamik direnç kuvveti parametreleri

Parametre	Sayısal Değer
ρ_{hava}	1,225 kg/m ³
A_{kesit}	9 m ²
c_d	4,4
v	80-30 km/sa

Hesaplanan hava direnci kuvveti değerleri araç hızı değerleri ile çarpılarak, hava direnci sebebiyle tüketilen toplam güç miktarı hesap edilmiştir (Tablo 2). Modelde kullanılan aracın 80 km/sa hızı ile anlık hava direncine harcadığı güç miktarı 266,18 kW, 30 km/sa hızı ile harcadığı anlık güç miktarı ise 14,04 kW olarak hesaplanmıştır. Hava direnci kaynaklı tüketilen güç miktarı hıza bağlı olarak parabolik olarak azalmaktadır. Matematiksel olarak güç-hız parabolik eğrisinin altında kalan alan, tüketilen enerji miktarını göstermektedir. Yapılan hesaplamalar sonucu, güç-hız eğrisinin doğrusal kabul edilerek işlem yapılmasının kabul edilebilir hata sınırları içerisinde olacağı belirlenmiştir.



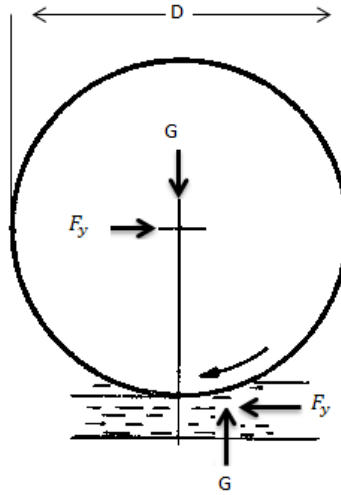
Şekil 3. Hava direnci kuvvetinin hıza bağlı değişim grafiği

Tablo 2. Aerodinamik etki sebebiyle tüketilen toplam güç miktarı

Hız (m/s)	Hava direnç kuvveti (F_{hd} , N)	Güç (kW)	Zamana bağlı toplam enerji tüketimi
22,2	11.977,78	266,18	126.t
8,33	1.684,37	14,04	

2.3.Ray-Teker Sürtünmesi Kaynaklı Kayıplar

Dairesel hareket yapan sistemlerde sürtünme davranışı yuvarlanma direnci ile ifade edilir. Bir yüzeyde yuvarlanan bir cismin hareketine direnen kuvvete yuvarlanma direnci denir. Demiryolu araçlarında tekerlek ile ray arasında ve aks yatağında yuvarlanma direnci sebebiyle enerji kaybı meydana gelir. Yuvarlanma direnci (F_y), dingil yükünün (G) ve araç/tren uzunluğunun artması ile lineer olarak artmaktadır [17] (Şekil 4).



Şekil 4. Raylı sistemler araç tekerleği üzerinde yuvarlanma direncinin gösterimi [17]

Yuvarlanma direnci (F_{yd}), Newton bağıntısından (Denklem 2) yararlanılarak hesaplanmıştır. Bağıntıda yuvarlanma direnci (F_{yd}); aracın kütlesine (m), yerçekimi ivmesine (g) ve yuvarlanma direnç katsayısına (c_w) bağlı olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada oluşturulan modelde kullanılan araca ait yuvarlanma direnci hesap parametreleri Tablo 3’de verilmiştir. Tablo 3’de belirtilen sayısal değerler Denklem 2’de yerine yazılarak yuvarlanma direncinin hıza bağlı değişim değerleri (Tablo 4) elde edilmiştir. Yuvarlanma direncinin bugüne kadar raylı sistem araçları için hesaplanmamış olması göz önüne alınarak yuvarlanma direnci katsayısı (c_w) teker-beton zemin yüzey sürtünmesi değerine göre hesaplanmıştır. Aracın frenleme esnasında yuvarlanma direnci sebebiyle kaybettiği toplam enerji; kuvvet-hız eğrisinin altında kalan alan dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$F_{yd} = m \times g \times c_w \quad (2)$$

Tablo 3. Yuvarlanma direnç kuvveti parametreleri

Parametre	Sayısal Değer
Hız	80-30km/sa
Aracın kütlesi	160.000 kg
Yerçekimi ivmesi	9,81 kg/m ³
Yuvarlanma direnci katsayısı	0,004

Tablo 4. Yuvarlanma direnci ile tüketilen toplam güç miktarı

Hız (m/s)	Yuvarlanma direnç kuvveti (F_{yd} , N)	Güç (kW)	Zamana bağlı toplam enerji tüketimi
22,2	6278,4	139,52	43,6.t
8,33	6278,4	52,32	

2.4. Konfor Unsurları ve Motor Verimi Kaynaklı Kayıplar

Raylı sistemler araçlarında yüksek güç ve verime sahip motorlar kullanılmaktadır. Aracın üzerinde kullanılan cer motorundan kaynaklı kayıplar hesaplamalara dâhil edilmiştir. Bu çalışma kapsamında, motor kayıpları %10 olarak kabul edilmiş ve hesaplamalar bu kabule göre yapılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Modelde belirtilen raylı sistemler aracına etkiyen negatif kuvvetler nedeniyle oluşan kayıplar, belirlenen hız aralığında zamana bağlı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan kayıplar Tablo 5’de gösterilmiştir.

Tablo 5. Araca etki eden zıt yönlü kuvvetlere bağlı olarak tüketilen toplam güç miktarı

Enerji Kaybı Unsuru	Enerji Miktarı (kW.zaman)
Aerodinamik sürtünme kaybı (E_{hd})	126. t
Ray-teker etkileşimi kaynaklı kayıplar (E_{yd})	43,6. t
Konfor unsurları ve motor verimliliği kayıpları (E_{kd})	10. t

Enerji yoktan var, vardan yok edilemez prensibi doğrultusunda aracın 80 km/sa hızdan 30km/sa hıza frenleme esnasında sahip olduğu toplam kinetik enerjisinin, toplam kayıp ve üretilen rejeneratif enerji miktarına (E_{rej}) eşit olması gerekmektedir. Raylı sistemler araçlarında frenleme esnasında 30km/sa hızından daha düşük hızlarda mekanik (disk) fren gerçekleşeceği göz önüne alınarak, hesaplamalar 80 km/sa ile 30 km/sa aralığında yapılmıştır. Denklem 3 yardımı ile aracın belirlenen hız değeri arasındaki frenleme süresi hesaplanmıştır [18,19].

$$E_{k(80-30)} = E_{hd} + E_{yd} + E_{kd} \quad (3)$$

$$0,5. m. (22,222 - 8,332)^2 = 126. t + 43,6. t + 10. t$$

$$16.975,30 = 179,6.t \text{ (kW)}$$

$$t_{80-30} = 94,51 \text{ s olarak hesaplanır.}$$

Raylı sistem araçlarında motorun jeneratör davranışı sonucu üretilen rejeneratif enerji miktarı, araç tekerleğinin dönüş miktarına bağlıdır. Elde edilen toplam rejeneratif enerji miktarı, zaman parametresine bağlı olarak tekerin dönme miktarı ile Denklem 4'te gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$E_{rej.(80-30)} = 43,6. t \text{ (kW)} \quad (4)$$

$$E_{rej.} = 4.121,94 \text{ kJ}$$

Denklem 4 ile hesaplanan değer, aracın 80 km/sa hızından 30 km/sa hızına kadar yavaşlama süresince elde ettiği rejeneratif enerji miktarıdır. Aracın 80 km/sa ile 30 km/sa aralığında harcadığı toplam kinetik enerji miktarı Denklem 5'te hesaplanmıştır.

$$E_{k(80-30)} = 0,5. m. (22,222 - 8,332 \text{ km/sa})^2 \quad (5)$$

$$E_{k(80-30)} = 16.975,31 \text{ kJ}$$

Hesaplanan toplam kinetik enerji miktarının elde edilen rejeneratif enerji miktarına oranı verimi vermektedir.

$$\eta_{rej.} = E_{k(80-30)} / E_{rej.} = (4.121,94 / 16.975,31) * 100$$

$$\eta_{rej.} \cong \% 24,26$$

4. Değerlendirme Ve Sonuç

Rejeneratif frenleme, yavaşlamakta olan bir raylı sistemler aracının kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilen bir frenleme sistemidir [20]. Bu çalışmada, bir kent içi hafif raylı sistemler aracının gerçek çalışma koşulları altında sahip olduğu kinetik enerjisinin modeli oluşturulmuştur. Belirli parametrelere bağlı olarak aracın sahip olduğu toplam kinetik enerji ve rejeneratif frenleme sonrası elde edilen enerji miktarı tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilen şekilde özetlenmiştir.

- Araç 80 km/sa hızdan 30 km/sa hıza düşerken hava direnci için harcadığı enerji miktarı 94 sn'de 11908 kJ'dur.
- Araç 80 km/sa hızdan 30 km/sa hıza düşerken yuvarlanma direnci için harcadığı enerji miktarı 94 sn'de 4120 kJ'dur.
- Araç 80 km/sa hızdan 30 km/sa hıza düşerken konfor unsurları ve mekanik kayıplar için harcadığı enerji miktarı 94 sn'de 951,4 kJ'dur.
- Araç 80 km/sa hızdan 30 km/sa hıza düşerken elde edilen rejeneratif enerji verimi % 24,26' dır. Raylı sistemler araçlarında hız faktörünün önemli olması sebebiyle 80 km/sa değerinin altında verimlilik analizi yapılmamıştır.
- Elde edilen verim değerleri mekanik sistemler açısından anlamlıdır ve enerji verimliliği açısından yeterli seviyededir.

5. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

- Otomotiv sektörü ve demiryolu taşımacılığında kullanılan frenlerin servis ömrünün artırılması için fren malzemesi yüksek mukavemetli malzemelerle kaplanarak mekanik özellikleri incelenebilir.

- Yüksek mukavemetli malzemelerle kaplanmış frenlerin rejeneratif frenlemeye etkisi analiz edilebilir.

Kaynaklar

1. Ceylan, H., Kardeşahin M, Haldenbilen, S. 2007. Gelişmiş ve Gelişmekte Olan Ülkelerde Ulaşım : Yenilenebilir Enerjiye Karşın Enerji Azal (t)ımı, Ulaştırma Kongresi, 438–447.
2. Yoong M.K., Gan Y.H., Gan G.D., Leong C. K., Phuan Z. Y., Cheah B. K., Chew K. W. 2010. Studies of regenerative braking in electric vehicle, *IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology*, IEEE, 20-21 November, 40–45.
3. Anonim, 2006. Environment Report. London Underground, Londra.
4. De La Torre S., Sánchez-Racero A.J., Aguado J.A., Reyes M., Martinez O. 2015. Optimal Sizing of Energy Storage for Regenerative Braking in Electric Railway Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30: 1492–1500.
5. Kılıç, B., Tuna, S., Yağcıtekin, B., Temiz, M.S. 2011. DC Raylı Sistemlerde Frenleme Enerjisi Geri Kazanımı, Elektrikli Ulaşım Sistemleri, Eskişehir, Bursa.
6. Adinolfi A, Lamedica R, Modesto C, Prudenzi A., Vimercati S. 1998. Experimental Assessment of Energy Saving due to Trains Regenerative Braking in an Electrified Subway Line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13: 1536–1542.
7. Goh S., Griffith M., Larbi K. 2010. Energy saving by using regenerating braking as normal train operation. *IET Conf. Railway Traction Syst*, 1–4.
8. Falvo M.C., Lamedica R., Bartoni R., Maranzano G. 2011. Energy management in metro-transit systems: An innovative proposal toward an integrated and sustainable urban mobility system including plug-in electric vehicles. *Electric Power Systems Research*, 81: 2127–2138.
9. Foadelli F., Roscia M., Zaninelli D. 2006. Optimization of storage devices for regenerative braking energy in subway systems. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1-6.
10. Kim G., Lee H. 2009. A study on the application of ESS on SeoulMetro line 2. 2009 International Conference on Information and Multimedia Technology, ICIMT 2009, 38–42.
11. Açıkbay, S., Alataş, A., İstanbul Ulaşım A.Ş. 2006. Raylı Sistemlerde Enerji Verimli Sürüş ve Frenleme Enerjisinin Geri Kazanılması, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi TÜRKİYE 10. ENERJİ KONGRESİ, İstanbul, 237–245.
12. González-Gil A., Palacin R., Batty P. 2013. Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy, *Energy Conversion and Management*, 75: 374–388.
13. Lu S., Weston P., Hillmansen S., Gooi H.B., Roberts C. 2014. Increasing the regenerative braking energy for railway vehicles, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15: 2506–2515.
14. Shimada M., Oishi R., Araki D., Nakamura Y. 2010. Energy storage system for effective use of regenerative energy in electrified railways, *Hitachi Review*, 59: 33–38.
15. Öztürk, M.M., Akbayır, Ö. 2018. Demiryolu Araçlarının Enerji Verimliliği.
16. Bacak, S., Gökoğlu, M., Tekir, M., Gedik, E. 2016. Yüksek Hızlı Bir Trenin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Aerodinamik Analizi, 3. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'16), Karabük.
17. Akbayır, Ö., Çakır, F.H. 2017. Enerji Verimliliği İçin Tren Direnci Formüllerinin Karşılaştırılması, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 126: 112–126.
18. Şimşek, A.E. 2008. Elektrikli Raylı Sistemlerin İncelenmesi ve Kent İçi Raylı Ulaşım Sistemlerinde Enerji Kalitesi ve Geri Kazanımı. Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği, İstanbul.
19. Türk, O. 2017. Elektrikli Bir Taşıtta Rejeneratif Fren Sistemi Etkinliğinin Analizi. Gazi Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği, Lisans Tezi, Ankara.
20. Abdallah, T. 2017. *Sustainable Mass Transit: Challenges and Opportunities in Urban Public Transportation*, Elsevier, New York, USA,

Araştırma Makalesi / Research Article

Yüksek Hızlı Trenlerin Enerji Tüketiminin Analizi

Gülüstan Tuğçe ALVALI¹, Sena KABAVE KILINÇARSLAN², Abdulkadir ORAK³,
Şeyma KORKMAZ³, M. Hüseyin ÇETİN^{2*}

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Müh. ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, 06010, Ankara

²Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük

³Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük
(ORCID: 0000-0003-0315-506X) (ORCID: 0000-0001-7302-4554) (ORCID: 0000-0001-6611-4535)

(ORCID: 0000-0002-6871-980X) (ORCID: 0000-0003-0429-5507)

Öz

Yüksek hızlı trenler yüksek enerji verimine sahip olsa da işletilmesi için ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi miktarı dikkat çekici değerlerdedir. Bu sebeple günümüzde ve gelecekte ihtiyaç duyulacak enerji miktarının analiz edilmesi ve enerji tüketim politikalarının bu doğrultuda geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, yüksek hızlı trenlerin (YHT) enerji ihtiyaçlarını belirlemek amacıyla güç tüketim parametreleri tespit edilmiştir. Bu parametreler; aerodinamik hava direnci, tekerlek- ray yuvarlanma direnci ve araç içi konfora yönelik tüketim olarak belirlenmiştir. Trenlerin ağırlık parametresi olarak üç farklı seviyede hesaplama yapılmış (150 kişi, 200 kişi, 250 kişi), hız parametresi olarak da sabit 250 km/sa. işletme hızı dikkate alınmıştır. Oransal analiz yapıldığında, toplam enerji ihtiyacının yaklaşık %68'ini aerodinamik direnç, %30'unu ray-tekerlek etkileşimi ve %2'sini klima, aydınlatma vb. gibi iç konfor unsurları oluşturmaktadır. 250 km/sa. hız için gerekli güç ihtiyacı 1530 kW olarak hesaplanmıştır. Referans alınan hatlar arasındaki etkileşim incelendiğinde ise Ankara – İstanbul hattında %44, Ankara – Konya hattında %22, Konya – İstanbul hattında %21, Ankara – Eskişehir hattında ise %13 oranında enerji tüketildiği belirlenmiştir. Türkiye içindeki mevcut hatlar dikkate alındığında yıllık enerji tüketimi 71,24 milyon kWh miktarındadır. Bu değer Türkiye'nin yıllık elektrik enerjisi tüketimi değerinin %0,02'sini oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Hızlı Tren (YHT), Enerji, Aerodinamik Direnç.

Analysis of Energy Consumption of High Speed Trains

Abstract

Although high-speed trains have high energy efficiency, the amount of electrical energy needed to operate is remarkable. For this reason, it is necessary to analyse the amount of energy required today and in the future and to develop energy consumption policies in this direction. In this study, power consumption parameters are determined to identify the energy needs of high-speed trains (HST). These parameters are aerodynamic air resistance, wheel-rail rolling resistance and in-car comfort. The weight parameters of the trains are calculated at three different levels (150 persons, 200 persons, 250 persons), and the speed parameter is also considered as 250 km/h operating speed. When the interaction between the reference tracks were analysed, it was determined that energy consumption was 44% in the Ankara - Istanbul, 22% in the Ankara - Konya, 21% in the Konya - Istanbul, and 13% in the Ankara - Eskisehir. The amount of energy consumed per day is determined by multiplying the amount of energy needed and the total run times of high-speed trains that working on existing lines in the borders of Turkey. When a proportional analysis is made, approximately 68% of the total need is aerodynamic resistance, 30% is the rail-wheel interaction, and 2% is air conditioning, lighting, etc. as well as interior comfort elements. The power requirement for the speed of 250 km/h is calculated as 1530 kW. Considering the current lines in Turkey's annual energy consumption amount is 71.24 million kWh. These values constitute 0.02% of Turkey's yearly electricity consumption.

Keywords: High Speed Train, Energy, Aerodynamic Resistance.

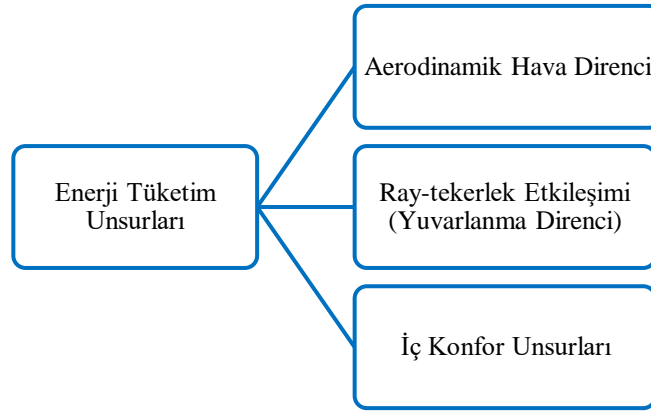
*Sorumlu yazar: hcetin@karabuk.edu.tr

Geliş Tarihi: 11/02/2020 Kabul Tarihi: 28/02/2020

1. Giriş

Yüksek hız (~250 km/sa.) ve yüksek kütle (~450 ton) sahip yüksek hızlı trenlerin (YHT) kullanım alanı gün geçtikçe artmaktadır [1]. Yüksek hızlı trenlerin enerji tüketimi; hava direnci, yuvarlanma direnci ve iç konfor unsurlarından dolayı oluşan direnç parametrelerine bağlıdır [2].

Yüksek hızlı trenlerin enerji tüketiminde, aerodinamik hava direnci en etkili parametredir. Aerodinamik hava direnç bağıntısı yüzey alanı, hız, hava yoğunluğu ve hava sürtünme direnç katsayısı faktörleri ile hesaplanmaktadır (Denklem 1). Aerodinamik etkiden kaynaklı enerji tüketiminde en etkili parametre ise, karesel olarak etki etmesi sebebiyle hız parametresidir [3]. Hız artışına bağlı olarak enerji tüketim artışı, hızlı tren işletmeciliğinde yönetilmesi gereken en önemli faktörün enerji olduğunu göstermektedir [4-7].



Şekil 1. Enerji Tüketim Unsurları

Ray-tekerlek etkileşimi sonucunda oluşan enerji tüketiminde ise tüketimi arttıran temel parametre ağırlık faktörüdür. Yüksek hızlara emniyetli bir şekilde ulaşılabilmesi için boji üzerinde sistem ağırlığını arttıran ilave süspansiyon sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum enerji tüketiminin de artmasına sebep olmaktadır.

Yüksek hızlı trenler yalnızca yolcu taşımacılığına hizmet eden sistemlerdir. Bu sebeple havalandırma, klima, aydınlatma vb. gibi unsurlar da ergonomi ve konfor açısından önem taşımaktadır [8]. Bu unsurların da enerji tüketimindeki payının belirlenmesi, toplam enerji ihtiyacının tespit edilmesi ve doğru bir enerji politikası geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır.

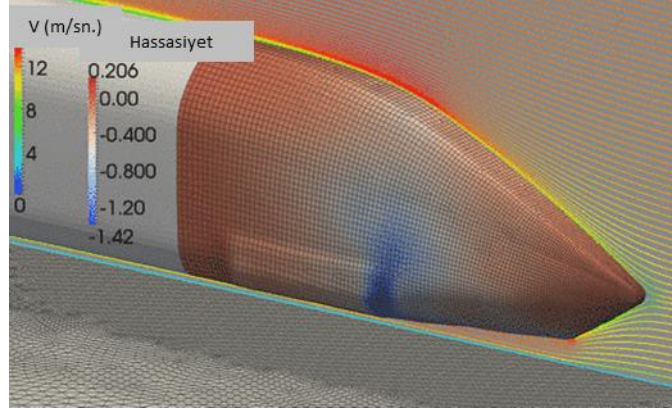
Bu çalışmada, yüksek hızlı tren setlerinin enerji ihtiyacı sistematik bir şekilde hesaplanmış ve toplam enerji tüketim değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca ihtiyaç duyulan hızlara göre YHT'lerin ihtiyaç duyacağı minimum motor güçleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler YHT setlerinin teknik parametrelerinin belirlenmesi aşamasında ve işletme esnasında enerji ihtiyaçlarının planlanmasında kullanılabilir niteliktedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Aerodinamik Hava Direnci Hesabı

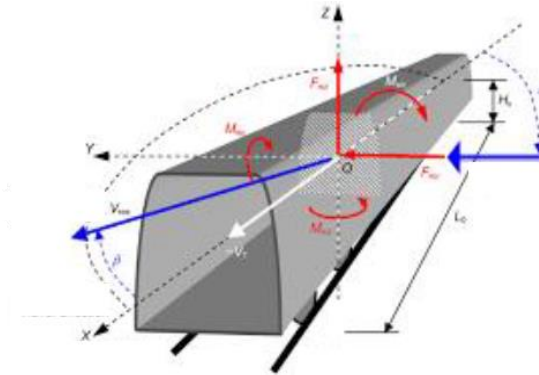
Yüksek hızlı trenlerin kullandığı güç parametrelerinden biri olan aerodinamik hava direnci, elektrik enerjisinin tüketilmesine sebep olan en etkili parametredir. Tren hızı arttıkça, aerodinamik hava direnci belirgin bir şekilde artmaktadır ve toplam direncin %85'i aerodinamik direnç sebebiyle oluşmaktadır [9]. Günümüzde yürütülen birçok çalışma, aerodinamik açıdan trenlerin tasarımını düzenlemeye ve bu direnci minimize etmeye yöneliktir. Özellikle araç burun tasarımı aşamasında aerodinamik hava direnci

en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Burun kesit alanı ne kadar küçük olursa trenlerin karşıladığı rüzgâr o kadar az olacak ve aerodinamik direnç de buna bağlı olarak daha düşük olacaktır.



Şekil 2. Akış Alanı ve Hassasiyet Analizi [10]

Şekil 2’de yüksek hızlı bir trenin, aerodinamik hava direnci gösterilmiştir. Aerodinamik hava direnci optimum seviyeye ulaşana kadar hassasiyet analizleri yapılmaya devam edilmiştir. Optimizasyon işlemi sırasında yüzey ağının deformasyonuna dair ayrıntılı bir simülasyon görünümü verilmiştir [10].



Şekil 3. Araç Üzerine Etkiyen Aerodinamik Kuvvetler [11]

Araç etrafında oluşan aerodinamik dış akış şeması Şekil 3’de gösterilmiştir. Araç hızından dolayı oluşan aerodinamik hava direnç kuvveti aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanır.

$$F_1 = \frac{\rho \cdot A \cdot c_p \cdot v^2}{2} \quad (1)$$

Denklem (1) de; “ F ” aerodinamik kuvveti, “ ρ ” hava yoğunluğunu, “ A ” aracın kesit alanını, “ c_d ” değeri hava sürtünme direnç katsayısını, “ v ” ise aracın hızını ifade etmektedir. Hesaplamalar yapılırken, “ c_d ” değeri ortalama 0,4 olarak seçilmiştir [12,13].

2.2. Ray-Tekerlek Etkileşimi Hesabı

Bir yüzeyde yuvarlanan bir cismin hareketine direnen kuvvete yuvarlanma direnci denir [14]. Demiryollarında, tekerlek ray arasındaki etkileşim sonucu yuvarlanma direnci meydana gelir.

Yuvarlanma direnci, aracın hareket edebilmesi için aşması gereken sürtünme kuvvetine eşittir. Yuvarlanma direnci, Denklem 2’de gösterilen Newton bağıntısı ile hesaplanır.

$$F_2 = m.g.c_w \quad (2)$$

Denklem 2’deki; “ F ” kuvveti yuvarlanma direncini, “ m ” araç kütleini, “ g ” yerçekimi ivmesini, “ c_w ” ise yuvarlanma direnç katsayısını ifade eder.

Bu çalışmada, yuvarlanma direnci üç koşul altında incelenmiştir. Bu koşullar; aracın 150 kişi, 200 kişi ve 250 kişi taşıma durumuna göre oluşturulmuştur. Ortalama insan kütlesi 75 kilogram olarak dikkate alınmıştır [12]. Aracın boş ağırlığı ise 439 ton (8 Vagonlu araç) olarak hesaba katılmıştır [9]. Yuvarlanma direnci katsayısı, sürtünme oluşan yüzeylerin malzeme yapısına bağlıdır. Bazı malzemeler arasındaki yuvarlanma direnç katsayısı Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Bazı malzemeler arasında ki yuvarlanma direnç katsayıları [15]

Malzeme	Yuvarlanma Direnç Katsayısı (C_w)
Çelik ray- çelik tekerlek	0,001-0,002
Beton-otomobil lastiği	0,001-0,015
Asfalt- otomobil lastiği	0,03
Katı kum-otomobil lastiği	0,04-0,08
Gevşek kum-otomobil lastiği	0,2-0,4

Tablo 1’de çelik ray- çelik tekerlek arasındaki katsayı 0,001 – 0,002 olarak belirtilmiştir. Hesaplama yapılırken yuvarlanma direnç katsayısı değeri ortalama 0,0015 olarak alınmıştır.

2.3. İç Konfor Unsurları Hesabı

Trenlerin içerisinde klima, ışıklandırma, bilgilendirme ekran panelleri gibi iç konfor unsurları bulunmaktadır. YHT işletmesinde kullanılan araçların iç konfor unsurları için belirlenen ortalama güç ihtiyacı 20 kW olarak belirlenmiştir.

2.3.1. Klima Kullanımı

Elektrikli araçların klima kullanımı sürüş süreleri dikkate alınarak hesaplanır. Kışın buz çözme prosesleri dikkate alınmadan gereken soğutma veya ısıtma yükü vagon başına 2,5 kW olarak varsayılabilir [16].

$$P_{klima} = 2,5. 10^3 \text{ [Watt/Vagon]} \quad (3)$$

Denklem 3’de; P_{klima} klima için harcanan gücü, $2,5. 10^3$ Watt soğutma veya ısıtma yükünü ifade eder.

2.3.2. Aydınlatma Kullanımı

Elektrikli araçlar katener hattından aldıkları 25 kV voltaj ile beslenirler. Işıklandırma ve bilgilendirme ekran panellerinin kullandıkları LED'lerin her biri 1,2 W güç harcıyarak çalışırlar [15]. Hesaplamalar, ışıklandırma ve bilgi panolarının toplamı olarak yaklaşık 50 LED kullanıldığı varsayılarak yapılmıştır.

$$P_{aydinlatma} = 1,2 \cdot n \text{ [Watt]} \quad (4)$$

Konfor unsurları için gereken güç Denklem 5'te verilen bağıntı ile elde edilmiştir.

$$P_{konfor\ unsur} = P_{klima} + P_{aydinlatma} \quad (5)$$

$$P = (2,5 \cdot 10^3) + (1,2 \cdot n) \text{ [Watt]}$$

2.4. Toplam Tüketim Modeli

Yüksek hızlı trenlerin güç parametrelerini aerodinamik hava direnci, ray-tekerlek yuvarlanma direnci ve araç içi konfor unsurlarına yönelik tüketim oluşturmaktadır. Aerodinamik hava direnç kuvveti ve tekerlek-ray etkileşimi hız ile çarpılarak harcanan güç bulunur.

$$P = [F_1 \cdot v] + [F_2 \cdot v] + P_3 \quad (6)$$

Bu bağıntılar açık bir şekilde yazıldığında Denklem 7 elde edilir.

$$P = \left[\left(\frac{\rho \cdot A \cdot c_d \cdot v^2}{2} \right) \cdot v \right] + [(m \cdot g \cdot c_w) \cdot v] + P_{iç\ unsurlar} \quad (7)$$

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Hesaplanan Sonuçlar ve Tartışma

3.1.1. Aerodinamik hava direnci

$F_1 = \frac{\rho \cdot A \cdot c_d \cdot v^2}{2}$ olarak ifade edilmiştir. Türkiye'de bulunan yüksek hızlı trenlerin ortalama hızı 250 km/sa. baz alınarak hız (v) değeri 69,44 m/s, hava yoğunluğu (ρ) değeri 1,225 kg/m³, araç kesit alanı 12,8 m² ve hava direnç katsayısı ise ortalama 0,4 olarak hesaba katılmıştır. Belirlenen verilere göre aerodinamik hava direncinin oluşturduğu kuvvet 15,12.10³ N olarak hesaplanmıştır.

Aerodinamik hava direnci için harcanan güç ise Denklem 8'e göre hesaplanmıştır. Denklem 8'e göre harcanan toplam güç 1050,03 kW olarak belirlenmiştir.

$$P_1 = F_1 \cdot v \quad (8)$$

3.1.2. Ray-tekerlek etkileşimi hesabı

$F_2 = m \cdot g \cdot c_w$ olarak ifade edilmiştir. Bu hesaplamada; yuvarlanma direnç katsayısı (c_w) değeri 0,015, yerçekimi ivmesi (g) değeri 9,81 m/s² alınmıştır. Ağırlık için ise üç farklı parametre belirlenmiş ve ortalama insan kütlesi 75 kilogram (kg), aracın boş ağırlığı 439 ton olacak şekilde hesaba katılmıştır.

Belirlenen ağırlık parametreleri yolcu sayılarına göre oluşturulmuştur. Aracın hızı sabit olup 69,44 m/s olarak belirlenmiştir.

- Yolcu sayısı 150 kişi için yuvarlanma direnç kuvveti Denklem 9'a göre, yuvarlanma direncine harcanan güç ise Denklem 10'a göre elde edilmiştir.

•

$$F_{2_1} = [(150) \cdot (75) + 439000] \cdot (9,81) \cdot (0,0015) = 6,625 \text{ kN} \quad (9)$$

$$P_{2_1} = (69,44) \cdot (66,25) = 460,069 \text{ kW} \quad (10)$$

- Yolcu sayısı 200 kişi için yuvarlanma direnç kuvveti Denklem 11'e göre, yuvarlanma direncine harcanan güç ise Denklem 12'ye göre elde edilmiştir.

•

$$F_{2_2} = [(200) \cdot (75) + 439000] \cdot (9,81) \cdot (0,0015) = 6,680 \text{ kN} \quad (11)$$

$$P_{2_2} = (69,44) \cdot (66,8) = 463,901 \text{ kW} \quad (12)$$

- Yolcu sayısı 250 kişi için yuvarlanma direnç kuvveti Denklem 13'e göre, yuvarlanma direncine harcanan güç ise Denklem 14'e göre elde edilmiştir.

$$F_{2_3} = [(250) \cdot (75) + 439000] \cdot (9,81) \cdot (0,0015) = 6,735 \text{ kN} \quad (13)$$

$$P_{2_3} = (69,44) \cdot (6,73) = 467,73 \text{ kW} \quad (14)$$

3.1.3. İç konfor unsurları hesabı

$F_3 = (2,5 \cdot 10^3) + (1,2 \cdot n)$ olarak ifade edilmiştir. LED sayısı (n) yaklaşık olarak her vagon için 50 adet, bir tren setinde ise 400 adet olarak hesaplamalar yapılmıştır.

$P_3 = [(8) \cdot (2,5 \text{ kW})] + [(1,2 \cdot 400) \cdot 10^{-3} \text{ kW}] = 20,48 \text{ kW}$ olarak bulunur.

3.1.4. Tahrik ünitesi için toplam güç hesabı

Aerodinamik güç gereksinimi (P_1), sürtünme güç gereksinimi (P_2) ve konfor unsurları güç gereksinimi (P_3) değerlerinin toplamı kullanılacak tahrik ünitesinin (YHT seti için gerekli elektrik motoru gücü) kapasitesini belirlemektedir. Hesaplanan değerlere göre 150- 200- 250 kişilik yolcu ve 250 km/sa. hız için gereken toplam güç değerleri sırasıyla 1530,579 kW, 1534,41 kW ve 1538,24 kW'dır.

3.2. Çalışan Hatların Enerji Tüketimi

Çalışan YHT hatlarının enerji tüketim değerlerinin hesaplanmasında güncel işletme verileri dikkate alınmıştır. Hesaplama yaklaşık yolculuk süresi ve günlük sefer sayısı verileri kullanılmıştır.

3.2.1. Ankara-İstanbul hattı

Hat süresi ortalama 4 saattir ve gidiş-geliş toplam 14 sefer yapılmaktadır. Bu durumda günde ortalama 56 saat enerji tüketimi meydana gelmektedir. Ortalama yolcu sayısı 200 olarak belirlenmiştir. İşletme verileri dikkate alınarak aerodinamik direnç, teker – ray etkileşimi ve iç konfor unsurlarından

kaynaklanan enerji tüketim miktarları Denklem 15-18’de hesaplanmıştır. Hesaplanan enerji miktarları yüzdesel olarak Şekil 4’te verilmiştir.

Ankara- İstanbul hattında aerodinamik direnç için harcanan enerji miktarı;

$$E_{1_1} = (1050,38 \text{ kW}). (56) = 58821,28 \text{ kWh} \quad (15)$$

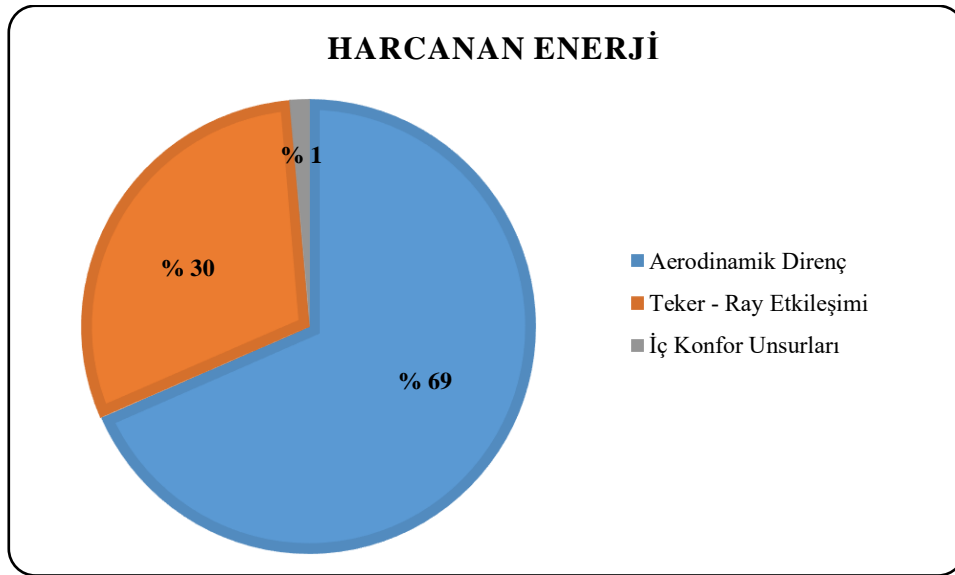
Tekerlek-ray etkileşimin harcadığı enerji;

$$E_{1_2} = (463,901 \text{ kW}). (56) = 25978,456 \text{ kWh} \quad (16)$$

İç konfor unsurlarının harcadığı enerji;

$$E_{1_3} = (20,48 \text{ kW}). (56) = 1146,88 \text{ kWh} \quad (17)$$

$$E_{1_{toplam}} = 85946,616 \text{ kWh} \quad (18)$$



Şekil 4. Ankara – İstanbul hattında harcanan enerji miktarları

3.2.2. Ankara-Eskişehir hattı

Hat süresi ortalama 1 saat 40 dakikadır ve gidiş-geliş toplam 10 sefer yapmaktadır. Bu durumda günde ortalama 16,6 saat enerji tüketimi meydana gelmektedir. Ortalama yolcu sayısı 200 olarak belirlenmiştir. İşletme verileri dikkate alınarak aerodinamik direnç, teker – ray etkileşimi ve iç konfor unsurlarından kaynaklanan enerji tüketim miktarları Denklem 19-22’de hesaplanmıştır. Hesaplanan enerji miktarları yüzdesel olarak Şekil 5’te verilmiştir.

Aerodinamik direncin harcadığı enerji;

$$E_{2_1} = (1050,38). (16,6) = 17437 \text{ kWh} \quad (19)$$

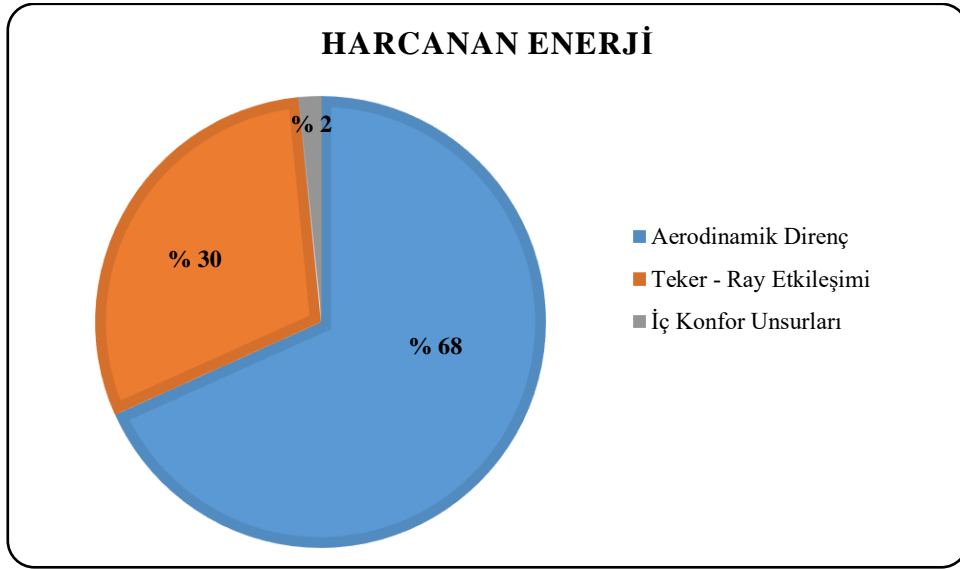
Tekerlek-ray etkileşimin harcadığı enerji;

$$E_{2_2} = (463,901). (16,6) = 7700,756 \text{ kWh} \quad (20)$$

İç konfor unsurlarının harcadığı enerji;

$$E_{2_3} = (20,48). (16,6) = 399,96 \text{ kWh} \quad (21)$$

$$E_{2_{toplam}} = 25537,716 \text{ kWh} \quad (22)$$



Şekil 5. Ankara – Eskişehir hattında harcanan enerji miktarları

3.2.3. Ankara-Konya hattı

Hat süresi ortalama 2 saattir ve gidiş-geliş toplam 14 sefer yapmaktadır. Bu durumda günde ortalama 28 saat enerji tüketimi meydana gelmektedir. Ortalama yolcu sayısı ise 200 olarak belirlenmiştir. İşletme verileri dikkate alınarak aerodinamik direnç, teker – ray etkileşimi ve iç konfor unsurlarından kaynaklanan enerji tüketim miktarları Denklem 23-26’da hesaplanmıştır. Hesaplanan enerji miktarları yüzdesel olarak Şekil 6’da verilmiştir.

Aerodinamik direncin harcadığı enerji;

$$E_{3_1} = (1050,38). (28) = 29402 \text{ kWh} \quad (23)$$

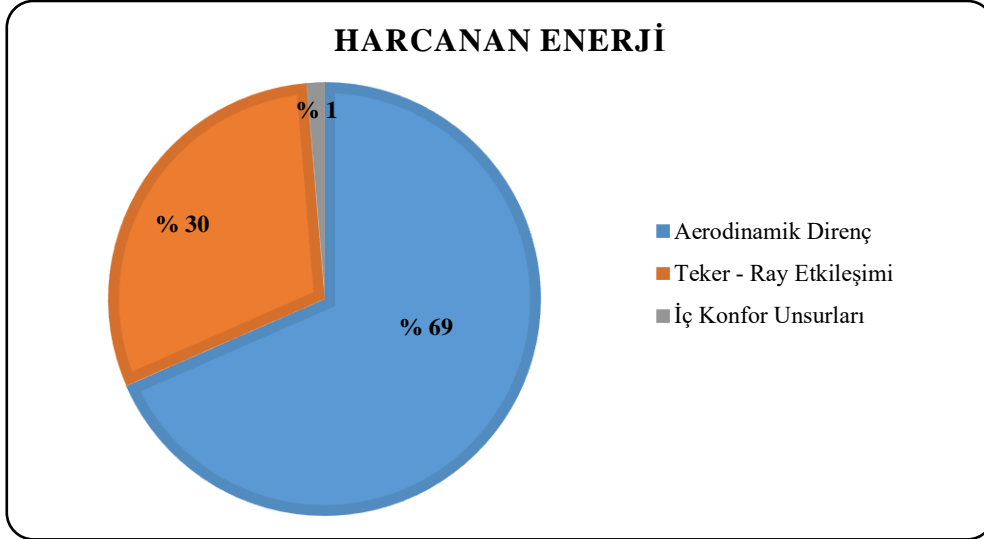
Tekerlek-ray etkileşiminin harcadığı enerji;

$$E_{3_2} = (463,901). (28) = 12989,228 \text{ kWh} \quad (24)$$

İç konfor unsurlarının harcadığı enerji;

$$E_{3_3} = (20,48). (28) = 573,44 \text{ kWh} \quad (25)$$

$$E_{3_{toplam}} = 42964,668 \text{ kWh} \quad (26)$$



Şekil 6. Ankara – Konya hattında harcanan enerji miktarları

3.2.4. Konya-İstanbul hattı

Hat süresi ortalama 4 saat 20 dakikadır ve gidiş-geliş toplam 6 sefer yapmaktadır. Bu durumda günde ortalama 26 saat enerji tüketimi meydana gelmektedir. Ortalama yolcu sayısı 200 olarak belirlenmiştir. İşletme verileri dikkate alınarak aerodinamik direnç, teker – ray etkileşimi ve iç konfor unsurlarından kaynaklanan enerji tüketim miktarları Denklem 27-30’da hesaplanmıştır. Hesaplanan enerji miktarları yüzdesel olarak Şekil 7’de verilmiştir.

Aerodinamik direncin harcadığı enerji;

$$E_{4_1} = (1050,038). (26) = 27310 \text{ kWh} \quad (27)$$

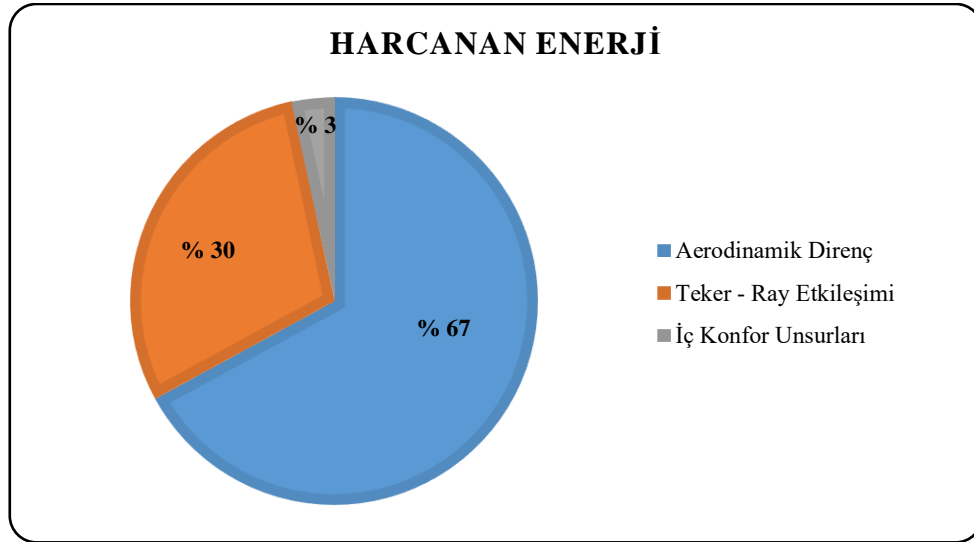
Tekerlek-ray etkileşiminin harcadığı enerji;

$$E_{4_2} = (463,901). (26) = 12061,426 \text{ kWh} \quad (28)$$

İç konfor unsurlarının harcadığı enerji;

$$E_{4_3} = (20,48). (26) = 1361,92 \text{ kWh} \quad (29)$$

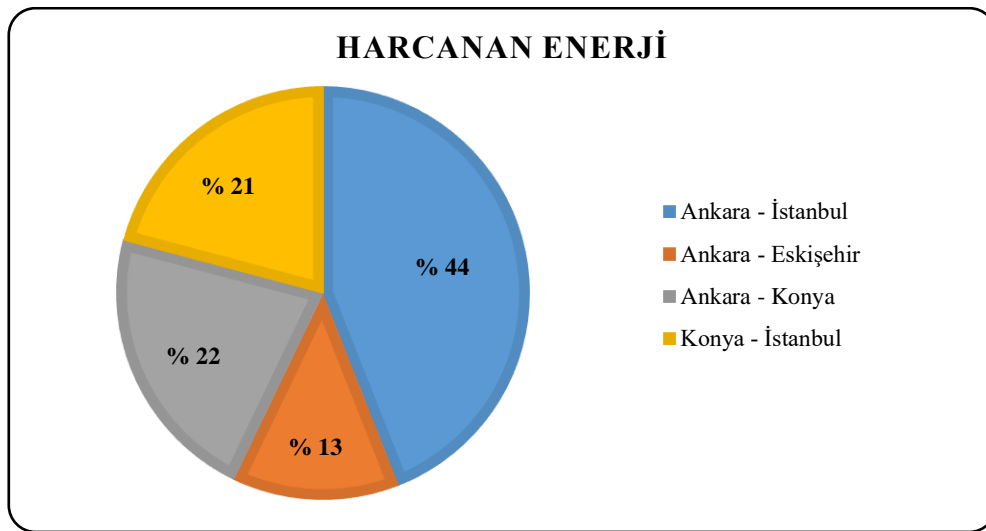
$$E_{4_{toplam}} = 40733,346 \text{ kWh} \quad (30)$$



Şekil 7. Konya – İstanbul hattında harcanan enerji miktarları

Yapılan hesaplamalar sonucu, yüksek hızlı tren hatları için gerekli olan günlük enerji miktarları tespit edilmiştir. 4 hat için gereken günlük enerji miktarı toplamı 195182,346 kWh olarak hesaplanmıştır. Yıllık enerji ihtiyacı ise 71,24 milyon kWh olarak belirlenmiştir. 4 hat için enerji tüketimine sebep olan faktörlerin etkisi incelendiğinde; aerodinamik direncin ortalama % 68, teker – ray etkileşiminin %30, iç konfor unsurlarının ise ortalama %2 toplam enerji tüketimine etkisinin oranında olduğu görülmektedir. Etki oranlarının bütün hatlar için uyumluluk göstermesi, referans alınan matematiksel modellerin ve bu modellerden elde edilen sonuçların doğruluğunu desteklemektedir.

Hatların toplam enerji tüketim miktarlarının yüzdesel oranları Şekil 8’de verilmiştir. Hatların toplam enerji tüketim miktarları arasındaki etkileşim incelendiğinde (Şekil 8); Ankara – İstanbul hattında %44, Ankara – Konya hattında %22, Konya – İstanbul hattında %21, Ankara – Eskişehir hattında ise %13 oranında enerji tüketildiği belirlenmiştir. Hatların uzunluğu ve TCDD tarafından belirlenen sefer sayıları dikkate alındığında Şekil 8’de verilen oranlar ile TCDD verileri arasında pozitif bir korelasyonun varlığından söz edilebilir.



Şekil 8. Hatların toplam enerji tüketim miktarları arasındaki etkileşim

4. Sonuçlar ve Öneriler

YHT'lerin enerji ihtiyacının %68'ini aerodinamik hava direncinin, %30'unu ray-tekerlek yuvarlanma direnci, %2'sini ise iç konfor unsurlarının oluşturduğu hesaplanmıştır.

- YHT'lerin enerji tüketimi büyük oranda aerodinamik tasarımlarıyla ilgilidir. Araçların rüzgâra karşı dik konumdaki kesit alan tasarımlarında yapılabilecek iyileştirmeler büyük oranda enerji tasarrufu sağlayabilir. Fakat bu aşama ancak YHT setlerinin yeniden tasarım ve imalatı ile sağlanabilir.
- Mevcut YHT setlerinde (500 yolcu için) kullanılan tahrik motorlarının gücü 7000 ile 8500 kW arasında değişmektedir. 250 km/sa. hız ve 250 kişi yolcu (ortalama kapasite) ile hareket eden bir hızlı trenin güç ihtiyacı 1540 kW'dır. Elde edilen değerler, motorların güç yeterliliği açısından yaklaşık 6 kat emniyetli olduğunu göstermektedir. Bu emniyet değeri kot farklarından kaynaklı ilave güç ihtiyacını karşılayabilecek yeterliliktedir.

Kaynaklar

1. Bosquet R., Vandanjon P.O., Coiret A., Lorino T. 2013. Model of High-Speed Train Energy Consumption, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 7: 767–771.
2. Su R., Gu Q., Wen T. 2014. Optimization of high-speed train control strategy for traction energy saving using an improved genetic algorithm, Journal of Applied Mathematics, 1-7.
3. Tian H. 2009. Formation mechanism of aerodynamic drag of high-speed train and some reduction measures, Journal of Central South University of Technology, 16: 166–171.
4. Wong K.K., Ho T.K. 2004. Coast control for mass rapid transit railways with searching methods, IEE Proceedings-Electric Power Applications, 151: 365-376.
5. Lukaszewicz P. 2000. Driving techniques and strategies for freight trains, Advances in Transport, 7: 1065–1073.
6. Acıkbaz S., Soylemez M.T. 2008. Coasting point optimisation for mass rail transit lines using artificial neural networks and genetic algorithms, IET Electric Power Applications, 2: 172-182.
7. Cucala A.P., Fernández A., Sicre C., Domínguez M. 2012. Fuzzy optimal schedule of high speed train operation to minimize energy consumption with uncertain delays and drivers behavioral response, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 25: 1548–1557.
8. Song Y., Song W. 2016. A Novel Dual Speed-Curve Optimization Based Approach for Energy-Saving Operation of High-Speed Trains, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 17: 1564–1575.
9. Yang M., Du J., Li Z., Huang S., Zhou D. 2017. Moving model test of high-speed train aerodynamic drag based on stagnation pressure measurements, PLoS ONE, 12: 1–15.
10. Jakubek D., Herzog S., Wagner C. 2012. Shape Optimization of High Speed Trains using Adjoint-based Computational Fluid Dynamics, IJRT, 1: 67–88.
11. Bacak S., Gökoğlu M., Tekir M., Gedik E. 2016. Yüksek Hızlı Bir Trenin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Aerodinamik Analizi, 3. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'16), 13-15 Ekim, Karabük.
12. Urlu C. 2014. Raylı Sistemler Dinamiği Ders Notu.
13. Akbayır Ö., Çakır F.H. 2017. Enerji Verimliliği İçin Tren Direnci Hesaplamaları, 11-13 Mayıs, 4. Ulusal Meslek Yüksekokulları Sosyal Ve Teknik Bilimler Kongresi, Burdur.
14. Owsalou G.R. 2012. Aşınmaya Maruz Parçaların Aşınma Dayanımlarının Araştırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
15. M.E.B. 2013. Raylı Sistem Araçlarının Yardımcı Devre Elektrik Sistemleri, Ankara.
16. Jiang L., Wang R.Z., Li J.B., Wang L.W., Roskilly A.P. 2018. Performance analysis on a novel sorption air conditioner for electric vehicles, Energy Conversion and Management, 156: 515–524.

Derleme Makalesi / Review Article

Değiştirilebilir Uçlu Matkap Uygulamaları Üzerine Bir Derleme

Aslan AKDULUM^{*1}, Yunus KAYIR¹

¹Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar, Ankara, Türkiye
(ORCID: 0000-0003-2030-3167) (ORCID: 0000-0001-6793-7103)

Öz

Değiştirilebilir Uçlu Matkap (U Matkap) delik delmeye yarayan bir kesicidir. Dolu malzemeye ön delik olmaksızın büyük çaplarda delik delemeye uygundur. Çeşitli yüzey formlarında (eğimli, dışbükey, içbükey vb.) sıkıntısız bir şekilde kullanılabilir. Kesici uçlar körelendiğinde ise kolaylıkla değiştirilebilir. Genelde biri merkezde diğeri ise çevrede olmak üzere iki kesici uç barındırmaktadır. Bu iki uç bazı matkaplarda aynı geometri ve kaplamaya sahipken bazı matkaplarda farklı geometri ve kaplamalar kullanılabilir. Normal helisel matkaptan farklı olarak asimetrik bir geometriye sahiptir. Bu nedenle merkez ve çevresel uçlarda farklı talaş yükleri ve kesme kuvvetleri meydana gelmektedir. Kesme parametrelerinin uygun bir şekilde verilmesiyle kesme kuvvetlerinin, delik yüzey pürüzlülüğünün, daireselliğin ve takım aşınmasının optimum gerçekleşmesi sağlanabilir. Böylelikle bu matkaplar imalatta verimli bir şekilde kullanılabilir. Bu çalışmada farklı malzemelerin U Matkap kullanılarak delinmesi ile ilgili çalışmalar gözden geçirilerek çeşitli konu başlıkları altında incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Değiştirilebilir Uçlu Matkap, Delik Delme, U Matkap.

A Review on Indexable Insert Drill Applications

Abstract

Indexable Insert Drill (Udrill) is a cutter for drilling. Large diameter holes can be drilled into the stock material without a pilot hole. It can be used in various surface forms (inclined, convex, concave, etc.) without any problems. The inserts can be easily replaced when wear. It generally has two inserts, one at the center and the other at the periphery. While these two inserts have the same geometry and coating in some drills, different geometries and coatings can be used in some drills. Unlike the normal helical drill, it has an asymmetric geometry. Therefore, different chip loads and cutting forces occur at the central and peripheral inserts. Optimum cutting forces, hole roughness, circularity and tool wear can be achieved by appropriately setting the cutting parameters. Thus, these drills can be used efficiently in manufacturing. In this study, studies related to drilling different materials using U Drill are reviewed and examined under various topics.

Keywords: Indexable Insert Drill, Drilling, U Drill.

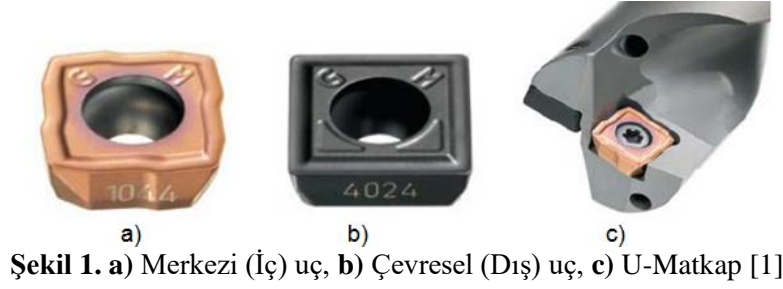
1. Giriş

Delik delme işlemlerinde kullanılan normal helisel matkaplar bazı delme operasyonları için kullanışsız veya maliyet artırıcı bir özelliğe sahiptir. Özellikle büyük çaplı deliklerde helisel matkabın radyal ağız genişliğinden dolayı malzeme içine batması yerine malzemeyi ezerek delik koordinatından sapmasına neden olur [1]. Böylelikle delik delme esnasında oluşan kesme kuvvetinde artış meydana gelir. Kesme yerine sürtünmenin artmasına bağlı olarak, kesme ortamının ısınmasına ve aşınma problemlerinin meydana gelmesine sebep olur. Bu problemi ortadan kaldırmak için ön delik delinmesi gerekmektedir [2]. Ön delik delme işlemi ise fazladan kesici takım kullanılmasına ve zaman kaybı yaşanmasına, dolayısıyla maliyetin artmasına sebep olmaktadır. Bazı delikleri ise konum özelliklerinden (eğimli,

*Sorumlu yazar: a.akdulum@gmail.com

Geliş Tarihi: 23/01/2020 Kabul Tarihi: 23/02/2020

dışbükey delik girişi vb.) dolayı delmek mümkün olamamaktadır. Bu gibi delikleri delmek için imalat endüstrisinin de yoğun bir şekilde Değiştirilebilir Uçlu Matkap (U Matkap) (Şekil 1) kullanılmaktadır [3].



DEĞİŞTİRİLEBİLİR UÇLU MATKAP, U-Drill, Indexable Insert Drill				İncelenen Parametreler															
Sıra	Tarih	Malzeme	ÇAP	İtme Kuvveti	Moment	BUF	Yüzey Pürüzlülüğü	Dairesellik	Diklik	Kesici Aşınması	Analitik Modelleme	Sonlu Elemanlar Analizi FEM	Sertlik	Ses Analizi-Titreşim	Sıcaklık	Talaş Analizi	Mikroyapı	Çapak Yüksekliği	
1	1996	SAE 1018 Çeliği	19			1	1	1		1									
2	2007	AISI 1050	20	1								1							
3	2008	Çelik	19	1	1		1			1									
4	2009	C 35 Mod By	19				1	1	1										
5	2012	No.45 çeliği		1	1					1		1				1			
6	2012	Dievar (Sıcak), Slepner (Soğuk)	16	1	1		1	1					1					1	
7	2012	4337 - AA 6082	25				1	1											1
8	2012	AA7050	21	1							1								
9	2013	magnezyum AZ31b	25	1								1	1						
10	2014	AISI1045, AISI 304, Ti-6Al-4V, Inconel 718	16	1			1			1						1	1		
11	2014	207 HB C35					1	1	1										
12	2014	42CrMoS4 (SS 2244).	24	1	1						1								
13	2015	42CrMoS4 (SS 2244).	24	1	1						1								
14	2016	taban 25mm çelik P265GH, 5mm ti kaplama	20	1	1		1												
15	2016										1								
16	2016	AISI 1045, AL 7075-T7451		1							1								
17	2016	AISI 304	16	1			1			1						1	1	1	
18	2016	2205 Dupleksli p.maz çelik	39					1		1									
19	2016	WCB Dövme döküm Çeliği						1	1										
20	2016	SAE 1030	35							1		1							
21	2017	taban 25mm çelik P265GH, 5mm ti kaplama	20				1												
22	2017	34CrNiMoS6 (SS 2541)	24											1					
23	2017	34CrNiMoS6 (SS 2541)	24	1	1						1			1					
24	2018	34CrNiMoS6 (SS 2541)	24	1	1						1			1					
25	2019	ArmoX 500T	20				1	1		1								1	
				14	8	1	11	8	3	8	7	4	2	3	3	2	3	1	

Şekil 2. Çalışmalarda incelenen başlıklar

U Matkaplar da biri merkezde diğeri çevrede olmak üzere iki adet uç bulunmaktadır (Şekil 1). Bu iki kesici ucun hem kenar geometrisi hem kaplamaları, farklı kesme hızları ve farklı yük koşullarında çalıştıkları için genellikle birbirlerinden farklıdır [4,5]. Genellikle çap 12'den başlamaktadır ve boy/çap oranı 2D ile 7D arasında kullanılmaktadır. U Matkapın ilerleme yönü delme eksenine ile aynı yönde olmalıdır. Yanal kesmeye uygun değildir [6]. Yüksek kesme hızı ve ilerleme hızlarında kullanıldığından oluşan ısıyı ve takım aşınmasını geciktirmek amacıyla kesici takımın içten soğutulması tavsiye edilmektedir [7]. Literatür incelendiğinde U Matkaplar ile ilgili yeteri kadar bilimsel çalışma yapılmadığı görülmektedir. Çalışmaların yeteri kadar olmaması bu kesici takımları etkin bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmamaktadır. Etkin bir şekilde kullanılmayan her kesici takım gibi kesici uçlar kırılmakta, U Matkap şaftı (gövde) hasar görmekte ve malzeme fire oranı artmasından dolayı maliyet artarak makine ve imalat atölyeleri için külfet oluşturmaktadır. Bu çalışmada U Matkaplar ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar araştırılarak sonuçlar incelenmiştir.

2. Yöntem

Yapılan literatür taraması sonucu 25 adet U Matkap ile ilgili çalışmaya ulaşılmıştır. Yapılan çalışmalar incelenen parametrelere göre sınıflandırıldığında Şekil 2’de ki tablo oluşmuştur. U Matkaplar ile yapılan deneysel ve teorik çalışmalar incelendiğinde “Kesme Kuvveti ve Moment”, “Yüzey Pürüzlülüğü”, “Geometrik Kalite”, “Takım Aşınması” olmak üzere dört başlık altında çalışmalar değerlendirilmiştir.

2.1. Kesme Kuvveti ve Moment

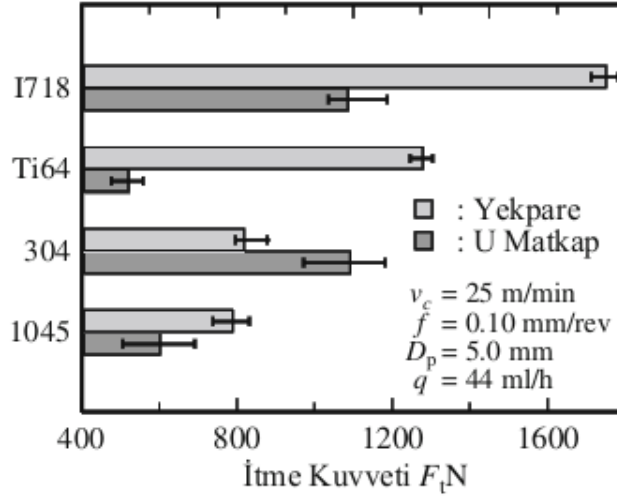
U Matkap, malzeme üzerinden hızlı biçimde talaş kaldırma metodu ile delik boşaltması için tasarlanmış kesici bir takımdır. Belirli bir ilerleme hızında parçaya dik olarak nüfuz ederek ve uç kısmındaki kesme kenar formlarının temas ettiği bölge miktarı kadar talaş nakli yapar. Bu kesme esnasında parçaya dik olarak uygulanan ilerleme miktarınca aksel kesme kuvveti (itme kuvveti, aksel kuvvet) ve kesme kenarlarının maruz kaldığı kuvvete oranla oluşan moment (tork) delme mekaniğinin değerlendirilmesinde kullanılır [8]. Kesme esnasında dengesiz kuvvetlerin oluşmasında talaş yapışmasının (BUE) ve sıkışmasının olumsuz etkileri mevcuttur. Kesme kuvvetleri BUE'nin büyüklüğüne ve BUE'nin büyüme süresine bağlıdır [9]. Farklı kimyasal bileşime ve özelliğe sahip malzemeler için oluşan kesme kuvveti ve momentler farklılık göstermektedir. Örneğin 25 mm kalınlığında karbonlu çelik ve 5 mm kalınlığında titanyum (Ti) malzemelerinin patlayıcı kaynak ile birleştirilmeleri sonrasında iki farklı U Matkap ile delinmiştir. 1 numaralı U Matkap aynı geometri ve kalitede uçlara sahipken 2 numaralı U Matkap farklı geometri ve kalitede uçlara (merkezi ve çevresel) sahiptir. Delme esnasında titanyum ve çeliğin kesme kuvveti ve moment değerlerinde fark gözlenmiştir. Titanyum tabakanın delinmesine kıyasla çelikte, momentin 10 Nm ve kesme kuvvetinin ortalama 500-2000 N kadar artmasına neden olmuştur. Titanyum tabakasının işlenmesinde 2 numaralı matkap, 1 numaralı matkaba göre %22’den fazla kesme kuvvetine sebep olmuştur. Çeliğin işlenmesinde ise yüzde 24’ten daha fazla bir artışa neden olmuştur. Moment değerlerinde ise Ti işlenmesinde 1. takıma göre ikinci takımda %2’lik bir artış söz konusu iken çeliğin işlenmesinde 1. takıma göre ikinci takımda moment değeri %5 civarında azalmıştır. (Tablo 1) [10].

Tablo 1. Delme takımlarının her biri için ortalama değerler ve sinyal standart sapması (SD) [10]

Takım	Malzeme	İtme Kuvveti (N)	Moment (Nm)
Takım 1	Titanyum Kalite 1	Ortalama 970.7 SD 39.7	Ortalama 9.29 SD 0.35
	P265GH Çelik	Ort. 2424.3 SD 714.3	Ort. 20.18 SD 5.35
Takım 2	Titanyum Kalite 1	Ort. 1187.8 SD 39.4	Ort. 9.48 SD 0.34
	P265GH Çelik	Ort. 3008.7 SD 871.8	Ort. 19.07 SD 5.0

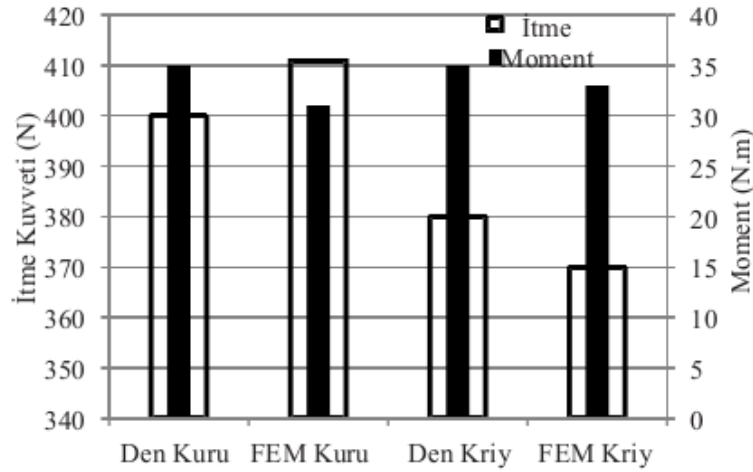
Başka bir çalışmada ise verilen yağ püskürtmesi altında kesilmesi zor malzemelerin (Inconel 718, Ti6Al4V, AISI 304) ve AISI 1045 malzemesinin normal helisel matkap ve U Matkap ile delinmesi deneylerinden elde edilen verilerin karşılaştırılması yapılmıştır (Şekil 3).

Şekil 3 incelendiğinde normal helisel matkaba kıyasla AISI 304 dışında kalan malzemelerin delinmesinde U Matkapın daha düşük kuvvetler oluşturduğu açıktır. Ancak AISI 304’ün delinmesinde U Matkap yüksek bir kesme kuvveti göstermiştir. Bu yükselmeyi yazarlar kesme açısı azaldığında ve talaş kalınlığı arttığında kesme kuvvetinin artmasına bağlamışlardır [11].



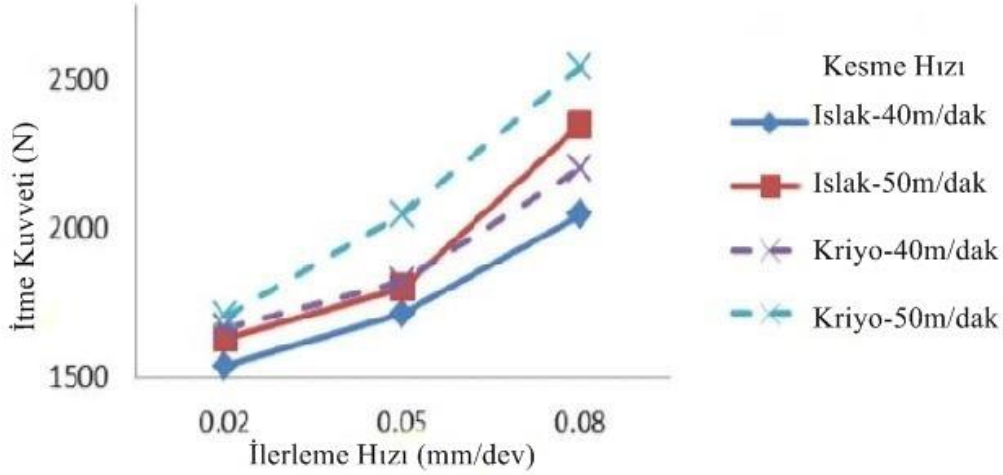
Şekil 2: Kesme kuvveti üzerinde iş parçası malzemesinin etkisi [11].

Delik delme işleminin kapalı bir bölgede meydana gelmesinden dolayı talaşın o bölgeden atılmasın da sürtünme gibi nedenlerden dolayı aşırı ısınma problemleri meydana gelmektedir. Bu olumsuzluğun üstesinden gelerek ısının artmaması için ise değişik soğutma yöntemleri ve çeşitleri denenmektedir. Yapılan bir çalışmada MgAZ31b malzemesine U Matkapın soğutucu deliklerinden uygulanan kriyojenik soğutma (LN₂) ve kuru şartlarda delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak delme ve sonlu elemanlar analizi (FEM) arasındaki farklar kesme kuvveti ve moment açısından incelenmiştir. Kuru işlem için deneysel ve FEM sonuçlarında kesme kuvvetinde 10N'luk bir fark varken, moment sonuçlarında yaklaşık 5 Nm fark vardır. Kriyojenik işlem için ise deneysel ve FEM sonuçlarında kesme kuvvetinde 10N'luk bir fark varken, moment sonuçlarında yaklaşık 2 Nm fark vardır (Şekil 4) [12].



Şekil 3. Kuru ve kriyojenik işlem için FEM simülasyonu ile deneysel kesme kuvveti ve momentler [12]

Başka bir çalışmada ise emülsiyon (sulu, geleneksel) ve kriyojenik soğutma altında AISI 304 paslanmaz çeliğin delinmesindeki kesme kuvveti Şekil 5'te gösterilmiştir. Daha düşük kesme hızında 40 m/dak ve daha düşük ilerleme hızı 0.02 mm/dev de sırasıyla emülsiyon ve kriyojenik soğutma da kesme kuvveti 1537 N ve 1667 N olarak çıkmıştır. Emülsiyondan daha fazla kriyojenik soğutma altında yaklaşık %7,8'lik bir kesme kuvveti artışı fark edilmiştir. İlerleme oranı 0,05 mm/dev ve 0,08 mm/dev'e çıkarıldığında, talaş yükünün artması nedeniyle, kesme kuvveti her iki işleme koşulları altında artmaya devam etmiştir (Şekil 5) [7].



Şekil 4. İtme kuvveti ve ilerleme hızı ilişkisi [7]

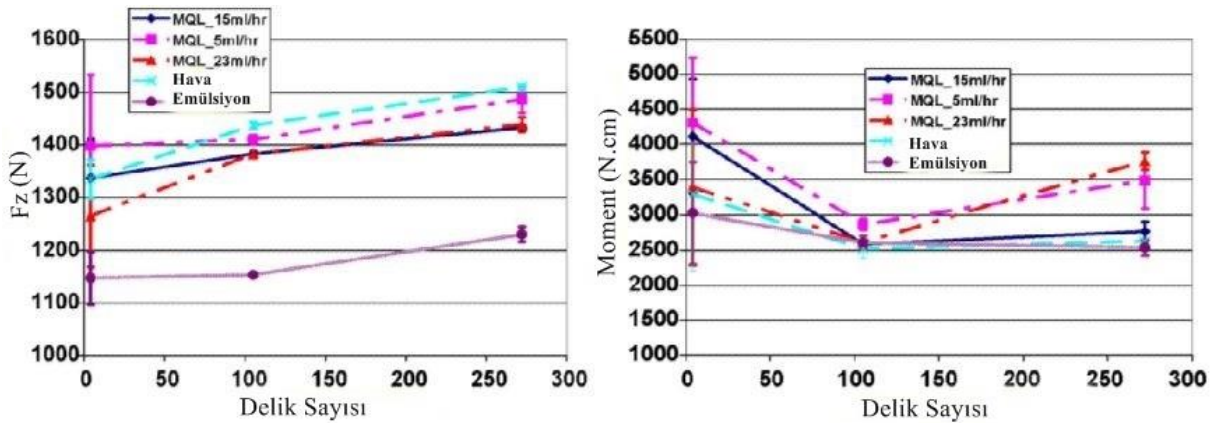
Soğutma veya talaş tahliyesi tarafından üretilen ses, tırlama titreşimleri ile karşılaştırıldığında düşük genliktedir. Talaş sıkışması sönümlenme etkisi yaratmaktadır. Talaş tahliye oluklarının geometrisine ve talaşlara bağlı olarak talaş oluklarında talaş sıkışması nedeniyle sürtünme kuvveti oluşabilir. Bu ekstra sönümlenme, titreşim seviyesini azaltabilir veya tırlama dinamiğini değiştirebilir [13]. U Matkaplardaki tırlama titreşimlerinin incelendiği bir çalışmada ise U Matkaplarda merkezi ve çevresel uçlardaki kesme kuvveti ve moment değerlerinin ayrı ayrı hesaplanmasına yönelik bir çalışma yapılmıştır (Tablo 2) [14].

Tablo 2. Merkezi ve çevresel uçlar tarafından üretilen tahmini moment ve eksenel kuvvetler [14]

İlerleme Hızı (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dak)	Moment (Nm)		Eksenel.kuvvet (N)	
		Çevresel Uç	Merkezi Uç	Çevresel Uç	Merkezi Uç
0.12	200	-16.10	-5.84	-1431	-1524
0.14	200	-17.87	-6.48	-1510	-1609
0.18	200	-21.01	-7.62	-1561	-1663

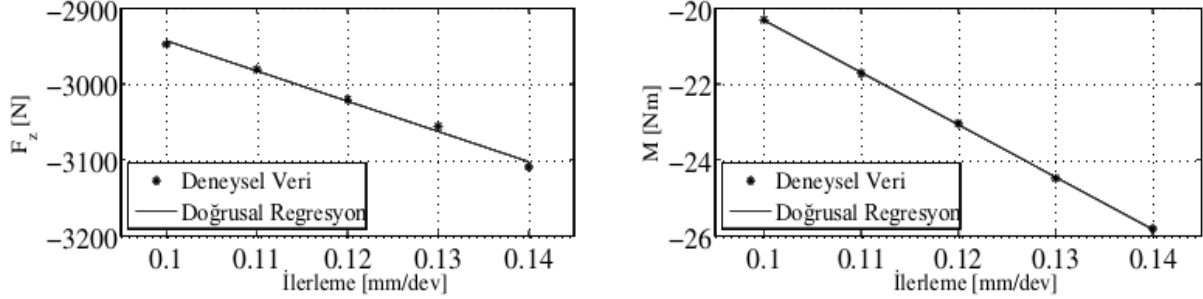
U Matkaplar ile delme de minimum miktarda yağlama (MQL), hava ve emülsiyon soğutma için yapılan deneysel çalışmanın sonuçları görülmektedir (Şekil 6).

Kuvvet ve moment ölçümleri yüksek bir farklılık göstermemiştir ancak en yüksek kuvvet hava da ve en düşük kuvvet emülsiyon da gözlenmiştir (Şekil 6) [15].



Şekil 5. Delik sayısına göre kesme kuvveti ve moment ölçümündeki değerler [15]

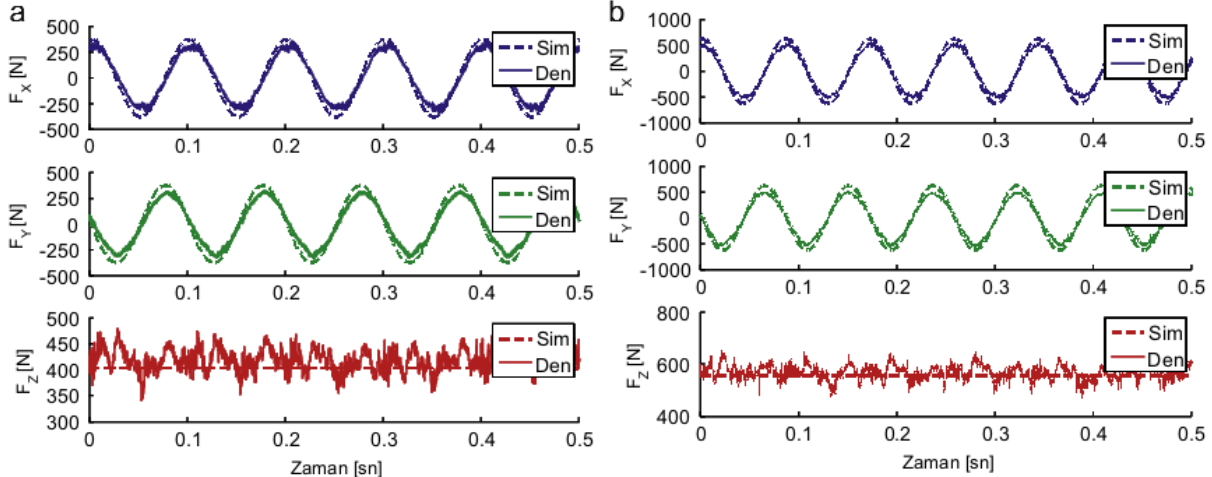
Yapılan bir çalışmada tırlama (Chatter) titreşimlerine daha az eğilimli olan ve böylece çalışma sırasında daha az gürültü yapan takımın tasarlanması amacıyla zaman alanı modellenmesi ile deneysel verileri karşılaştırmışlardır. Farklı ilerleme hızları için kesme kuvveti ve moment değerleri hesaplanmıştır. Deneysel ile modelleme verilerinin aralarında iyi bir uyum olduğu gözlenmiştir (Şekil 7) [16].



Şekil 6. Farklı ilerleme oranlarında ölçülen moment ve kesme kuvvetleri. Malzeme SS 2244 ve kesme hızı 200 m/dak [16]

Yapılan bir çalışmada kesici kenarları küçük elemanlara bölerek değiştirilebilir matkaplardaki statik kesme kuvvetlerini tahmin etmek için bir model önerilmiştir. Bu model kullanılarak, kuvvetler her kesici uç üzerinde ayrı ayrı hesaplanabildiğinden, kesme yüklerinin tahmininde kesici uç farklılıkları dikkate alınabilir [18].

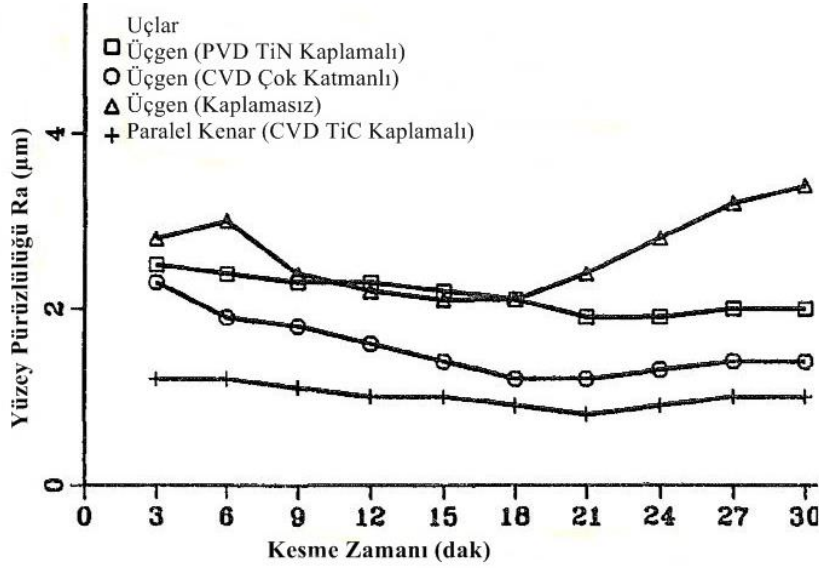
Yapılan bir çalışmada Alüminyum 7050 alaşımına 6 çapında bir ön delik deldikten sonra 21 çapında U Matkap ile delik delinmiştir. İtme kuvveti deneysel ve analitik modellemeyle karşılaştırılmıştır ve uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 8) [17].



Şekil 7. Zaman ile İtme Kuvvetlerinin değişimi [17]

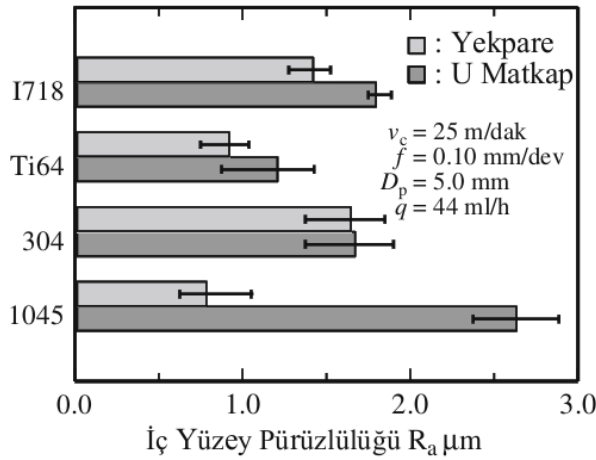
2.2. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü delme işleminin ne kadar sağlıklı olup olmadığının bir göstergesidir. İşlenen yüzeylerde delik delme esnasında oluşan talaş tahliyesi sırasında talaşın işleme yüzeyine istenmeyen biçimde sürtünmesi yüzey pürüzlülük kalitesini etkilemektedir [8]. Yüzey pürüzlülüğünü, ilerleme hızı, kesici geometrisi ve kaplama türü belirlemektedir. U Matkaplardaki uç geometrisine göre yüzey pürüzlülüğünün ölçüldüğü çalışmanın sonuçlarına göre AISI 1018 çeliğinin delinmesinde en iyi performans baklava biçiminde CVD TiC kaplamalı takım ile elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü olarak en zayıf performansı ise üçgen biçimli kaplamasız takma uçlar sergilemiştir (Şekil 9) [9].



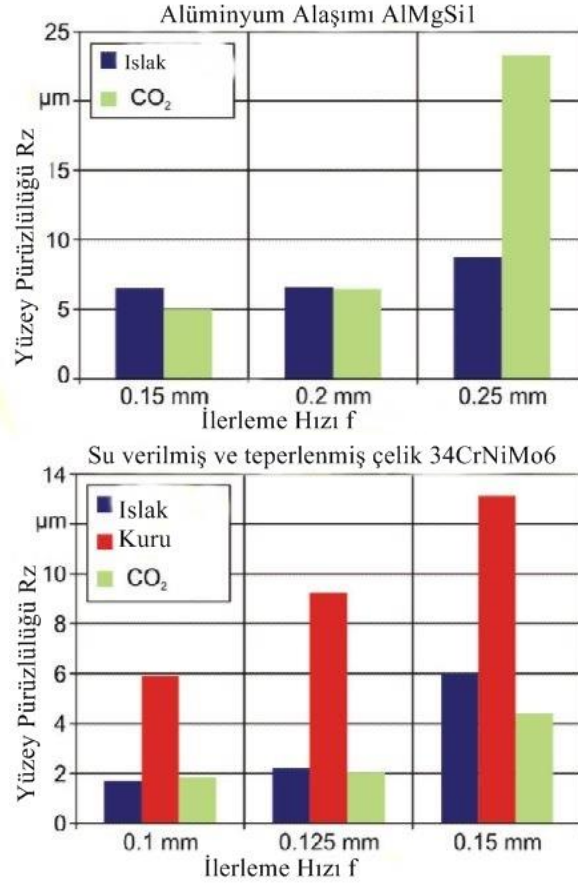
Şekil 8. Farklı U Matkaplarla delinmiş deliklerin yüzey pürüzlülüğü [9]

Tüm kesme parametreleri aynı olmasına rağmen malzemenin değişimi ile yüzey pürüzlülüğü değişmektedir. Çeşitli iş parçası malzemelerine U Matkap ve normal helisel matkap ile açılmış deliğin iç yüzeyindeki pürüzlülük değerleri (R_a), Şekil 10'da gösterilmektedir. U matkapla kesilen, kesilmesi zor olan üç malzemenin (Inconel 718, AISI 304, Ti6Al4V) yüzey pürüzlülüğü değerleri, her malzeme için normal helisel matkap kullanıldığında nispeten düşük ve aynı derecede iken, AISI 1045 kesiminde net bir fark gözlenmiştir (Şekil 10). Bunun temel nedeni olarak U Matkabın açılırları ve AISI 1045'in mekanik özellikleri gösterilmiştir [11].



Şekil 9. İş parçası malzemesinin iç yüzey pürüzlülüğüne etkisi [11]

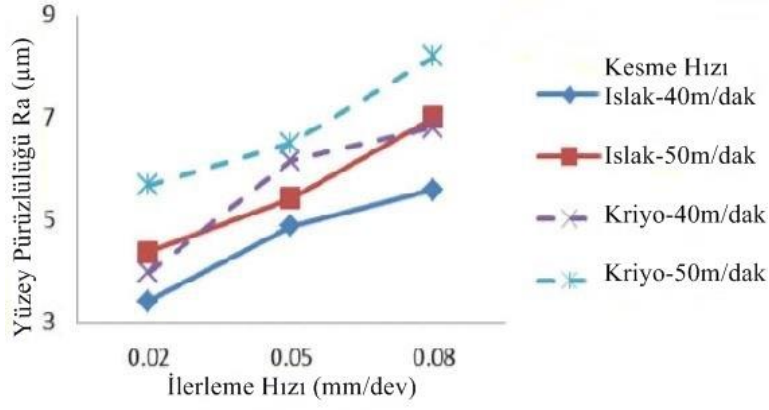
Şekil 11, 34CrNiMo6 çeliğin yanı sıra alüminyum alaşımı AlMgSi1'in işlenmesinden sonra ölçülen yüzey pürüzlülüğünü (R_z) göstermektedir. 34CrNiMo6'nın delinmesi için kuru işleme en kötü yüzey kalitesine yol açar. Yüzey pürüzlülüğü değerleri, ilerleme hızına bağlı olarak $R_z=5,9\mu\text{m}$ ve $R_z=13,1\mu\text{m}$ arasında değişmektedir. Diğer taraftan soğutma uygulanırsa, yüzey kalitesi açıkça artırılabilir. Hem yağlayıcı hem de CO_2 kar jeti yaklaşık $R_z = 1,7... 6 \mu\text{m}$ değerine ulaşır. Soğutma yağlayıcı ve CO_2 kar jeti ile delmede yüzey pürüzlülüğü, kuru işleme için karşılaştırılabilir ve daha avantajlıdır. Alüminyum alaşım AlSiMg1'in işlenmesi için, iki soğutma yönteminin R_z değerleri de birbirine benzerdir (Şekil 11) [20].



Şekil 10. 34CrNiMo6 ve AlMgSi1'in işlenmesi için soğutma tipinin yüzey kalitesi üzerindeki etkisi [20]

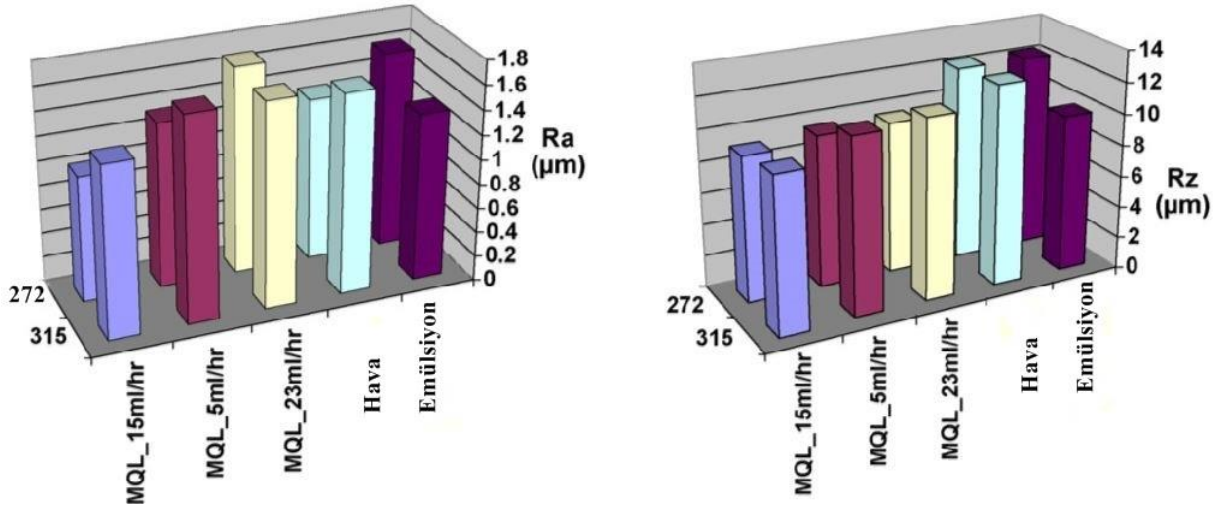
Yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesinde çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden kalem tabanlı (mekanik) profilometre ve optik profilometre arasındaki farklar bir çalışmada incelenmiştir. Örneğin yüzey pürüzlülüğü kalem tabanlı profilometre ile 2,6 mikron olarak ölçülürken optik işlemde 3,5 mikron olarak ölçülmüştür. Optik profilometre ile ölçülen değer kalem profilometre ile ölçülenden %35-85 daha fazladır [10,19].

Emülsiyon ve kriyojenik soğutma altında AISI 304 paslanmaz çeliğin delinmesinde yüzey pürüzlülüğünün değişimi Şekil 12'de gösterilmiştir. Daha düşük kesme hızında 40 m/dak ve daha düşük ilerleme hızı 0,02 mm/dev, yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla emülsiyon için 3,42 µm ve kriyojenik soğutma için 3,97µm değerleri elde edilmiştir. Emülsiyon soğutmadan %13 daha fazla kriyojenik soğutmada yüzey pürüzlülüğü görülmüştür. 0,05 mm/dev ve 0,08 mm/dev'lik daha yüksek ilerleme oranları için, emülsiyon soğutmaya karşı kriyojenik LN₂ soğutma altında yüzey pürüzlülüğünde %21 ve %18 artış meydana gelmiştir. Emülsiyon yerine kriyojenik soğutmanın uygulanması ile %15 ve %23 arası yüzey pürüzlülüğünde artış meydana gelmiştir (Şekil 12) [7].



Şekil 11. Yüzey pürüzlülüğü ve ilerleme hızı arasındaki ilişki [7]

Yüzey pürüzlülüğü delik sayısı arttıkça artmaktadır ve yüzey pürüzlülüğü ölçümünde delik derinliğinin birden fazla noktasında ölçümler yapılarak en optimal değer bulunması sağlanmaktadır. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada deliklerin yüzeyi 272 delikten ve 315 delikten sonra incelenmiştir (Şekil 13). Ölçümler, delikten 4 noktada yapılmıştır. Ra ve Rz değerleri, yüksek bir farklılık olmamasına rağmen MQL-15 ml/saat ve emülsiyon delmenin en iyi sonucu verdiğini göstermektedir. Emülsiyon destekli delme ile karşılaştırıldığında MQL ve hava destekli delme deneyleri için daha yüksek yüzey profili gözlemlenmiştir. Rz değerine yakından bakıldığında, hava destekli delme testleri için daha yüksek bir değer gözlemlenmiştir (Şekil 13) [15].



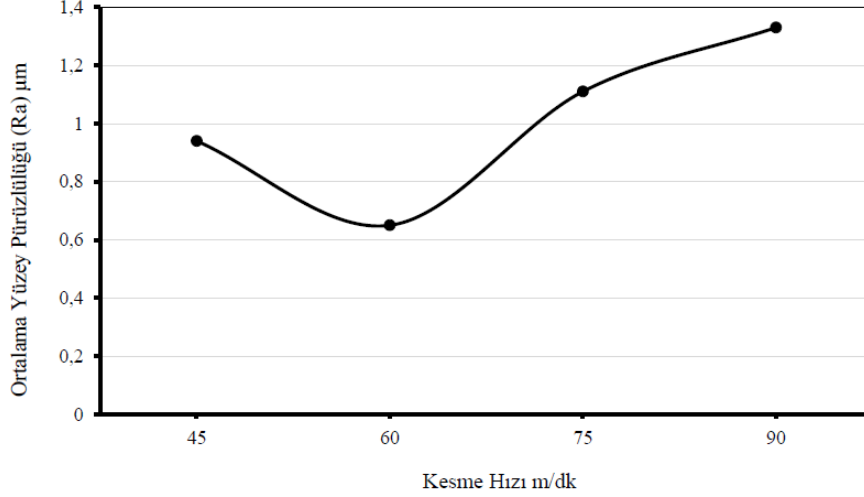
Şekil 12. Ra ve Rz değerleri [15]

Yapılan bir çalışmanın deneysel sonuçları ANOVA ile analiz edilmiştir. Tablo 3'te yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli değişkenin %70,64 ile delik çapı olduğunu göstermektedir. İlerleme hızı %24,97 ile yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir [2].

Tablo 3. Yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi (Analysis of variance for the surface roughness) [2]

Varyasyon kaynağı		Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Ortalama Kare	Katkı %
A	Delik çapı	2	67.8224	33.911	70.64
B	Delik derinliği	2	1.1657	0.5828	1.21
C	İlerleme hızı	2	23.9766	11.988	24.97
D	Kesme hızı	2	3.0485	1.5243	3.18
Toplam		8	96.013		100

Yapılan bir çalışmada Armox 500T zırh çeliği U Matkap ile delinmiştir. Bu çalışmada kesme hızını bir miktar arttırdığımızda yüzey pürüzlülük değerlerinin iyileştiği, ancak kesme hızını arttırmaya devam ettiğimizde ise yüzey pürüzlülük değerlerinin olumsuz etkilendiği gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda kesme hızının artırılması ile kesici takım ideal kesme hızına ulaşana kadar yüzey pürüzlülüğünün daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak kesme hızının ideal hızdan daha fazla bir değere çıktığında ise takım tezgahında artan titreşim sebebiyle yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilediği de görülmüştür (Şekil 14) [21].



Şekil 13. Kesme hızı ve yüzey pürüzlülüğü [21]

2.3. Geometrik Doğruluk

Yapılan delme işlemlerinden sonra deliğin geometrik kalitesi çeşitli şekillerde incelenmektedir. Bunlar dairesellik, silindiriklik, diklik ve deliğin çaptan sapması olarak çalışmalarda kontrol edilmiştir.

Yapılan bir çalışmada varyans analizine göre silindirikliği etkileyen en önemli değişkenin %77,72'lik yüzdelerle katkıyla delik derinliği olduğunu belirtmişlerdir. Takım sapması delme derinliği arttıkça artmaktadır. Delik çapı ve kesme hızı da %8,85 ve %10,86 oranındaki katkılarla silindiriklik üzerinde önemli etkiye sahiptir [1, 2].

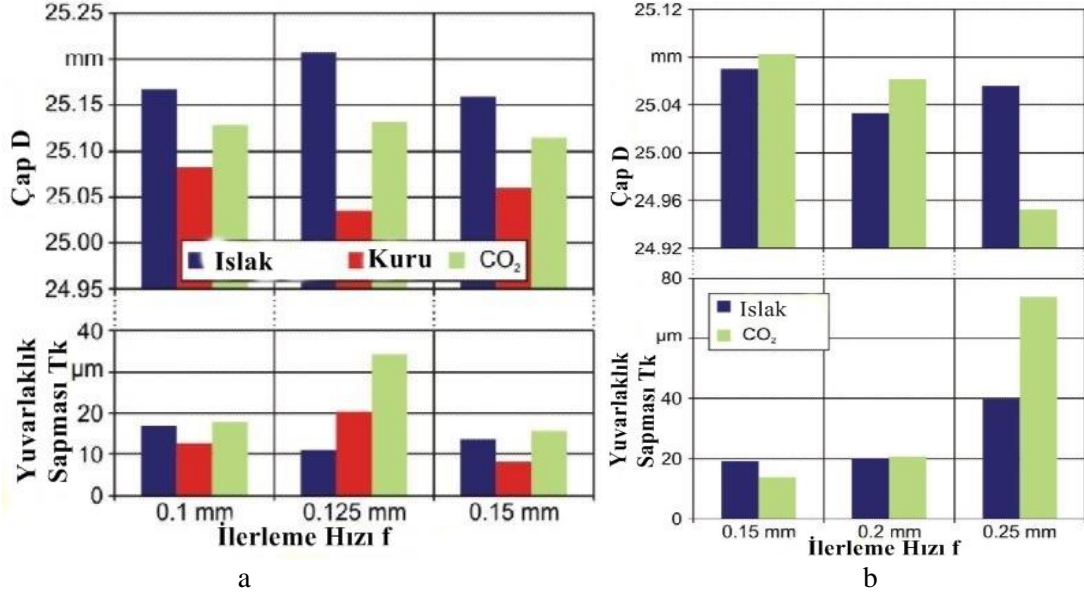
Yapılan bir çalışmada U Matkabın aksenal salgı değerleri ölçüldüğünde merkezi uç salgı yapmazken, çevresel uç 19 µm salgı yapmıştır [23].

Dövme dökme demir malzemesinde minimum silindiriklik, düşük iş mili hızı, düşük ilerleme ve orta kesme derinliği ile elde edilebilir. Minimal dikeylik, daha yüksek iş mili hızı, düşük ilerleme ve daha düşük kesme derinliği ile elde edilebilir. Silindiriklik ve diklik için ortalama tahmin hataları sırasıyla %2,34 ve %2,39'dur [22].

Varyans analizine göre dikliği etkileyen en önemli değişkenin %75,18'lik bir yüzde katkıyla delik derinliği olduğunu belirtmişlerdir. Delik derinliği 45–95 mm aralığında arttığında, diklik değerinde maksimum sapma tespit edilmiştir. Bu, takımın aşırı sapması ve delik derinliği arttıkça talaşların kesim bölgesinden çıkarılmasındaki zorluğa bağlı olabilir. Bu nedenle, talaş kaldırma mesafesi arttığında talaş kontrolü dikkatli bir şekilde düşünülmelidir. Delik çapı ve ilerleme oranı, sırasıyla %9,70 ve %11,31 oranındaki yüzdelerle katkıyla diklik üzerinde önemli etkiye sahiptir [1, 2].

Genel olarak dik işlemede delik operasyonunda kesme hızının artması ile dairesellik miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. Sleiþner soğuk iş çeliği, dievar derecesine göre daha kararlı bir yapı ortaya çıkarmıştır. Dik işlemede U Matkap ile yapılan deneylerde T2000D takma ucunun çaptan sapma oranları dievar için ortalama 0,155 mm, sleipner için ise 0,170 mm çıkmıştır [8].

Soğutma yöntemi ve değişen malzemelerin çap ve dairesellikten sapmada etkisi mevcuttur. 34CrNiMo6 malzemesine delinmiş deliklerde soğutma olmayan testlerin çapı, D=25 mm nominal çapa en yakındır. AlMgSi sıvanma problemleri nedeniyle kuru işleme gerçekleştirilmemiştir (Şekil 15) [20].

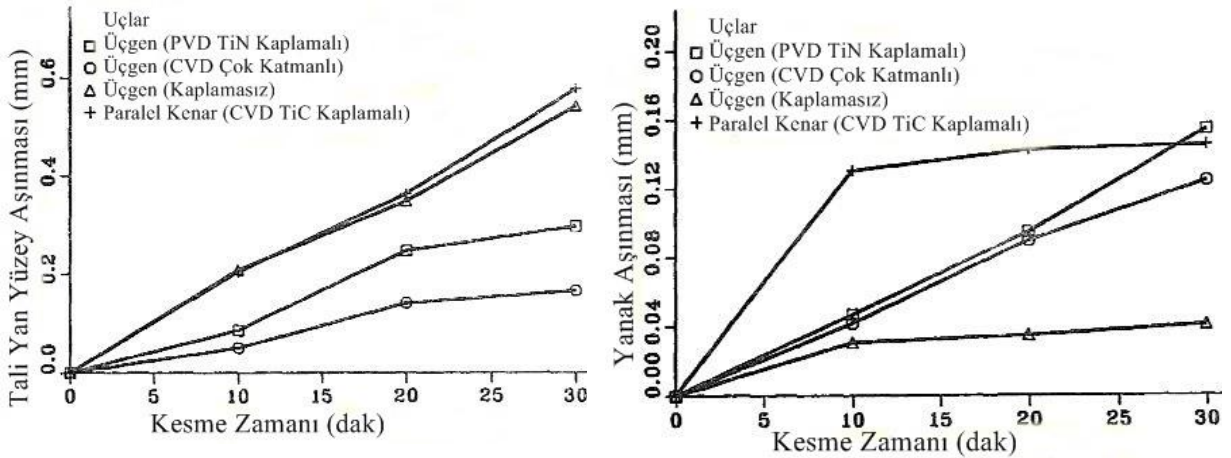


Şekil 14. Soğutma yönteminin çap ve yuvarlaklık sapması üzerindeki etkisi. (a) 34CrNiMo6, (b) AlMgSi1 [20]

2.4. Takım Aşınması

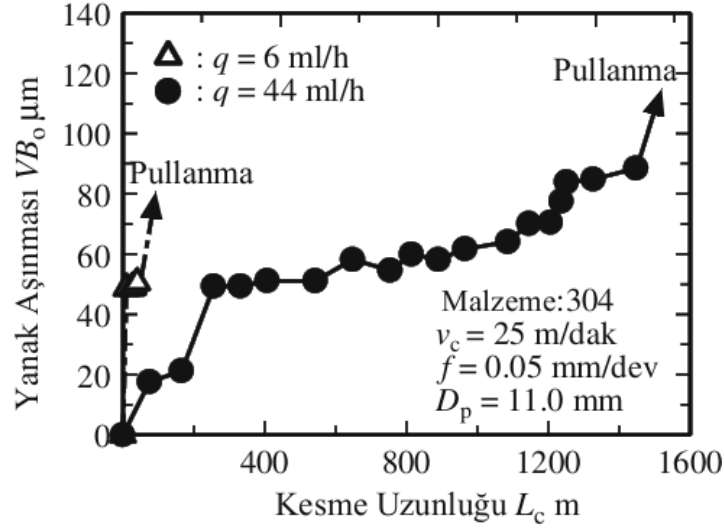
Takım aşınması, takımın orijinal şeklinin kaybolmasına neden olur ve bu sayede takım, zamanla verimsizliğe ve hatta tamamen kırılmaya neden olur. Paslanmaz çeliğin delinmesinde talaş kontrolü önemlidir çünkü takım aşınmasını belirler. Emülsiyon soğutmada, kesme bölgesi arayüz bölgesinde yüksek kesme sıcaklığı nedeniyle adheziv (yapışma) aşınması meydana gelir. Bu daha yüksek kesme bölgesi sıcaklığı, delme takımının iş malzemesine yapışmasına ve yüksek takım aşınmasına ve iş parçası malzemesinin yumuşamasına izin verir. Takım aşınması, kriyojenik soğutmada emülsiyon soğutmadan daha azdır. Kesme sıcaklığı kriyojenik soğutmada kesici uçların daha az termal şokuna neden olur. Sonuç olarak, takım abrasiv (sürtünme) aşınmaya maruz kalır ve parçacıkların kesici takım malzemesinden bir kısmının kopmasına neden olur [7].

Geometri ve kaplama malzemelerinin karbür uçlar üzerindeki etkisini incelemek için delme performansı ve takım aşınma araştırmaları gerçekleştirilmiştir. Delik kalitesi tali yan yüzey aşınmasına bağlı olduğundan ve deliğin alt yüzeyi serbest yüzey aşınmasına bağlı olduğundan, bu iki aşınma fonksiyonu sırasıyla Şekil 16'da gösterilmektedir. Delme deneyleri, Paralel kenar (Rhomboid) uçların yüksek aşınma oranına sahip olmasına rağmen, en iyi delikleri oluşturduğunu ve diğer uçlardan daha iyi delikler ürettiğini göstermektedir (Şekil 16) [9].



Şekil 15. (Sol) Dış uçta tali yan yüzey aşınması, (Sağ) İç uçlarda yanak aşınması [9]

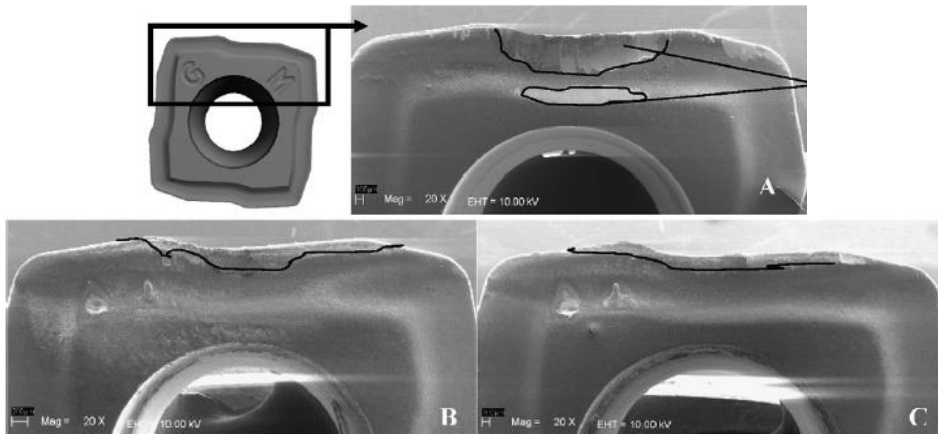
Bir çalışmada işlenecek malzeme olarak AISI 304 kullanılmıştır, bu da U Matkap için nispeten yüksek takım sıcaklığı ve kesme kuvveti göstermiştir. Yeni bir takımda bile kuru kesimin hemen neden olduğu tanecik kopmasından dolayı MQL yağlama koşulları olarak 6 ve 44 ml/saat yağ buharı akış oranları kullanılmıştır. Delik derinliği 15 mm kör bir deliktir. Hazırlanan ön delik çapı, iç uçların etkisini ortadan kaldırmak ve dış uçların aşınma davranışına odaklanmak için 11 mm olmuştur. Serbest yüzey aşınması, tanecik kopmasının oluşmasından dolayı 6 ml / saat için kesme uzunluğu 50.3m'de büyük ölçüde artmıştır (Şekil 17) [11].



Şekil 16. Kesme uzunluğu ve alt serbest yüzey aşınması arasındaki ilişki [11]

Tüp levha delme işlemi için takım aşınma takibi ile ilgili çap 39 U Matkap ile 2205 duplex paslanmaz çeliğin delinmesi işleminde ANOVA analizi gerçekleştirilerek takımın optimum kullanımı için bir model gerçekleştirilmiştir. Bu deney için kullanılan matkap ile takım ömründe yaklaşık %44'lük bir artışla ve tolerans dışı kalma riskinde önemli bir azalma ile delikleri ± 0.1 mm çapında bir toleransta tutabileceğini göstermektedir [24].

Adhesiv (yapışkan) aşınma, kaplamanın dökülmesiyle sonuçlanır, bu da kesme kenarı ve talaş kırıcısında tanecik kopmasına (chipping) yol açar [11]. Emülsiyon ile soğutma işleminde daha yüksek krater aşınması görülmüştür, yıpranma alt katmana uzamıştır. Bununla birlikte, MQL ve hava soğutması için, aşınma emülsiyonda görülenden daha düşük olmakla birlikte, hava ile MQL'den biraz daha büyüktür. En büyük fark, aşınmanın MQL ve hava için kenar boyunca uzanmasıdır, emülsiyon için ise kenarın ortasına yoğunlaşır ve alt tabakaya (WC ve Co matrisi) ulaşır (Şekil 18) [15].

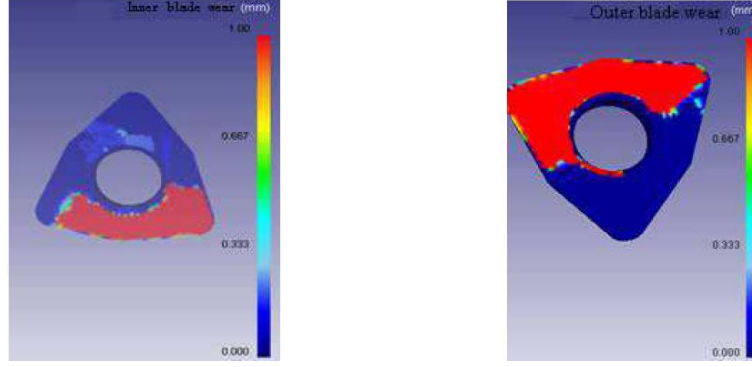


Şekil 17. 272. delikten sonra merkezi ucun talaş yüzü. (A) Emülsiyon, (B) hava, (C) MQL-5 ml/h [15]

Emülsiyonun yüksek soğutma kabiliyeti, sadece daha yüksek aşınmaya neden olmakla kalmayıp aynı zamanda talaş yüzeyinde farklı talaş teması ve talaş hareketi ile sonuçlanan daha yüksek gerilmeye neden olabilir. Talaşın yüksek sıcaklıklarda ve gerilimlerde kayması nedeniyle, talaş pekleşir ve

genellikle talaş yüzüne yapışır. Birbirinin üstünde sertleşmiş malzeme, talaşın MQL ve hava için kırılmasına yardımcı olurken, emülsiyon destekli delme için yapıştığına dair bir kanıt ulaşılamamıştır [15].

Yapılan bir çalışmanın sonlu elemanlar analizinde iki ucun aşınma alanlarının ana kesici kenara yakın olduğu yani parçaların ve uçların temasının kesici kenarlara yakın olduğu gözlemlenebilir. Maksimum aşınmış parçalar kesici kenarların yerine yerleşir. Bağın artması, oksidasyon ve difüzyon aşınmasına yol açar. Dahası, iş parçasının yüksek sıcaklık alanı, kesici kenara yakındır (Şekil 19) [25].



Şekil 18. 119. delikte iç ve dış uç aşınması [25]

3. Sonuçlar

U Matkaplar ile ilgili ulaşılabilen çalışmalar incelenmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde U Matkapların deneysel veya matematiksel yöntemler kullanılarak daha farklı malzeme grupları ve deney parametreleri için incelenmesi gerektiği değerlendirilmektedir. Böylelikle bu takımlar daha etkin bir şekilde kullanılarak endüstri için verimlilik artırılabilir.

U Matkaplar ile ilgili çalışmalar “Kesme Kuvveti ve Moment”, “Yüzey Pürüzlülüğü”, “Geometrik Kalite” ve “Takım Aşınması” başlıkları altında incelenerek tespit edilen sonuçlar konu başlıkları altında belirtilmiştir.

Kesme Kuvveti ve Moment;

U Matkaplar, normal helisel matkaplara göre daha düşük kesme kuvveti ve moment oluşturmaktadırlar. Ancak kriyojenik işlemler uygulandığı takdirde bu değerler artmaktadır. İki uç için ayrı ayrı kuvvetler hesaplandığında hemen hemen yakın değerler söz konusuken oluşan moment açısından çevresel uca merkezi uca göre yaklaşık üç kat daha fazla değer oluşmaktadır. Açılan delik sayılarının soğutma biçimine göre kuvvet ölçümü yapıldığında ise en az kuvvet emülsiyon soğutmada ölçülürken en fazla kuvvet hava soğutmada ölçülmüştür. Moment açısından ise hemen hemen tüm soğutma türlerinde benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Yüzey Pürüzlülüğü;

Geometrilere göre yüzey pürüzlülüğünün incelenmesinde en iyi performansı paralel kenar biçiminde (Rhomboid) CVD TiC kaplamalı takım ile elde edilirken, en kötü performansı ise üçgen biçimli kaplamasız takımla elde edilmiştir. Değişik soğutma yöntemleri altında yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde ise emülsiyon soğutmada daha düşük yüzey pürüzlülüğü ölçülürken kesiciye kriyojenik işlem uygulandıktan sonra ise yüzey pürüzlülük değerleri artış göstermiştir. Normal helisel matkaplar ile U Matkaplar kıyaslandığında ise Inconel718, Ti6Al4V, AISI 304 ve AISI 1045 malzemesi için normal helisel matkaplarda daha iyi yüzey pürüzlülüğü çıkmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün de en önemli faktör olarak %70,64 ile delik çapı, en az önemli ise %1,21 ile delik derinliği olduğu tespit edilmiştir. Hava, emülsiyon ve MQL soğutma altında yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde ise en kötü sonuç hava soğutmada iken en iyi yüzey kalitesi ise MQL ve emülsiyonda elde edilmiştir.

Geometrik Kalite;

Silindiriklik için en önemli etken %77,72 ile delik derinliği iken en az önemli etken %2,57 ile ilerleme hızı olduğu tespit edilmiştir. Diklik için en önemli etken %75,18 ile delik derinliği iken en az önemli etken %3,81 ile kesme hızı olduğu tespit edilmiştir.

Dik işlemede U Matkap ile yapılan deneylerde T2000D takma ucunun çaptan sapma oranları dievar için ortalama 0,155 mm, sleipner için ise 0,170 mm çıkmıştır.

Soğutma yöntemi ve değişen malzemelerin çap ve dairesellikten sapmada etkisi mevcuttur. 34CrNiMo6 malzemesine delinmiş deliklerde soğutma olmayan testlerin çapı, D=25 mm nominal çapa en yakındır.

Takım Aşınması;

Kesici uç profili ve kaplama türüne göre serbest yan yüzey aşınması incelendiğinde en az aşınma üçgen kaplamasız da elde edilirken, en fazla aşınma kare CVD TiC kaplamalı uçta elde edilmiştir. Kesici uçlarda oluşan BUE bir dereceye kadar aşınmayı engellerken bir dereceden sonra aşınmayı artırmaktadır. Takım aşınması emülsiyon ve kriyojenik işlem ile kıyaslandığında ise en az aşınma kriyojenik soğutmada gerçekleşmiştir. Hava, emülsiyon ve MQL soğutma altında takım aşınması incelendiğinde ise en kötü sonuç emülsiyon soğutmada iken en iyi sonuç ise MQL ile elde edilmiştir.

Kaynaklar

1. E. Kabaklı, «Optimization Of Process Parameters Of Drilling Using The Taguchi Method.,» Yüksek Lisans Tez, Çukurova Üniversitesi, 2009.
2. E. Kabaklı, M. Bayramoğlu ve N. Geren, «Evaluation Of The Surface Roughness And Geometric Accuracies In A Drilling Process Using The Taguchi Analysis.,» *Materials and technology*, cilt 1, no. 48, pp. 91-98, 2014.
3. S. Korucu, «Delik İşlemlerinde Kesiciler Üzerine Etki Eden Gerilmelerin Matematiksel Olarak Modellenmesi.,» Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, 2007.
4. S. K. Alhat ve S. Pimpale, «Geometric Optimization of ‘U’-Drill Cutting Edge by Finite Element Analysis (FEA) and its Experimental Validation.,» *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, cilt Vol. 5 , no. Issue 06, pp. 542-546, June-2016.
5. A. Parsian, M. Magnevall, T. Beno ve M. Eynian, «A Mechanistic Approach to Model Cutting Forces in Drilling with Indexable Inserts.,» *Procedia CIRP*, cilt 1, no. 24, pp. 74-79, 2014.
6. Z. M. Kılıç ve Y. Altıntaş, «Generalized modelling of cutting tool geometries for unified process.,» *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, no. 104, pp. 14-25, 2016.
7. K. M. Pradeep ve A. L. Shakeel, «Drilling of AISI 304 Stainless Steel under Liquid Nitrogen Cooling: A Comparison with Flood Cooling.,» *Materials Today: Proceedings*, cilt 1, no. 4, pp. 1518-1524, 2017.
8. İ. Özkul, «Takım Çeliği Malzemelerinin Geleneksel Ve Modern İşleme Yöntemleri İle İşlenebilirliklerinin Araştırılması.,» Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 2012.
9. V. C. Venkatesh ve W. Xue, «A Study Of The Built-Up Edge In Driling With Indexable Coated Carbide Inserts.,» *Journal of Materials Processing Technology*, cilt 1, no. 58, pp. 379-384, 1996.
10. P. Nieslony, P. Cichosz, G. M. Krolczyk, S. Legutko, D. Smyczek ve M. Kolodziej, «Experimental studies of the cutting force and surface morphology of explosively clad Ti–steel plates.,» *Measurement*, cilt 1, no. 78, p. 129–137, 2016.
11. M. Okada, N. Asakawa, E. Sentoku, R. M'Saoubi ve T. Ueda, «Cutting performance of an indexable insert drill for difficult-to-cut materials under supplied oil mist.,» *Int J Adv Manuf Technol*, cilt 1, no. 72, p. 475–485, 2014.
12. A. H. Kheireddine, A. H. Ammouri, T. Lu, I. S. Jawahir ve R. F. Hamade, «An FEM Analysis with experimental Validation to Study the Hardness of In-Process Cryogenically Cooled Drilled Holes in Mg AZ31b.,» *Procedia CIRP*, no. 8, p. 588 – 593., 2013.

13. A. Parsian, M. Magnevall, T. Beno ve M. Eynian, «Sound Analysis in Drilling, Frequency and Time Domains,» *Procedia CIRP*, no. 58, p. 411 – 415, 2017.
14. A. Parsian, M. Magnevall, M. Eynian ve T. Beno, «Time domain simulation of chatter vibrations in indexable drills,» *Int J Adv Manuf Technol*, no. 89, p. 1209–1221, 2017.
15. B. Tasdelen, T. Wikblom ve S. Ekered, «Studies on minimum quantity lubrication (MQL) and air cooling at drilling,» *Journal Of Materials Processing Technology*, no. 200, p. 339–346, 2008.
16. A. Parsian, M. Magnevall, T. Beno ve M. Eynian, «Time-Domain Modeling of Torsional-Axial Chatter Vibrations in Indexable Drills with Low Damping,» *The 4th International Conference on Virtual Machining Process Technology (VMPT 2015)*, pp. 1-8, 2015.
17. M. Kaymakci, Z. Kilic ve Y. Altintas, «Unified cutting force model fo rturning, boring, drilling and milling operations.,» *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, cilt 54, no. 55, pp. 34-45, 2012.
18. D. Biermann ve H. Hartmann, «Reduction of Burr Formation in Drilling Using Cryogenic Process Cooling,» *Procedia CIRP*, no. 3, p. 85 – 90, 2012.
19. K. Sönmez, *Arox 500 T Çeliğinin Delinmesinde Yüzey Kalitesi, Takım Aşınması ve Daireselliğinin İncelenmesi*, Karabük: Karabük Üniversitesi, İmalat Mühendisliği, 2019.
20. R. Griffin, Y. Cao, J. Y. Peng ve X. B. Chen, «Tool wear monitoring and replacement for tubesheet drilling,» *Int J Adv Manuf Technol*, no. 86, p. 2011–2020, 2016.
21. L. Liu, L. Zhou ve Z. Ying, «The FEM Dynamic Simulation in the Drilling process with Indexable Inserts,» *Advanced Materials Research*, no. 557-559, pp. 1292-1297, 2012.
22. P. Nieslony, G. M. Krolczyk, K. Zak, R. W. Maruda ve S. Legutko, «Comparative assessment of the mechanical and electromagnetic surfaces of explosively clad Ti–steel plates after drilling process,» *Precision Engineering*, no. 47, p. 104–110, 2017.
23. G. P. Sheth S., «Experimental investigation, prediction and optimization of cylindricity and perpendicularity during drilling of WCB material using grey relational analysis,» *Precision Engineering*, no. 45, p. 33–43, 2016.
24. Z. M. Kılıç ve Y. Altıntaş, «Generalized mechanics and dynamics of metal cutting operations,» *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, no. 104, pp. 1-13, 2016.
25. A. Parsian, *Regenerative Chatter Vibration in Indexable Drills: Modeling and Simulation*, West University Production Technology PhD Thesis, 2018.