

MÜHENDİSLİK ALANINDA AKADEMİKÇALIŞMALAR-1

EDİTÖRLER

Dr. Öğr. Üy. Hakan TERZİOĞLU

Öğr. Gör. Gökhan YALÇIN



İKSAD
Publishing House

MÜHENDİSLİK ALANINDA AKADEMİKÇALIŞMALAR-1

EDİTÖRLER

Dr. Öğr. Üy. Hakan TERZİOĞLU

Öğr. Gör. Gökhan YALÇIN

YAZARLAR

Prof. Dr. Süleyman NEŞELİ

Prof. Dr. Halil DEMİR

Dr. Öğr. Üyesi Hakan TERZİOĞLU

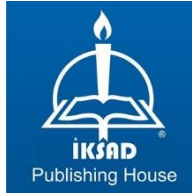
Öğr. Gör. Abdullah Cem AĞAÇAYAK

Öğr. Gör. Gökhan YALÇIN

Arş. Gör. Rüstem BİNALİ

Altuğ Emre ÇANKAYA

Seyidkhadija MİRJAFARLİ



Copyright © 2021 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or transmitted in any form or by any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TURKEY TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.
Iksad Publications – 2021©

ISBN: 978-625-8423-15-0

December / 2021

Cover Design: İbrahim KAYA

Ankara / Turkey

Size: 16x24 cm

İÇİNDEKİLER

EDİTÖRDEN

ÖNSÖZ

Dr. Öğr. Üy. Hakan TERZİOĞLU

Öğr. Gör. Gökhan YALÇIN.....1

BÖLÜM 1

MODERN İMALAT YÖNTEMLERİNE GENEL BAKIŞ

Arş. Gör. Rüstem BİNALİ

Öğretim Görevlisi Gökhan YALÇIN

Öğretim Görevlisi Abdullah Cem AĞAÇAYAK.....3

BÖLÜM 2

HUB MOTOR TASARIMINA GENEL BAKIŞ

Seyidkhadija MİRJAFARLİ

Dr. Öğr. Üyesi Hakan TERZİOĞLU

Öğretim Görevlisi Abdullah Cem AĞAÇAYAK.....35

BÖLÜM 3

TALAŞLI İMALAT VE İŞLENEBİLİRLİK

Arş. Gör. Rüstem BİNALİ

Prof. Dr. Halil DEMİR.....73

BÖLÜM 4

2kW 72V DIŞ ROTORLU HUB MOTOR TASARIMI

Seyidkhadija MİRJAFARLİ

Dr. Öğr. Üyesi Hakan TERZİOĞLU

Öğretim Görevlisi Gökhan YALÇIN.....93

BÖLÜM 5

FARKLI KESİCİ AĞIZ YERLEŞİMİ VE HELİS AÇILARINA SAHİP FREZE TAKIMLARININ PERFORMANS ANALİZİ

Altuğ Emre ÇANKAYA

Prof. Dr.Süleyman NEŞELİ.....115

ÖNSÖZ

İnsanlık, varoluşundan bu yana karşılaştığı tüm problem ve zorluklardan çıkarımlar yaparak yaşam kalitesini sürekli iyileştirmeyi amaçlamıştır. Aslında son 1-2 asır öncesine kadar, odaklanılan bu hedef doğrultusunda standartlaşmamış bir akademik hayat süregelmiştir. Günümüzde mühendislik bakış açısıyla izlenen dünyada konfor kaynağı sayılabilecek birçok teori, kaide, kural vs mevcuttur. Bu sayede gelecek ile ilgili tez, hipotez ve tahminler tutarlılığı yüksek oranlarda yapılabilmektedir. Geleceği şimdiden görebilenler bilgiyi akademik seviyede en iyi değerlendirenlerdir.

Güncel akademik gündemi yakalamak ve yapılagelen araştırmalara katkı sağlamak ilaveten geleceğe ışık tutabilmek maksadıyla oluşturulan ve iki kitaptan oluşan esere ait bölümler, çeşitli branşlarda akademik çalışmalarını ihtiva etmektedir. Teknolojik gelişimi ve bu teknolojilerin ülkemizde uygulanabilirliğine yönelik farkındalık oluşturmak için yol gösterici mahiyette olduğunu düşündüğüm her bir bölümün, özellikle akademik alanda ilgi uyandıracacağı ümidiyle ...

Dr. Öğr. Üyesi Hakan TERZİOĞLU

BÖLÜM 1

MODERN İMALAT YÖNTEMLERİNE GENEL BAKIŞ

Arş. Gör. Rüstem BİNALİ*, Öğr. Gör. Gökhan YALÇIN**,

Öğr. Gör. Abdullah Cem AĞAÇAYAK ***

*Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye. rustem.binali@selcuk.edu.tr. ORCID ID: 0000-0003-0775-3817

** Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, gyalcin@ktun.edu.tr, ORCID NO: 0000-0003-4491-0228

***Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler Myo, Elektrik ve Enerji Üretimi Bölümü, Mail: acagacayak@ktun.edu.tr, ORCID NO: 0000-0002-9285-5764

GİRİŞ

Bir ürünün ham maddeden istenilen son haline getirilmesi işlemi insanlık tarihi boyunca en eski yöntemlerdendir. Üretim yöntemleri ise her çağda farklı biçimlerde yapılmıştır. Teknolojinin her geçen yıla göre daha da gelişmesi istenilen ürünlerin daha kolay bir şekilde ve daha düzgün bir biçimde üretilmesine imkân sağlamıştır. Sanayi devrimi ile de üretime katkılar artmıştır. Başlıca katkı eden imalat yöntemleri ise şu şekildedir; döküm, dövme, şekil verme, kaynak ve talaşlı imalat gibi yöntemlerdir (Goetsch, 1991). Bu yöntemler günümüze kadar yaygın olarak kullanılmış olup hala kullanılmaktadır. Ancak artan rekabet ile beraber artan teknoloji ile de ürünlerin mükemmel yakın düzeyde oluşturulmasını zorunlu kılmaktadır. Hem pazar alanındaki tüketicilerin hem de üreticilerin yüksek kalite ve uygun maliyet istekleri gün geçtikçe artmaktadır. Bu nedenle son yıllarda geleneksel imalat yöntemlerinin yanı sıra geleneksel olmayan veya modern imalat yöntemleri olarak ifade edilen imalat yöntemlerinin gelişmesine katkı sağlanmıştır. Böylece müşterilerin ve üreticilerin istedikleri kriterler istenilen düzeyde sağlanabilmektedir. Çeşitli Modern İmalat yöntemleri bulunmaktadır. Bunların bazıları ise şunlardır;

- Aşındırıcı Akışkanla İşleme
- Su Jeti ile kesme
- 3 Boyutlu Üretim
- Plazma ile kesme
- Mikro İşleme

- Yüksek Hızda İşleme
- Ultrasonik İşleme
- Patlayıcılar ile Şekillendirme

1. AŞINDIRICI AKIŞKANLA İŞLEME

Yüzey temizleme işlemleri imalat işlemlerinde hem maliyetli hem de zaman alıcı bir işlemdir. Özellikle karmaşık geometriye ve hassas mekaniksel özelliklere sahip malzeme yüzeylerinin işlenmesi geleneksel yüzey işleme (honlama, lepleme vb.) yöntemleri toplam üretim maliyetinin %15'ine kadarını arttırmaktadır. Bu nedenle modern bir imalat yöntemi geliştirilmiştir. Aşındırıcı akışkanla işleme yönteminde akışkanlığı düşük ve içerisinde aşındırıcı parçacıkları ihtiva eden yarı akışkan macun kullanılır. Macun işlem yapılacak malzemelerin içerisinden basınç vasıtasıyla geçirilerek malzemelerin yüzeylerinden talaş kaldırır. Kaldırılan talaş macunun akış yönüne doğrudur. Böylece aşındırılacak parçanın şeklini alarak bütün yüzeylerde eşit düzeyde aşınma uygulanır. İleri düzeyde bir yüzey işleme yöntemi olan Aşındırıcı akışkanlarla işleme karmaşık geometriye sahip parçaların içindeki dip kenarlarda ve köşelerde yuvarlatma, çapak alma, parlatma ve ulaşılması zor yüzeylerde kalıcı basma gerilmeleri meydana getirmek için kullanılmaktadır. Bu işlemde aşındırıcı parçacıklar özel bir şekilde hazırlanmış hamurumsu malzeme ile karıştırılır ve malzeme üzerinde ekstrüzyon ile temizleme işlemi gerçekleştirir. Karışımın ekstrüzyon ile kalıp yüzeyinin şeklinin aldırılması istenilen her yüzeye eşit düzeyde basıncın uygulanabilir

olmasıdır. Bu işlemdeki basınç 7 ile 200 bar arasında işlemi yapılacak olan malzemeye göre değişkenlik göstermektedir.

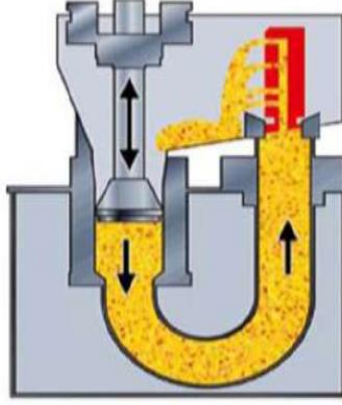
Aşındırıcı akışkanla işlemenin uygulama alanları;

- Otomotiv araçları,
- Uzay ve Havacılık endüstrisi,
- Medikal endüstrisi,
- Hidrolik ve pnömatik parçalarda,
- Akışkan teknolojilerinin kullanıldığı alanlarda,
- Dizel enjektörlerinde,
- Mekatronik ve optiktir.

Aşındırıcı akışkanla işlemenin belirtildiği üzere birçok kullanım alanı vardır. Ancak kalıp endüstrisinde kullanılmamaktadır. Bu işlemin kullanım alanlarına göre tek yönlü, iki yönlü ve orbital olarak uygulama yöntemleri bulunmaktadır.

1.1. Tek Yönlü Aşındırıcı Akışkanla İşleme

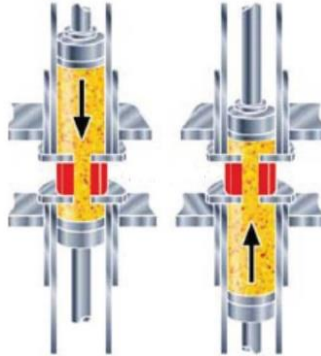
Bu uygulama yönteminde tek bir hidrolik silindirle yalnızca tek bir yönde malzeme üzerinden aşındırıcı macun akışı gerçekleştirilir. Bu sistem daha hızlı işlem gerçekleştirir, kolay temizlik ve takımın yerinden serbestçe çıkması için kolaylık sağlar. Tek yönlü işlemde macunun sıcaklık kontrolünün yapılması genellikle gerekli değildir. Macunun 7 ile 200 bar basınç aralığında macun haznesinden hidrolik piston vasıtasıyla işlenecek malzemeden geçmesi ile işlem tamamlanır. Tek yönlü aşındırıcı akışkanla işlemenin şematik olarak görünümü Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 1. Tek yönlü aşındırıcı akışkanla işleme (Şahin, 2012).

1.2. İki Yönlü Aşındırıcı Akışkanla İşleme

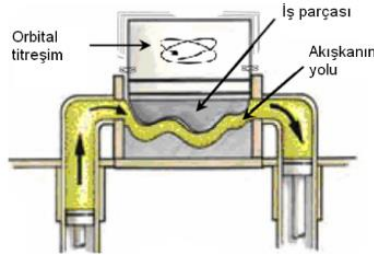
Bu işleme yönteminde karşılıklı olarak iki hidrolik silindir arasında macunun malzeme içerisinden geçişi sağlanır. Aşındırıcı macunun ulaştığı bütün yüzeylerde yüzey işlemleri gerçekleşir. Bu sistemde proses kontrolü mükemmel yakın düzeyde olup istenilen köşe radius kalitesinin kontrolü sağlanır. İki yönlü aşındırıcı akışkanla işleminin şematik olarak görünümü Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2. İki yönlü aşındırıcı akışkanla işleme (Şahin, 2012).

2.3. Orbital Aşındırıcı Akışkanla İşleme

Orbital işleminde malzeme iki ve üç boyutlu olarak titreştirilirken aşındırıcı macun belirlenen yola yavaş bir şekilde gönderilir. Bu işlem iki yönlü aşındırıcı akışkanla işlemine benzemekle birlikte macun daha fazla elastik ve daha yüksek viskoziteye sahiptir. Orbital aşındırıcı akışkanla işlemenin şematik olarak görünümü Şekil 2.3'te verilmiştir.

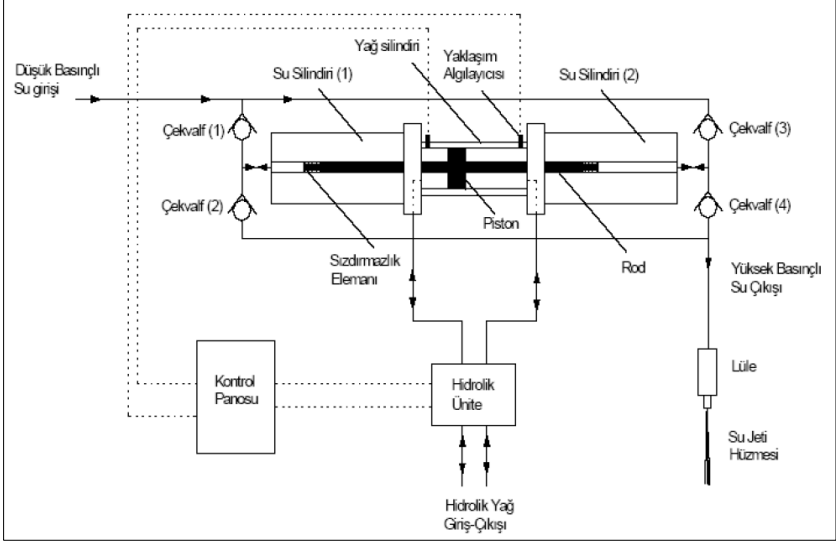


Şekil 3. Orbital aşındırıcı akışkanla işleme (Şahin, 2012).

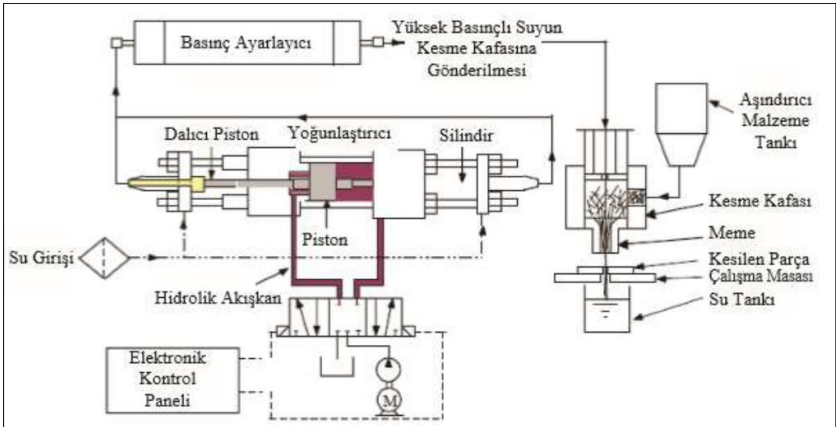
2. SU JETİ İLE KESME

Su jeti ile kesme işleminin gelişimi 1960'lı yıllara dayanmaktadır. Su jeti yaklaşık olarak 4000-7000 Bar basınca ulaştırılmış suyun, aşındırıcılar vasıtasıyla kesme teknolojisidir. Basınçlı su, kesme başlığına iletilir ve bir kesme nozulu üzerinden kesilecek malzemeye doğru yönlendirilir. Su jeti çıkış hızı yaklaşık 900 m/sn civarındadır ve yüksek kinetik enerjisi sayesinde kesme işlemi gerçekleşir. Bu yöntem granit dahil birçok malzemenin kesilmesinde kullanılan sistemdir. Su jeti nozulunun daha iyi bir şekilde kontrol edilebilmesi için endüstriyel robotların sisteme adapte edilmesi ve basınçlı suya aşındırıcıların eklenmesi ile uygulama alanlarının artmasını

sağlamıştır. Bu işlem saf su ile kesme ve aşındırıcı ilaveli kesme olarak ikiye ayrılmaktadır. Şekil 3.1’de Su jeti işlemi Şekil 3.2’de ise Aşındırıcılı su jeti kesme işleminin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 4. Su jeti işleminin şematik görünümü (metaluzmani.com).



Şekil 5. Aşındırıcılı işlemin şematik görünümü (Akkurt vd., 2004).

Su jeti ile kesme işlemini yapan sistemlerden beklenen özellikler;

- Sistemden imalat işlemlerinde kullanılan her türlü malzemenin kesilmesi istenmektedir.
- Kesilen yüzeyin kalitesinin son derece yüksek hassasiyette olması ve kesme sonrası ürün geometrisinin istenilen biçimde olması beklenmektedir.
- Karmaşık geometriye sahip kesme yüzeylerinde kullanılabilir olmalıdır.
- Üretkenliği arttırmalıdır.
- Kesme sırasında atık malzemenin minimum düzeyde olması beklenmektedir.
- Kesme sırasında çevreye zararlı bir etkinin bırakmaması beklenmektedir.

Su jeti ve aşındırıcılı su jeti işlemlerinde kesilebilecek malzemeler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Tablo1. Su jeti ve aşındırıcılı su jetiyle kesilebilen malzemeler (Akkurt, 2004).

Su Jeti ile kesilebilecek malzemeler	Aşındırıcı takviyeli su jeti ile kesilebilecek malzemeler	
Yumuşak	Takım çelikleri	Bakır
Sünger	Titanyum	Mermer
Folyo ve benzeri malzemeler	Pirinç	Kompozitler
Mum	Grafit	Cam
Yumuşak malzemeler	Çelik malzemeler	Sert malzemeler

Su Jeti ile kesme işleminin avantajları

- Üretim işlemi için farklı bantlara entegre edilebilir.
- İşlem sırasında yanma plastik deformasyon gibi termik sebeplerden oluşan hasarlar meydana gelmez.
- Farklı erime sıcaklıklarına sahip malzemeler diğer yöntemlere göre daha kolay bir şekilde kesilebilir.
- İşlem sırasında yanma oluşmadığından dolayı kimyasal kirlilik gibi durumlar meydana gelmez.
- Kesim aralığı 1 mm civarında olması nedeniyle işlem sırasındaki malzeme kaybı minimum düzeydedir.
- Keskin ve çok dar yüzeylerin işlenmesi mümkündür.
- Petek dokuya sahip malzemelerin kesme işlemi yapılabilir.
- Geleneksel yöntemlerdeki gibi işlem sonrasında kesici takımların işlem görmesine gerek yoktur.
- Hijyenik kesim işlemi sayesinde gıda endüstrisinde kullanılabilir.
- Kesim yüzeyi yüksek kalitede elde edilir.
- Yangın tehlikesi olmaması nedeniyle iş güvenliği sağlanmaktadır.

Su Jeti ile kesme işleminin dezavantajları

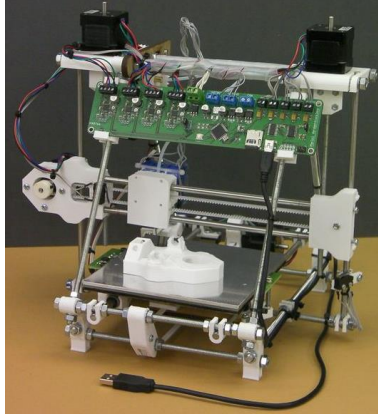
- İlk yatırım maliyetinin yüksek olması,
- Sert malzemelerde saf su jeti ile kesim gerçekleştirilemediğinden dolayı aşındırıcı malzemelerin eklenmesi gerekebilir,
- İşlem süresi geleneksel işlemlere göre daha uzundur,

- Kalın malzemelerin kesilmesi sırasında su basıncının yeterli olmadığı durumlarda parça geometrilerinde sapmalar oluşabilir.

3. ÜÇ BOYUTLU ÜRETİM

Üç boyutlu üretim, bilgisayar destekli tasarım programları (CAD) ile hazırlanan üç boyutlu tasarımların katı nesnelere dönüştürülmesi işlemidir. Bu üretimi gerçekleştiren makineler ise üç boyutlu yazıcı olarak ifade edilmektedir. Bu tip yazıcılar geleneksel imalat yöntemleri ile üretilemeyen karmaşık geometrilere sahip CAD datasını (verisini) elle tutulabilir katı nesnelere dönüştürmektedir. Endüstride yaygın olarak kullanılan üç farklı yazıcı çeşidi bulunmaktadır. Bunlar; Kartezyen, Delta ve Core XY mantığı ile çalışan yazıcılardır.

Kartezyen tipi üç boyutlu yazıcılar çelik ve türevi çubuk ya da profillerden meydana gelmektedir. Bağlantı parçaları ise geleneksel yöntemlerle veya üç boyutlu yazıcıdan üretilen parçalardır. X, Y ve Z eksenlerindeki hareket işlemleri eksantrik triger kayış ve hareketli vidalar ile gerçekleşmektedir. Kartezyen tipi üç boyutlu yazıcı Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 6. Kartezyen tipi yazıcı (fibilo.com).

Delta tipi yazıcılar üçgen şeklinde olması nedeniyle Z eksenindeki hareketin sağlanması için üç farklı yerden step motor vasıtasıyla tahrik edilmektedir. Delta tipi yazıcı Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 7. Delta tipi yazıcı (robocombo.com).

Core XY mantığı ile çalışan yazıcılarda X ve Y eksen hareketi kayış kasknaklar vasıtasıyla yapılmaktadır. Bu tip yazıcılarda Z eksen hareketini iş parçası tablası, X ve Y eksen hareketlerini ise ergitme işleminin yapıldığı kafa gerçekleştirmektedir. Core XY mantığı ile çalışan yazıcı Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 8. Core XY tipi yazıcı.

Üç boyutlu üretimin avantajları

- CAD verisi olan her ürü katı nesnelere üretilebilir.
- Geleneksel imalat yöntemlerindeki emeği ortadan kaldırır.
- Karmaşık geometriye sahip ürünler kolayca üretilir.
- Kullanılan malzeme biyo malzeme olduğundan dolayı çevreye zararı yoktur.
- Hızlı protipleme yapmasıyla ürünler kolay ve hızlı biçimde incelenebilir.

4. PLAZMA İLE KESME

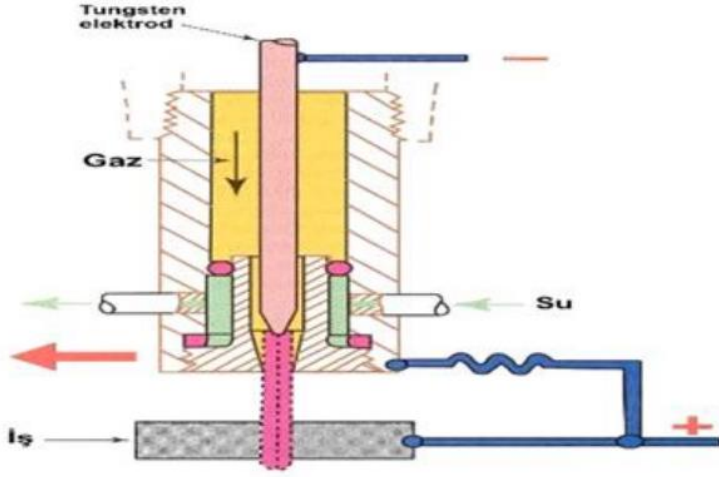
Plazma gazı maddenin dördüncü halidir. Bu durum gaz halinde olan maddeye verilen enerjinin doğru koşullar altında olması durumunda gerçekleşmektedir. Enerji kaynağı ısı, ışık ve elektriksel olabilir. Plazma günümüzde televizyonda, ışıklandırmada, imalat endüstrisinde, tıpta ve pek çok alanda kullanılmaktadır.

4.1. Plazma ile Kesme Yöntemleri

Plazma arkıyla kesme işlemi malzemelerin iletkenlik durumlarına ikiye ayrılmaktadır. Bunlar; Transfer edilen ark yöntemi ve Transfer edilemeyen ark yöntemidir.

4.1.1. Transfer Edilen Ark Yöntemi ile Plazma Kesme

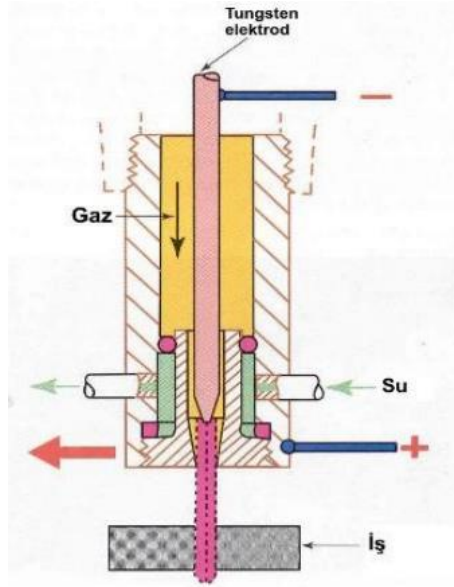
Bu işlemde doğru akım kullanılarak elektriksel iletkenliği bulunan malzemelerin kesilmesi yapılmaktadır. Elektriksel iletkenliğe sahip malzeme plazma gazının çıktığı torcun devreyi tamamlamasını sağlamaktadır. Kullanılan elektrot negatif (-), plazmanın torcu ve malzeme ise pozitif (+) kutuptur. Elektrik arkı Elektrot ile plazma torcu ve malzeme arasında meydana gelmektedir. Şematik olarak görünümü Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 9. Transfer edilen ark yöntemi ile plazma kesme (MEB, 2011).

4.1.2. Transfer Edilmeyen Ark Yöntemi ile Plazma Kesme

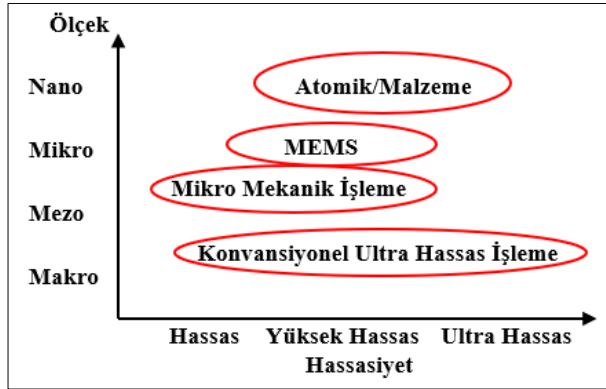
Bu işlemden de transfer edilen ark yöntemindeki gibi doğru akım kullanılmaktadır. Elektrot negatif (-) kutuplama yaparak kesme işlemi gerçekleştirmektedir. Doğru akım ve negatif kutuplama ile ısının malzemenin üzerinde yoğunlaşması sağlanır. Bu yöntem elektriksel iletkenlik özelliği bulunmayan malzemelerin kesilebilmesi için kullanılıyor olsa da iletkenliği olan malzemelerde de kullanılmaktadır. Plazma arkının yoğunluğu tam anlamıyla kontrol edilemediğinden fazla tercih edilen bir sistem değildir. Şematik olarak görünümü Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 10. Transfer edilemeyen ark yöntemiyle plazma kesim (MEB, 2011).

5. MİKRO İŞLEME

İmalat işlemlerinde çok küçük yani minyatür parçaların yüksek hassasiyet ve ölçüsel toleranslar dahilinde üretilmesi önem arz etmektedir. Geleneksel işleme yöntemlerine benzemesine rağmen bu işlemden kullanılan kesici takımlar minyatürleştirilmiştir. Genel anlamda dünya genelinde yaygın olarak kullanılmasına başlanmış olup ülkemizde bu işlem ile ilgili çalışma henüz yaygınlaşmamıştır. Mikro işlemeyi Şekil 6.1'deki gibi özetleyebiliriz.



Şekil 11. Mikro işleme işlemleri (Yücel ve Çiçek, 2011).

5.1. Mikro Mekanik İşleme

Bu işlemden üretilen parçaların boyutları 10 μm boyutlarına kadar inebilmektedir. Mikro mekanik işlemin içerisinde, Mikro Frezeleme, Tornalama ve Delme işlemleri bulunmaktadır.

Mikro Frezeleme İşlemi: Mikro mekanik işleme süreçlerinin arasında büyüyen öneme sahip olan mikro üretim aşamalarından birisi mikro frezeleme işlemidir. Mikro frezeleme işleminde kullanılan 1 mm ya da daha küçük çapa sahip kesici takımlar, mikro kesici takımlar olarak ifade edilmektedir.

Mikro Tornalama İşlemi: Bu işlemden, mikro ölçekteki ürünleri üretmek için çapı 10 μm civarında olan minyatür torna kesici takımları kullanılmaktadır. Universal ve mikro işleme kinematik anlamda birbirlerine benzer olmasına rağmen, kesme mekaniğinde farklar bulunmaktadır. Bulunan farklar kesici takım geometrisi, malzemesi ve iş parçası malzemesinin karakteristikleriyle ilişkilendirilen ölçekleme

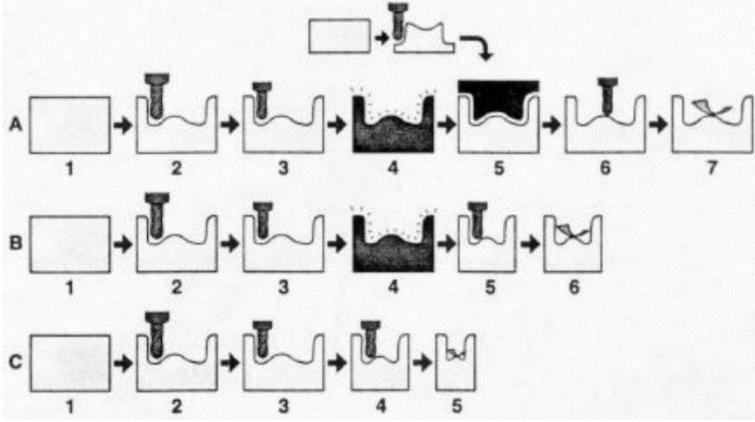
etkileri nedeniyle fiziksel değişikliklerden oluşmaktadır. Mikro tornalama işleminde 0,3 mm çapına sahip malzemeleri, 15000 dev/dak ve 10 µm talaş derinliğinde işlenebilmektedir.

Mikro Delme İşlemi: Bu işlemde kullanılan mikro matkaplar genelde cihazların minyatürleştirilmesi için baskı devre kartlarının üretiminde daha küçük çapa sahip boyuna deliklerin delinmesi işleminde kullanılmaktadır.

Mikro Electrical Discharge Machining (Elektroerozyon) (EDM): Bu işlem, minyatür parçaların ve bileşenlerinin üretimi için geliştirilen bir işleme yöntemidir. Mikro EDM ve geleneksel EDM işlem tezgâhları, kullandıkları darbe jeneratörü, X, Y ve Z eksen hareketlerinin kararlılığı ve kullanılan takımın boyutları yönünden farklılaşırlar. Mikro EDM de darbe jeneratörü mikro ve nano saniyeler seviyesinde elektriksel darbeler gerçekleşmektedir. Takımın hareket kararlılığıysa 1 µm düzeylerindedir. Bu işlem ile mikro delikler, donanımlar ve dişliler işlenebilir.

6. YÜKSEK HIZDA İŞLEME

Yüksek hızda işleme devir sayısı 10000 dev/dak, ilerleme miktarı değeri 5000 /dak ve düşük kesme derinliğinde, ilerleme miktarı yüksek ve küçük çapa sahip kesici takımlarla yapılan talaş kaldırma işlemidir. Yüksek hızda işlemenin kullanımı, imalat süresinin kısalmasına ve üretilen parçaların ölçüsel doğruluğunu arttırmaktadır. Yüksek hızda işlemenin üretim sürecinin iyileştirildiği aşamaları Şekil 7.1'de verilmiştir.



Şekil 12. Diğ er imalat işlemleri ile yüksek hızda işlemin karşılaştırılması (Sandvik, 1999).

Şekil 7.1’de bulunan işlemlerin açıklamaları şu şekildedir;

A. Geleneksel işlem, 1- Ham malzeme, 2- Kaba işleme, 3- Yarı ince işleme, 4- Sertleştirme işlemi, 5-EDM işlemi, 6- Bitirme işlemi, 7-Manuel son işlem.

B. EDM işlem adımının azaltılarak işlenmesi.

C. Sertleştirme ve EDM işlemlerinin kaldırılmasıyla aynı parçanın üretilmesi yer almaktadır. A şeklindeki işlemlerle kıyaslandığında normal sürede yaklaşık %30-50 azalma oluşmaktadır.

Çeşitli malzemeler için geleneksel ve yüksek hız işlemlerde kesme hızlarının karşılaştırılması Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Tablo 2. Geleneksel ve yüksek hızda işlemenin malzemele üzerinde karşılaştırılması.

		Tek parça parmak freze, Matkap, WC, Kaplamalı WC, PCD, Seramik		İndekslenbilir uçların alın freze çakısı, WC, Seramik, CBN	
İş parçası malzemesi		Konvensiyonel kesme hızı (m/dk)	Yüksek kesme hızı (m/dk)	Konvensiyonel kesme hızı (m/dk)	Yüksek kesme hızı (m/dk)
Alüminyum		>305 (WC, PCD)	>3050 (WC, PCD)	>610	>3658 (WC, PCD)
Dökme Demir	Yumuşak	152	366	366	1219 (Seramik)
	Sünek	107	244	244	914 (Seramik)
Çelik	Kolay işlenebilir	107	366	366	610
	Alaşımlı	76	244	213	366
	Paslanmaz	107	152	152	274
	Sertliği 65 HRC	24	122	30 (WC), 91 (Seramik, CBN)	46 (WC), 183 (Seramik, CBN)
Titanyum		38	61	46	91

Yüksek hızda işlemenin uygulama alanları

- Otomotiv parçaları,
- Küçük bilgisayar parçaları veya tıbbi cihazlar üretmek,

- Uçak endüstrisi,
- Kalıpçılık endüstrisinde,
- Basınçlı döküm kalıpları, dövme kalıpları, enjeksiyon kalıpları ve üfleme kalıpları gibi parçaların işlenmesinde,
- Grafit ve bakır elektrotların işlenmesinde kullanılır.

Yüksek hızda işlemenin avantajları

- Talaş kaldırma oranı yüksektir
- İşlem sonrası yüzeyin kalitesi,
- Üretkenlik artmaktadır,
- İnce kalınlığa sahip malzemelerin işlenebilmesi,
- Oluşan kesme kuvveti düşüktür,
- Soğutma sıvısı ihtiyacı olmaz,
- Üretim süresi azalmaktadır.

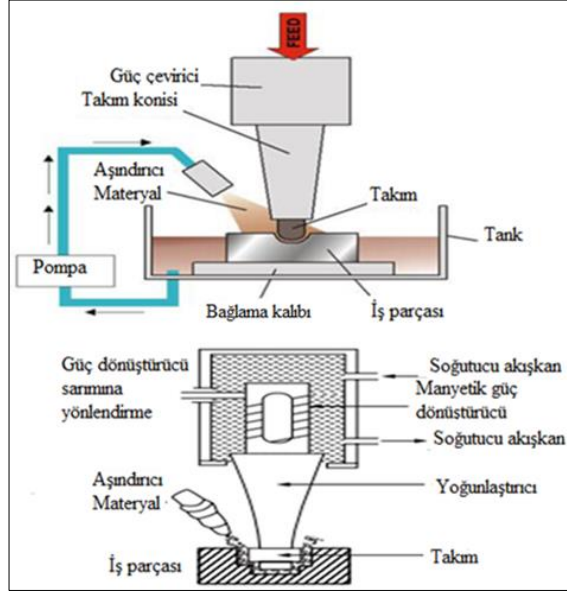
Yüksek hızda işlemenin dezavantajları

- Takım aşınması fazladır,
- Süreç planlamasının gerekli olması,
- Özel takımlara ihtiyacın olması,
- Gelişmiş personel ihtiyacıdır.

7. ULTRASONİK İŞLEME

Bu işlem kesici takıma ya da malzemeye uygulanan ultrasonik titreşim vasıtasıyla malzemenin işlenmesidir. Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinin yapıldığı tezgahlar ile kesici takımların adapte edilerek

entegre sistemler vasıtasıyla tümleşik bir takım tezgâhı olarak da üretilebilir.



Şekil 13. Ultrasonik işlemenin şematik görünümü (roboturka.com).

Ultrasonik Tornalama İşlemi: Ultrasonik tornalama işlemi genellikle nikel ve titanyum alaşımlarının işlenmesinde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra işlenebilirliği zor olan kırılğan malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadır. İşlemden oluşan titreşim, işleme esnasında oluşan sıcaklığın yükselmesini engelleyerek kesici takımın aşınmasını düşürür ve takım ömrünü artırır. Ayrıca efektif gerilme ve işlem sırasında oluşan kesme kuvvetlerini düşürerek artık gerilme oluşumunu minimum düzeye düşürerek yüzey kalitesini arttırmaktadır.

Ultrasonik Frezeleme İşlemi: Yüksek dayanıma sahip düşük termal iletkenliği bulunan ve yüksek iş sertleşmesine eğilimli malzemelerin işlenmesinde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bu işlemde oluşan talaş incelik, oluşan kesme kuvvetleri ve sıcaklık düşmektedir. Bunun yanı sıra kesici takım ömrü, talaş kaldırma hızı ve işlemenin verimi artmaktadır.

Ultrasonik Delme İşlemi: Sert alaşımların, kompozitlerin ve kırılğan malzemelerin üzerinde derin delikler açmak için kullanılmaktadır.

Ultrasonik Taşlama İşlemi: Yüksek taşlama sıcaklıkları ve kesme kuvvetleri sebebiyle sert ve kırılğan malzemelerin taşlanmasında çatlaklar ve hasar mekanizmaları hızlı bir şekilde taşlama taşında bulunan aşındırıcıların aşınmasına neden olur. Ultrasonik taşlama işleminde titreşim aşındırıcıların malzemeyi birden fazla kesme kenarından kesmesini sağlayarak tanecik başına düşen kuvveti azaltır ve aşınma miktarı azalır.

Ultrasonik işleme ile sünek, kırılğan ve kompozit malzemelerin işlenmesi diğer işlemlere göre daha kolay ve verimli bir biçimde yapılmaktadır.

Ultrasonik işlemenin avantajları

- Sert, gevrek, kırılğan ve iletken olmayan malzemelerin işlenmesi kolayca yapılabilir.
- İşleme sırasında ısı oluşmaz.

- Metal olmayan malzemelerin işlenmesi çok iyi derecede gerçekleşir.
- Çapak oluşumu ve distorsiyonlar ihmal edilebilecek düzeyde azdır.
- Plastik malzemeler kaynatılabilir.
- İşlenen malzemeler 0,025-0,001mm arasında hassasiyetinde elde edilebilir.
- Geleneksel talaş kaldırma işlemlerine göre yüzey kalitesi ve yüksek yapısal bütünlük daha iyi elde edilir.
- Isıl işlem sonrasında da yüzeyden talaş kaldırabilir.
- Seri imalat işlemlerinde ekonomiktir.

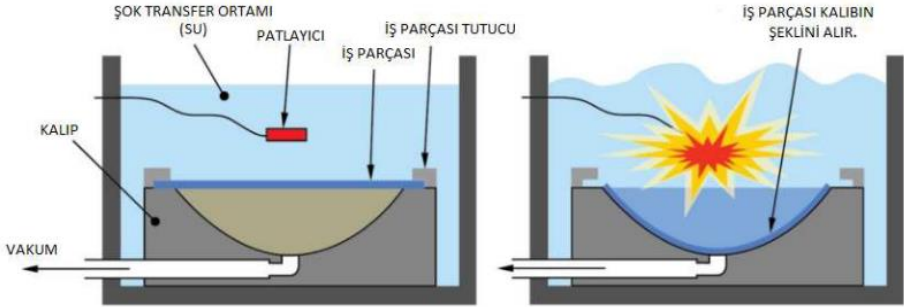
Ultrasonik işlemin dezavantajları

- Talaş kaldırma oranının düşük olması,
- Hareketin kısıtlandığı yerlerde derin delik işlemlerinin zor olması,
- Takım aşınma oranının yüksek olması,
- Takım aşınması hızlıdır.
- Ultrasonik işlemin maliyeti yüksektir.

8. PATLAYICILAR İLE ŞEKİLLENDİRME

Havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılan büyük geometriye sahip parçaların imalatı için farklı imalat metotları geliştirilmektedir. Bunun nedeni geleneksel yöntemler ile imalat için erkek ve dişi kalıp olmak üzere iki kalıplı sistemin tasarımı, imalatı ve metal plakanın kalıpların arasına sıkıştırılarak şekil verilmelidir. Bu işlemler hem maliyeti hem

de imalat süresini arttıracığından dolayı dezavantajlı olmaktadır. Patlayıcıların kullanılarak yapılan şekillendirme işleminde büyük parçaların imalatında ve sınırlı sayıdaki parçaların imalatında yaygın olarak kullanılan bir işlemdir. Bu işlemde yalnızca dışı kalıp üretilerek açılan bir çukurun içerisine yerleştirilir. Çukurun içerisi su, yağ ve kum gibi malzemeler ile doldurularak ara bir ortam hazırlanır. Ara ortam içerisine patlayıcı yerleştirilir ve patlaması sağlanır, patlayan patlayıcı yüksek bir basınç oluşturarak ara ortam vasıtasıyla dışı kalıbın üzerine yerleştirilen sac metal parçasına iletilmesi sağlanır. Böylece sac metal plakası dışı kalıbın şeklini alarak imalat işlemi tamamlanmış olur. Patlayıcı ve ara ortam şekillendirme işleminde erkek kalıbın yerini almaktadır. Patlayıcılar ile şekillendirme işlemi Şekil 9.1’de verilmiştir.



Şekil 14. Patlayıcılar ile şekillendirme işlemi (matmatch.com).

Şekil 9.1’de olduğu gibi sac metal plakalarına patlayıcılar ile şekil verme işleminde sac metal plakası dışı kalıp üzerine sabitlenir. Sac Metal plakasının altında kalan hava yaklaşık olarak 3 mmHg seviyesinde olup kalıp altı kısmında bir delik açılarak havanın bu delik

vasıtasıyla boşaltılması sağlanır. Genellikle ara ortam olarak kullanılan su içerisine kalıp ve plaka malzemesi yerleştirilir. Patlayıcı malzeme ise kalıp ile belirli bir mesafe uzaklığa yerleştirilir. Bu mesafe metalik malzemenin şekillendirilmesi için önem arz eden bir mesafedir. Patlatılan patlayıcı vasıtasıyla ortaya çıkan enerjinin bir kısmı sac metal plakanın üzerinde giderek şekillendirme işlemi gerçekleştirilir.

REFERANSLAR

- Adams, D.P., Vasile, M.J., Benavides, G., Campbell, A.N. (2001). Micromilling of metal alloys with focused ion beam–fabricated tools, *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, Vol.25, 107–113.
- Akkurt, A. (2004). Su jeti ile kesme sistemleri ve uygulama alanlarının Değerlendirilmesi, *Politeknik Dergisi*, 7(2): 129-139.
- Akkurt, A., Külekçi, K. M., Seker, U. ve Ercan F. (2004). Effect of Feed Rate on Surface Roughness in Abrasive Waterjet Cutting Applications, *Journal of Materials Processing Technology*, 147, 389 -396.
- Binalı Rüstem,Ulaş Hasan Basrı,Demir Halil (2018). Toolox 44 Malzemesinde Talaş Kaldırma Miktarının Yüzey Pürüzlülüğü ve Takım Aşınması Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Technological Applied Sciences*, 13(1), 19-28. (Yayın No: 4418698)
- Binalı Rüstem, Demir Halil, Neşeli Süleyman, Yıldız Süleyman (2020). An Investigation of Factors Affecting Machinability of Milling Toolox 44 Hot Work Tool Steel by Taguchi Method . *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'20)*, 317- 321. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:6864833)
- Binalı Rüstem, Yıldız Süleyman, Neşeli Süleyman (2021). Optimization of Machinability Parameters of S960QL Structural Steel by Finite Elements and Taguchi Method. *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'21)* (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:7301857)
- Binalı, R., Yıldız, S. & Neşeli, S. (2021). S960QL Yapı Çeliğinin İşlenebilirliğinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (31)
- Boy, M., Çiftçi, İ., Demir, H., Günay, M. ve Özhan, F. (2012). Sertleştirilmiş çeliklerin sert tornalama yöntemi ile işlenmesi, *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, 362-371.

- Cerniway, MA, (2001). Elliptical diamond milling: kinematics, force, and tool wear, MS Thesis. North Carolina State University.
- Chae, J., Park, S.S., Freiheit, T. (2006). Investigation of micro-cutting operations, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, 313–332.
- Cole, R. H. (1948). Underwater explosions, Princeton University Press, Oxford, 3-147 (1948).
- Çakır, M. C. (1999). Modern Talaşlı İmalatın Esasları, Ceylan Matbaacılık.
- Dirbaş, Y. K. ve Arlı, B. (2003). Uygulamalarla 3 Boyutlu Yazıcı Yapımı ve Kullanımı, Abaküs Yayınevi, İstanbul.
- Erden, A. (2002), Alışılmamış (Geleneksel Olmayan) İmalat Yöntemleri, Makine Mühendisliği El Kitabı, 2:2-3.
- Ergür, H. S. (2007). Aşındırıcı Su Jetinin Teorik Analizi ve Yapay Sinir Ağı, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Eyercioğlu, Ö., Yılmaz, N. F. ve Dereli, T. (2006). Aşındırıcı akışkanla yüzey işleme”, TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi.
- Gavas, M., Yaşar, M. Aydın, M. ve Altunpak, Y. (2013). Üretim Yöntemleri ve imalat teknolojileri Talaşsız-talaşlı imalat, 4. Baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Gibson, İ. ve Rosen, D. ve Stucker B. (2010). Additive Manufacturing Technologies; Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Amerika: Springer.
- Hamamcı E., Hamamcı B. ve Kayacan M. C. (2012). Zor İşlenen Parçaların Ön Isıtmalı İşlenmesi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 9(3): 1304-4141.
<http://pompa-vana.com/asindirici-akiskanla-yuzey-isleme-afm-metoduyla-mukemmel-yuzey-sonuclari/>
<http://www.turkcadcam.net/rapor/hsm-sk/index.html>
<https://extrudehone.com/products/abrasive-flow-machining-afm/>
<https://fibilo.com/uc-boyutlu-yazici-nedir/kartezyen-3d-yazici/>
<https://matmatch.com/learn/process/explosive-forming>
<https://prezi.com/b0pbqfdbt93i/yuksek-hzda-isleme/>

<https://roboturka.com/bitirme-projeleri/ultrasonik-talas-kaldirma-yontemlerinin-faydalari/>

<https://www.metaluzmani.com/asindiricili-su-jeti-ile-kesme-abrasive-waterjet/>

<https://www.robocombo.com/delta-i3-3d-printer-kiti-diy-demonte>

Kaplan H., Dölen, M. (2003). MikroElektromekanik sistemler (MEMS): Üretim Teknikleri, 11. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi.

Kumar, J., Khamba, J. S. (2008). An experimental study on ultrasonic machining of pure titanium using designed experiments, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 1678.

Kumar, M.N., Subbu, K., Krishna, V., Venugopal, A. (2014). Vibration Assisted Conventional and Advanced Machining: A Review, Procedia Engineering, 97, 1577-1586.

Liang, Z. Wub, Y. Wanga, X., (2010). A new two-dimensional ultrasonic assisted grinding (2D-UAG) method and its fundamental performance in mono crystal silicon machining, Int. J. Mach. Tools Manuf. 50,728-736.

Liu, J. Zhang, D. Qin, L. Yan, L. (2012). Feasibility study of the rotary ultrasonic elliptical machining of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), Int. J. Mach. Tools Manuf. 53, 141–150.

Malekian, M., Park, S.S., Jun, M.B.G., Tool wear monitoring of micro-milling operations, Journal of Materials Processing Technology, In Press.

MEB. (2011). Metal Teknolojisi, Elektrik Arki ile Kesme, Millî Eğitim Bakanlığı, Ankara.

Mynors, D.J., Zhang, B. (2002). Application and capabilities of explosive forming, Journal of Materials Processing Technology, 125-126, 1-25.

Neşeli S.,Yalçın G.,Terzioğlu H.,Ağaçayak A.C. (2019). Nano Yüzey Kalitesi Oluşturmak İçin Lepleme Makinesi Tasarımı. V Science Technology and Innovation Congress, 374-380. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5601104)

Prince, D. (2014). 3D printing: an industrial revolution”, Journal of Electronic Resources in Medical Libraries, 11 (1): 39-45.

- Rhoades, L.J. (1988). Abrasive Flow Machining, A Case Study, Manufacturing Engineering, November 75-78.
- Rinehart, J. S., Pearson, J. (1963). Explosive working of metals”, Pergamon Press, Oxford, 3-341.
- Roberson, D. A., Espalin, D. and Wicker, R. B. (2013). 3D printer selection: A decisionmaking evaluation and ranking model”, Virtual and Physical Prototyping, (3): 201-212.
- Robinson, G.M., Jackson, M.J. (2005). A review of micro and nanomachining from a materials perspective, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 167, 316–337.
- Sandvik Coromant (1999). Die & Mould Making Application Guide. Sandvik.
- Shen, X.-H. Zhang, J.-H. Li, H. Wang, J.-J. Wang, X.-C. (2012). Ultrasonic vibration-assisted milling of aluminum alloy”, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 63, 41–49.
- Šunjić D., Buljan S. (2019). Application of Explosives in Metal Forming. In: Karabegović I. (eds) New Technologies, Development and Application. NT 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 42. Springer, Cham.
- Şahin, M. S. (2012). Aşındırıcı parçacık akış metodu ile işlem parametrelerinin hidrolik valflerin yağ kanallarının yüzey kalitesine etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Şahin, Y. (2000). Talaş Kaldırma Prensipleri, Cilt 1, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- TMMOB. (1990). Plazma Tekniği, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Ankara.
- White, T. (2003). Materials and manufacturing for tomorrow’s engineer”, 3rd Annual KU Aerospace Materials and Processes “Virtual” Conference, The University of Kansas, 7-31.
- Xu W, Zhang L. (2015). Ultrasonic vibration-assisted machining: principle, design and application, Adv. Manufacturing, 3(3), 173-192.
- Yalçın G.,Sağlam H.,Terzioğlu H. (2016). Designing of Hydraulic Actuated and PLC Controlled Thread Fatigue and Tensile Testing Machine. 2nd International Conference On Science, Ecology and Technology (ICONSETE’xx2016) (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3147353)

- Yalçın G.,Neşeli S.,Terzioğlu H.,Ağaçayak A.C. (2019). Design and Construction of Compact CNC Router. International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'19), 1(3), 474-478. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5642081)
- Yalçın G.,Neşeli S.,Terzioğlu H.,Ağaçayak A.C. (2018). Fatigue Tester Design and Frame Analysis for Estimation of Fatigue Life of Helical Compression Springs. International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'18), 563-566. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4509752)
- Yücel, E. ve Çiçek, A. (2011). İmalat alanında yaygın olarak kullanılan mikro işleme teknikleri, SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi, 15 (1):46-59.

BÖLÜM 2

HUB MOTOR TASARIMINA GENEL BAKIŞ

Seyidkhadija MİRJAFARLI *,
Dr. Öğr. Üyesi Hakan TERZİOĞLU**,
Öğr. Gör. Abdullah Cem AĞAÇAYAK***

*Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği,
khadice.jafarli@mail.ru

** Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği,
hterzioglu@selcuk.edu.tr, ORCID NO: 0000-0001-5928- 8457

***Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler Myo, Elektrik ve Enerji Üretimi
Bölümü, Mail: acagacayak@ktun.edu.tr, ORCID NO: 0000-0002-9285-5764

GİRİŞ

Petrol ve benzeri yakıtların aynı şekilde kimyasal gazların doğaya verdiği zarar ve küresel ısınmanın esas nedeni olması bilim insanları tarafından ispatlanmıştır. Bu ve benzeri nedenlerden dolayı birçok bilim insanları, şirketler, meslek sahipleri bu sorunun çözümü için yollar aramaya ve alternatifler sunmaya çalışıyor. Bu durum teknolojiler ve birçok mühendislik alanlarında güncellemelere neden oldu ki, bunlardan biri de elektrik enerjisi veya alternatif yakıtların petrol ve kimyasal maddelerin kullanıldığı alanlarda birer alternatif olarak kullanılmasıdır. Elektrik Motorları önerilen bu çözümlerden biridir.

1. ELEKTRİK MAKİNELERİNİN TARİHİ VE GELİŞİM SÜRECİ

Bilindiği gibi, yıllar geçtikçe teknoloji ve bilimin de gelişmesiyle Elektrik motorları kapsamlı olarak değişti ve günümüz toplumunda vazgeçilmez rolü vardır. Elektrik Motorlarının ilk icat edildiği zamandan şimdiye kadar 6 aşamada gelişme kaydettiği görülmektedir. 18.yüzyılın ortalarında ilk olarak İskoç Benediktin keşişi ve bilim adamı Andrew Gordon'un çalışmalarıyla 1740'larda ortaya çıktı. Lakin 1791-1867 yılları arasında yaşamış olan Michael Faraday tarafından 1821 yılında bu devrimsel teknoloji, elektrikle çalışan ilk motorun tanıtımı yapılmıştır. Faraday Kraliyet Enstitüsü'nde yaptığı çalışmalarda elektromanyetik döngüye odaklandı ve bunun üzerine yaptığı çalışmalar sonucunda Faraday Yasasını buldu. Dane Hans

Oersted tarafından icat edilen elektromanyetiğin bulunmasının ardından Faraday, elektromanyetik enerji ile mekanik hareketlerin sağlanabileceğini 1821 yılında kanıtladı. 1834'te ise Vermont'tan Thomas Davenport'un ilk resmi pille çalışan elektrik motorunu icat edildiği zaman bir görevi yerine getirmek için yeterli güce sahip ilk elektrik motoru yapıldı. Ve buluş küçük ölçekli bir matbaaya güç sağlamak için kullanıldı(Rajashekara, K. 1994).

Bir göreve yönelik ilk elektrik motorunun yapılmasından sonra verim, ağırlık, kayıplar gibi nedenlerden dolayı bu buluşun optimize edilmesi gerekmişti. Böylece, William Sturgeon, makineleri sürmek için yeterli güç sağlayabilen ilk DC motoru icat etmiş olsa da,1886'ya kadar değişken ağırlık altında sabit hızda çalışabilen ilk pratik DC motoru üretilmedi. Frank Julian Sprague ilk üretilmiş DC motorun mucidiydi ve bu buluş, endüstriyel uygulamalarda elektrik motorlarının daha geniş bir şekilde benimsenmesi için bir katalizör sağlamıştır. Lakin, elektrik motorları 50 yıl daha ticari düzeyde yaygın olarak kullanılmadı. Bilim insanları ve mühendisler 1880'lerin sonuna doğru elektrikle çalışan motorların hem endüstride hem de günlük hayatta kullanılmasına yönelik çalışmalar başlattılar(Rajashekara, K. 1994;Toliyat, H.A. 2018).

1887'de Nikola Tesla, bir yıl boyunca yaptığı çalışmalarının ardından, başarıyla patenti aldığı bir AC indüksiyon motoru icat etti. Bu motor karayolu araçları için uygun olmasa da sanayide kullanım alanı genişti. Zamanla çalışmaların devam etmesiyle 1892'de ilk pratik indüksiyon motoru tasarlanmış, ardından dönen bir çubuk sargı rotoru

ile üniteyi otomotiv uygulamalarında kullanıma uygun hale getirilmiştir. ÜÇ fazlı indüksiyon motorları 1891’de geliştirilmeye başlamış ve bu çalışmanın yapılabilmesi için, GE ve Westinghouse 1896 yılında bar sargılı rotor tasarımının kullanılmasına yönelik bir çapraz lisans anlaşması imzaladılar. Tabii ki, elektrik motor üzerinde yapılan çalışmalar burada durmadı ve zamanla geliştirilmeye devam etti(Toliat, H.A. 2018). İndüksiyon motorların parametrelerinde değişimler anlık olarak değiştiği bilinmektedir. Bu motorların verimleri ve sürme yöntemleri parametrelerle direk ilişkili olduğu için üzerinde indüksiyon motorların tasarımından bugüne kadar çalışmalar devam etmektedir (Ağaçayak, A.C. et al. 2019; Terzioğlu,H. 2019). Motorların yapısı ve sürmesi üzerinde oldukça etkili olan ve çalışma şartları ve çevresel etkilerden etkilenerek değişkenlik gösteren bu parametrelerin tespiti için enerji sistemindeki etkenler incelenmiştir (Terzioğlu,H. 2019). Bu çalışmalar üzerine çeşitli motor üzerinde sürme yöntemler geliştirilmeye çalışmıştır (Terzioğlu,H. 2019). Lakin bu 6 aşama elektrik motorlarının günümüzdeki kullanımına kadar en önemli adımlardı.

2. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM VE HUB MOTORLARA GENEL BAKIŞ

Tarihine kısaca baktıktan sonra bu bölümde, elektrik motorların bir türü olan Tekerlek içi motorlar diğer bir adıyla Hub motorlardan bahsedilecek. Tekerlek içi elektrik motorları, tahrikli tekerleklere sahip olacak şekilde tasarlanmayan araçlarda hareket etmesini sağlamanın etkili bir yöntemini temsil eder. Hub motorlar tekerlek

içine yerleştirilen, merkeze bağlı elektrik motorlarıdır. Alternatif yakıtla çalışan araçlarda (Alternative Fuel Vehicles), özellikle elektrikli araçlarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Araçların tekerleklerinin ivmelenmesinde kullanılabilen senkron makine türüdür. Bu motorlar büyük miktarlarda tork ve güç sağlayabilir. Yapısı ve çalışma prensibi Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız DC motor gibidir. Yapılarının aynı olması ve aynı elektrikli makine türüne dahil olduklarından tasarım aşamasında ve sayısal verilerin hesaplanmasında Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız DC motor referans olarak alınabilir (Terzioğlu,H. 2019; Bayraktar, H.C. 2014).

Bu elektrik motorlarının elektrikselsel yapısı ve sürülmesi beş birimden oluşmaktadır. Bunlar; sabit mıknatıslı bir rotor, üç fazlı ve sargıları elektronik olarak enerjilendirilen stator, geri besleme üniteleri (pozisyon algılayıcı sensörler ile akım ve hız geri besleme bilgileri), evirici ve sürücü birimi, denetleyici (yazılımsal ve donanımsal yapılar)'dır (Tolıtay, H.A. 2018; Terzioğlu,H. 2019; Bayraktar, H.C. 2014).

2.1. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM VE HUB MOTORLARININ AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

Sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım hub motorlarının birçok avantaj ve bunun yanı sıra dezavantajları vardır. Yüksek verim, sessiz çalışma ortamı, daha az bakım gerekliliği, kolay soğutma gibi teknik, standartta mevcut olan bir öğeye, tekerlek içine monte edildiği için daha az alan kaplar ve aracın görsel tasarımını bozmaması gibi estetik

avantajları vardır. Bunların yanı sıra dezavantajları, karmaşık kontrol sistemine sahip oluşu, pahalı bir sistem oluşu, pozisyon algılayıcı sensörlere ihtiyaç duyması, periyodikal prosesde her devirde stator üzerindeki manyetik kutup ve dişlere bağlı olması,düşük hızlarda çok belirgin vibrasyon veya titreşim(Yoldaş, M. et al. 2020).

2.2. ROTOR

Dönen kısmı teşkil eder ve kalıcı mıknatıslardan oluşur. Rotorun manyetik alanını uzunömürlü bir şekilde oluşturan ,ona yerleştirilen bu sabit mıknatıslardır. Rotorun imalında daimi mıknatıs elde etmek için, genelde ferrit maddesinden yapılan mıknatıslar tercih edilir. Rotorda kullanılacak manyetik malzemenin belirlenmesinde - birim hacime düşen moment miktarına, motorun işletme sıcaklığı aralığına ve yerleştirilecek mıknatısın fonksiyonelliği göz önünde bulundurulmalıdır(Bayraktar, H.C. 2014).

Rotorda elektronik bir komütasyon gerçekleşir. (komütasyon bir bobinde akımın yön değiştirme işlemine denir)

Genelde ucuz olması avantajlıdır, ama buna rağmen daha düşük mevcut akı yoğunluğu olması ve daha az manyetik yoğunluk sağlaması dezavantajlarındandır (Yoldaş, M. et al. 2020).

2.3. STATOR

Bir AC motoruna benzer ve motorun duran kısmıdır. Bir nüve ve içindeki oyuklara yerleştirilen üç fazlı sargılardan oluşur. Rotorun kutup sayısı, faz sayısı ve stator sargı şekline bağlı olarak stator oluk

sayısı belirlenir. Statorun çift kutup sayısının üç katı kadar, stator sargılarının sarıldığı çıkık vardır. Tasarlanan motorun gücü fazla olsa, kablo kesitleri artacak ve bu nedenle de stator boyutu da büyük olacaktır (Bayraktar, H.C. 2014).

2.4. GERİ BESLEME ÜNİTELERİ

Algılayıcı veya sensörler kullanılarak rotor pozisyonu belirlenmeli ve buna ek olarak inverter çalıştırılması için gereken akım ve gerilim değerleri ölçülmeli ve ölçüm değerlerine göre kullanılmalıdır. Hız ve akım kontrolünü yapmak için öncede söylendiği gibi rotor pozisyonunun belirlenmesi gerekiyor ki, bu da genelde Alan Etkili (Hall) sensörlerle yapılır. Tabii Sensörsüz motoru sürme teknikleri de vardır, lakin sensörsüz sürme teknikleri, ek olarak genetik algoritma, yapay sinir ağları ve b. algoritmaların kullanılması zaruretini ortaya çıkarır. Bu bahsedilen işlemleri ve prosesleri üstlenen birim Geribesleme Üniteleri adlanır. Sensörsüz kullanılan motorlar, sensörlü kullanılan motorlara nispetle daha az hız ve ivme değerlerine eriştikleri için uygulama için motor seçimi ve hangi türün seçileceğine karar verdiğimizde tüm bu faktörler göz önünde bulundurulmalıdır (Yoldaş, M. et al. 2020).

3. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM VE HUB MOTORLARININ ÇEŞİTLERİ

Fırçasız Doğru Akım Hub Motorlar (BLDC Hub Motors) dişli durumuna göre iki çeşidi vardır; Dişlili Hub Motorlar, Dişlisiz Hub Motorlar.

3.1. DİŞLİSİZ VE DİŞLİLİ HUB MOTOR

Dişlisiz (Gearless) hub motorlar doğrudan tahrikli tekerlek içi(in-wheel) motor da adlandırılır. Motorun merkezinden geçen mil(axle),mile sabitlenmiş bakır sargılar ile birlikte motorun bir parçasını teşkil eder. Bu tertibatın tamamı stator adlandırılır. Statora elektrik uygulandığında, indüklenmiş manyetik alan, mıknatısın monte edildiği rotorun hareket etmesini sağlar. Böylece araç hareket eder.

Dişlili (Geared) hub motorlarda ise, motorun kasası bu tip hub motorlarda, bir dişli redüksiyon sistemi aracılığıyla statora bağlanmıştır. Tekerlik her bir kere döndüğünde içindeki motor bir kaç devir dönmüş oluyor. Bu yapısı dişlili hub motorların daha yüksek ve verimli hızda çalışmasını sağlar(Hanselman , D.C. 2003).

Dişlisiz hub motor daha verimli olur çünkü dişlileri olmadığından sürtünme kayıpları minimize edilmiş olur. Dişlililerin ömrü dişlisiz hub motora göre daha az olur çünkü zamanla dişli sistemi sürtünmeden dolayı tahrip olur. Buradan da dişlili hub motorların daha çok bakım ihtiyacı olduğu sonucu çıkar. Lakin sık sık bakım ihtiyacı olsa da iniş yokuşlu yollar için daha faydalı ve dayanıklı olması dişlili hub motorların otonom alanda tercih edilmesine neden

olur. Diğer bir taraftan, rejeneratif frenleme özelliğine sahip olması dişlisiz hub motorun elektrikli araçlarda kullanım için seçilebilir. Dişlisiz hub motor dişliliğe göre daha ağırdır bu onun verimde oluşturduğu dezavantajıdır. Lakin ağır olması diğer bir yandan hızlı ısınmasını önlediği gibi, ısı kayıplarını da önler. Yani kullanılacağı projeye ve uygulama nedenine göre bu iki motordan biri elektrikli araçlar için tercih edilebilir.

Fırçasız doğru akım motorları için aynı şekilde hub motorlar için diğer bir sınıflandırma rotor yapısına göre yapılır. Disk tipi, İç Rotorlu, Dış Rotorlu olarak üç türü vardır.

3.2. DİSK TİPİ MOTORLAR

Disk tipi Blde Hub Motorlarda çelikten yapılan ve iki yüzeyinden birine mıknatıs yerleştirilen bir disk rotoruna ve rotor mıknatıslarına karşılık olarak stator da uyarıma sargıları mevcuttur. Düşük hız uygulamalarında, kapalı çevrim kontrolü ve hız geri beslemesine sahip bir sistem kullanılarak uygun bir performans elde edilebilir. Lakin yapısındaki rotor ve stator disk çeliklerinde ısınma sorunu baş göstermektedir ki, bu da kullanıldığı hız değerleri 1000 rpm üzerine çıkarsa olur. Kullanılacağı uygulamada açısız hızın 1000 rpm üzerinde olması gerekiyorsa, ısınma sorununun önüne geçmek için bazı tedbirle görülmeli ve güncellemeler yapılmalıdır ki, bu da ek maliyetlere neden olacaktır. Motorun istenmeden ısınması güç kayıplarına, mıknatıslanmanın azalmasına ve verimin düşmesine neden olması bu durumun göz ardı edilmemesi sonucuna vardırıır bizi. Böylece

motorda belirli mekanik ölçülerin değişmesi, daha güçlü mıknatısların kullanılması ve buna benzer birçok çözüm yolları vardır ki, bunlardan biri de farklı tip Hub motor kullanmaktır (Yoldaş, M. et al. 2020; Chau, K. Et al. 2007).

3.3. DIŞ ROTORLU MOTORLAR

Dış Rotorlu Hub Motorlarda isminden de görüldüğü gibi mıknatısların yerleştirildiği döner kısım stator sargısının dışında olur. İç kısımda bulunan stator endüvi sargıları, dış kısımda ise daimi mıknatısların bulunduğu rotor dönmektedir. Fırçalı bir DC motorla, stator ve rotorun yapısı örtüşmektedir. Bu tipte, mıknatıslar rotora gömülü bir vaziyette yerleştirilir. Bu tür elektrik motorunun tasarım ve üretiminde dikkat edilmesi gereken birkaç faktör vardır. Rotorun dışta olup yüksek bir kütleyle sahip olduğunda, mıknatısların rotora yerleştirilmesi esnasında bir denge sorunu oluşturabilir. Bu sorunun karşısını almak için, üretim zamanı birincisi bu tip motorlarda, diğer çeşitlerin aksine tek rulman ve yatak kullanımı söz konusudur. Diğer nokta, rotorun dışta olması mıknatıs alanını büyütmede ve bu nedenle aynı manyetik alan etkisi daha ucuz mıknatıslarla elde edilebilmektedir. Böylece maliyet açısından kıyaslandığında daha ucuzdur. Yüksek eylemsizliğe sahip olmaları nedeniyle, mevcut hız değerlerini, yüklerinin ani değişimi durumlarında muhafaza ederler ki, bu özelliklerinden dolayı birçok uygulama alanına sahiptirler. Diğer bir sorun ise bobin sargılarının merkezde olması nedeniyle motorun soğutulma işlemini güçleştirmesidir. Termal analizlerde bu faktör kesinlikle dikkate alınmalı ve gereken soğutma metodu seçilmelidir.

Uçan araçlarda, bu tip motorların hızlarının daha düşük, torklarının ise yüksek değerde olmaları nedeniyle tercih edilmektedir(Yoldaş, M. et al. 2020; Bayraktar,H.C. 2014).

3.4. İÇ ROTORLU MOTORLAR

İç Rotorlu Hob Motorlar yapı olarak asenkron ve senkron elektrik motorlarına daha çok benzemektedir. Dıştaki statorda, endüvi sargıları bulunmakta, iç tarafa yerleştirilen mıknatıslar ise yüzey mıknatıslı, kanal mıknatıslı veya gömülü mıknatıslı olacak şekilde yerleştirilebilir. Dış rotorlu hub motorla kıyasladığımızda yüksek hızlara çıkıldığında rotordaki mıknatısların stabilizasyon sıkıntısı ve statorun sarımı, daha zor ve maliyetli olması gibi dezavantajları vardır. Lakin, dış rotorlu motorlara göre sargının dışarıda olması bu tip motorların daha kolay soğumasını sağlar. Hızları, dış rotorlu motorlara nazaran daha yüksek, volt başına tork üretimi ise daha düşüktür (Bayraktar,H.C. 2014; Hanselman , D.C. 2003).

4. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARIN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Tüm bu bilgilerin ışığında BLDC Hub motorun temel çalışma prensibi, sabit mıknatısa sahip bir rotorun stator etrafında dönmesi ve rotorda elektronik komütasyonun gerçekleşmesidir. Rotorla birlikte hareket eden iletkenlerdeki akımın yönü, iletken bir kutbun altından diğer bir kutbun altına doğru geçmesiyle yön değişikliğine uğrar. Bobin iletkenlerinden geçen akımın bu tür yön değiştirmesine komütasyon diyoruz. Komütasyonun gerçekleşebilmesi için de rotor pozisyonunun tespit edilmesi gerekir.

5. LİTERATÜR TARAMASI

Fırçasız doğru akım motorları (BLDC Motors) ve Hub Motorlar üzerinde birçok çalışmalar yapılmıştır.

Çalışmalardan birinde, tasarım süreci ve ilk tasarım kararlarının fırçasız açık oluklu radyal akıllı sabit mıknatıslı hub motorunun nihai performansı üzerindeki etkisi ile ilgili ayrıntılı bir analiz sunulmuştur. Başlangıç motor boyutlandırmasına uygun hesaplama açısından verimli teknikler sunulmuş ve tartışılmıştır. Bunlar, basitleştirilmiş termal modelleme ile birlikte güç kaybı ölçeklendirme yöntemlerini içerir. Teorik bulgular bir prototip motor üzerinde doğrulandı ve iyi bir uyum gösterdi. Profilli dikdörtgen iletkenler kullanan sargı yapısının/düzeninin seçimi araştırılmış ve daha geniş kullanılan bir çözümle karşılaştırılmıştır.

Teorik bulgular, bazı tasarımlar için ac sargı bakır kaybının, makinenin genel performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve bunun daha yüksek hızlarda sınırlı/düşük bir performansla sonuçlandığını doğrulamaktadır. Bu bağlamda, sargılardaki ilk akım yoğunluğunun seçimi, bir makinenin termal performansı, özellikle de sürekli tork/hız zarfının eğimi/şekli üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Son olarak, çekirdekteki ilk seçim akı yoğunluğunun motor performansı üzerindeki etkisi, akım yoğunluğundan çok daha az belirgin bir etki göstererek gösterilmiştir.

Ayrıca, sunulan analiz, bu faktörler motor performansını önemli ölçüde etkilediğinden, motor boyutlandırma/tasarım sürecinin çok

erken aşamasında motor üretim yönlerinin hesaba katılmasının önemini göstermektedir.

Analizde sunulan sayısal sonuçlar, bu yazıda incelenen belirli motor tasarımı için geçerlidir. Bununla birlikte, çekirdek akı yoğunluğunun ve akım yoğunluğunun makinenin boyutu ve performansı üzerindeki etkisinin yanı sıra yuva şekli ve buna karşılık gelen ac kayıpları üzerindeki potansiyel etki ile ilgili genel sonuçlar, diğer motor boyutlandırma veya tasarım çalışmalarında kılavuz olarak kullanılabilir(Tong, W. 2014).

Hub Motor üzerinde yapılan çalışmalardan birinde elektrikli scooter için 13 inç tekerlek içi hub motorunun optimizasyonunu, tasarımını ve yapımını açıklamaktadır. 13 kW'lık nominal güç, böyle bir tahrik sistemi için oldukça yüksektir. Buna ek olarak, 125 cm'lik bir motosiklete benzer bir performansa sahip olan aracı 120 km/s'ye kadar hızlandırmak için uygundur. Bu tür tahrik sistemleri için diğer alternatif uygulamalar, elektrikli kamu hizmet araçlarıdır(Wrobel, R. 2013).

Çalışmalardan birinde, elektrikli bir araç için hub motoruna uygulanan yeni bir BLDC motor yapısını sunulmaktadır. Günümüzde BLDC motorlarının fiziksel yapısına, sargılar için bir çerçeve olarak çıkıntılı kutuplara sahip büyük bir stator hakimdir. Bu yapı, stator malzemesinde eddy akımları ve histerezis kayıplarının neden olduğu yüksek ağırlık ve önemli enerji kayıplarına neden olur. Ayrıca, direnç kayıplarının meydana gelmesi için çoğunlukla sınırlı kesit alanları

olan büyük miktarda iletken malzemeye ihtiyaç vardır. Bu yazıda, yüksek tork üretmek için tüm kalıcı mıknatısların aynı anda kullanımına izin veren çok kompakt ve yüksek verimli hava boşluklu sargı ile birlikte azaltılmış ağırlık, boyut, dirençli ve manyetik kayıplara sahip stator yapılarına izin veren kalıcı uyarılmış bir elektrik motoruna yeni bir versiyon sunulmaktadır. Ağırlık ve enerji yoğunluğu hub motorların dezavantajlarındandır. Sunulan tasarlanmış yeni motor modeli bu iki probleme yöneliktir. Sayısal simülasyon ve ilk ölçüm sonuçları, yeni tasarımın uygulanabilirliğini kanıtlamış ve elektrikli araç uygulamaları için kullanılabilirliğini göstermiştir. Böylece elektrikli araçlar için yeni bir tekerlek içi hub motorunun tasarımı sunuldu. Hava boşluğu sargısı dahil modifiye edilmiş manyetik daire sayesinde, hafif bir yapı mümkün oldu ve yaklaşık 2kW/kg civarında çok yüksek bir güç yoğunluğu ile sonuçlandı. Kapsamlı sayısal simülasyonlar, yeni tasarımın uygulanabilirliğini kanıtıyor. İlk deneysel sonuçların yapılması konsepti kanıtlamak ve küçük bir fonksiyonel prototip kullanarak analitik motor modelini doğrulamak içindi. Küçük bir modifiye edilmiş BLDC motorun sunulmuş sonuçlarına dayanarak, bu yazıda sunulan tasarım parametreleri temelinde 40kW'lık bir prototip geliştirildi ve inşa edildi (Gruber, W. 2011).

Elektrikli sürme sistemi, elektrikli araçların (EV'ler) sürüş performansı ve güvenliği için çok önemlidir. Geleneksel iki tekerli EV'lerin aksine, hub motorlu dört tekerli sürme sistemi, her bir tekerleğin torkunu ve hızını bağımsız olarak kontrol ederek aracı yönlendirebilir ve yüksek

verimlilik ve güvenilirliğe sahip çok basit bir dağıtılmış aktarma organı sağlar. Bu yüzden sadece tekerlek itme sistemi değil aracın aerodinamik yapısının tekerleklerin üzerine bindirdiği yükünde önemi artmaktadır (Hanselman , D.C. 2003). Ayrıca gene elektrik araçlarının sürüş esnasında tekerleklerine binen çeşitli yük ve etkenler yapısında yer alan süspansiyon sistemlerine ve araçların direksiyon yapısında etken içine girmesini sağlamaktadır (Gülgün, T. et al. 2020; Kaya, Y. et al. 2020). Bu çalışmada, pratik bir sürüş döngüsüne dayalı olarak bir kampüs devriyesi EV'si için kalıcı mıknatıslı hub motor sürme sistemi için tasarım optimizasyon yöntemi sunar. Sürücü sistemi için bir dış rotorlu sabit mıknatıslı senkron hub motoru (PMSHM) ve geliştirilmiş bir model yüklem akım kontrolü önerilmiştir. Redüktörlerin olmaması nedeniyle, doğrudan tahrikli PMSHM'nin daha karmaşık çalışma koşulları ve tasarım kısıtlamaları ile yüzleşmesi gerekiyor. Uygulamada, motor tasarım gereksinimleri, kampüste pratik EV sürüş verilerinin toplanması yoluyla elde edilir. Süspansiyon sabitliği ve dönüş hızı regülasyonunu aynı anda dikkate almak, BPMSM sisteminde önemli bir konudur. Bu makalede, iyi izleme ve bozulma karşıtı performansı ile GWO tarafından ayarlanmış bir durum geri besleme kontrolörü önerilmiştir. Geleneksel SFC ile karşılaştırıldığında, önerilen strateji, GWO optimizasyonunu kullanarak daha az yanıt süresi ve izlenebilirlik ile iyi sonuç alınmış, bu da hesaplama verimliliği ve yerel optimizasyondan kaçınma açısından bariz avantajları gösterir (Bozkır, M. et al. 2020).

Diğer bir çalışmada, hub motorları için birleşik bir BLDC ve PMSM kontrolü önermektedir. Hub motoru için düşük hızda sinüzoidal kontrol veya alan odaklı kontrol uygulanırken, orta ve yüksek hızda blok komütasyon algoritması kullanılmaktadır. Sürüş kabininin tüm hız aralığında düşük gürültü seviyesine ulaşılabilir. Dört tekerlekli EV için elektrikli frenleme yöntemi de sunuldu. Önerilen metodoloji, araç testi ile gösterilmiştir ve düşük gürültü seviyesi ve dinamik performans elde ettiği gösterilmiştir. Kalıcı mıknatıslı fırçasız hub motoru için farklı kontrol yöntemleri sürüş ve frenleme kontrol stratejileri, blok komütasyon kontrolü, sinüzoidal kontrol ve alan yönelimli kontrol olarak sunulur. Daha sonra, bu yazıda hub motoru için birleşik BLDC ve PMSM kontrolü önerilmiştir. Hub motoru için düşük hızda sinüzoidal kontrol veya alan yönlendirmeli kontrol uygulanırken, orta ve yüksek hızda blok komütasyon algoritması kullanılmaktadır. Önerilen hibrit sürüş kontrol stratejisinin iyi bir performans elde edebileceği ve dört tekerlekli elektrikli araç için uygun olduğu doğrulandı. Deneyler, dinamik performansın elde edilebileceğini ve tüm hız aralığında sürüş kabinindeki düşük gürültü seviyesinin korunduğunu doğrulamaktadır (Sun, X et al. 2020).

Bir makalede, kalıcı fırçasız hub motoru için farklı kontrol yöntemleri sunar. Sürüş ve frenleme kontrol stratejileri, blok komütasyon kontrolü, sinüzoidal kontrol ve alan yönelimli kontrol olarak sunulur. Daha sonra, bu yazıda hub motoru için birleşik BLDC ve PMSM kontrolü önerilmiştir. Hub motoru için düşük hızda sinüzoidal kontrol veya alan yönlendirmeli kontrol uygulanırken, orta ve yüksek hızda

blok komütasyon algoritması kullanılmaktadır. Önerilen hibrit sürüş kontrol stratejisinin iyi bir performans elde edebileceği ve dört tekerlekli elektrikli araç için uygun olduğu doğrulandı. Deneyler, dinamik performansın elde edilebileceğini ve tüm hız aralığında sürüş kabinindeki düşük gürültü seviyesinin korunduğunu doğrulamaktadır (Bayraktar, H.C. 2014).

Literatürde yapılmış çalışmalardan birinde de, elektrikli bir araçta tekerlek içi hub motoru sürmek için kullanılan açık kutuplu senkron makinenin elektromanyetik tasarımını ve analizini sunmaktadır. Yüksek verimlilik ve tork yoğunluğu elde etmek için, son zamanlarda patentli döküm bobinler, %90'a kadar yarık doldurma faktörlerine izin veren bir dişli-bobin stator sargı topolojisinde düşünülmüştür. Stator yuvalarının ve kutupların sayısının seçimi, yüksek düzeyde entegre edilmiş bir tekerlek içi hum motor sürme gereksinimlerini karşılamak için düşünülmüştür. Bu tamamen yenilikçi tasarım için, alan gerilimi beslemesi için döner bir transformatör kullanılır. Üç farklı makine, sürekli yük ve sürüş döngüleri için geçici ve sabit sıcaklık dağılımını simüle etmek için toplu termal ağlarla birlikte elektromanyetik analiz için sonlu elemanlar yöntemleri (FEM) kullanılarak karşılaştırılmıştır. En uygun makine konfigürasyonu elektromanyetik olarak optimize edilmiştir ve gerçek hayattaki sürüş aşamasındaki simülasyonları, otomotiv uygulamaları için teknik kapasitesini göstermiştir (Lu, D. et al.2011).

Başka bir çalışma ise, merkezi ve dağıtılmış tahrikli elektrikli araçların performans özelliklerinin karşılaştırmalı analizine dayanarak,

dağıtılmış tahrikli elektrikli araçların hub motor tahrik modunun kompakt yapıya, yüksek araç içi alan kullanım oranına, daha düşük araç ağırlık merkezine, iyi sürüş stabilitesi, kolay akıllı kontrol ve diğer birçok avantaja sahip olduğunu, böylece elektrikli araçların sürüş performansının geliştirilmesi için yeni gereksinimler olduğunu ve dağıtılmış tahrikin, gelecekte elektrikli araçların nihai modu olacağını göstermiştir(Jürgens, J. et al. 2014).

Çalışmalardan birinde de sabit mıknatıslı bir senkron motorun tekerlek içi motorunda bağımsız olarak dönen bir tekerlek setinin aktif direksiyonu üzerindeki motor dönüş hızı dalgalanmasının etkilerini analiz etti. Motor dönüş hızı dalgalanmasının IRW'nin ideal kontrol hedefine dönmesini engellediği; bunun yerine, belirli bir aralıkta dalgalandığı bulundu. Bu araştırma, düz bir çizgide çalışan bir tekerlek içi motorda bir IRW'nin sabit hız işlemi sırasında sol ve sağ tekerleklerin dönüş hızı farkı oranı ile tekerlek takımı yanal yer değiştirme değeri arasında bir fonksiyon denklemi çıkardı. Daha sonra, motor kontrol doğruluğu ile tekerlek takımının maksimum yanal yer değiştirme değeri arasındaki ilişki ortaya çıkarılmıştır(Sun, Y. 2020).

Diğer bir çalışmada da, akustik davranışı sanal olarak optimize etmeye izin veren, otomobillerin elektrikli sürüşünü tasarlamak için yenilikçi bir konsept sunulmaktadır. Özel olarak, bir elektrikli tekerlek içi hub motorunun akustiği ayrıntılı olarak incelenir. Bu nedenle, hava basıncını hesaplamak için motor çevresindeki hava hacmi ile birleşen yapısal titreşimlerin yanı sıra en önemli titreşim uyarımı olarak

elektromanyetik alanı dikkate alan bütünsel bir simülasyon iş akışı geliştirilmiştir. İlk olarak, motorun yapısal titreşimlerini uyarmak için uygulanan elektromanyetik kuvvetler hesaplanır. Son olarak, hesaplanan yüzey hızı, yayılan ses basıncı seviyesini belirlemek için serbest alan koşulları altında çevreleyen hava hacmini uyarmak için kullanılır. Bütünsel metodolojinin her üç adımında da sayısal simülasyonlar için sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılır. Simülasyon sonuçları ölçümlerle doğrulanır. Bu yazıda, çevredeki hava hacminde azaltılmış bir ses basıncı seviyesine sahip bir motor almak için farklı tasarım konfigürasyonları karşılaştırılmıştır. Son olarak, elektrikli tekerlek içi hub motorun en iyi tasarımı belirlenmiştir (Ji, Y. 2017).

Başka bir çalışma balanssız manyetik çekişe karşı, Elektrik motorlarındaki vibrasyonun bastırılması üzerine yapıldı. Hub motorlu elektrikli araç (HM-EV) için tahrik motoru doğrudan tekerleğe entegre edilmiştir. Hub motorunun dengesiz manyetik çekişi (UMP), yol yüzeyi pürüzlülüğü uyarımı altında mıknatıs boşluğu deformasyonu ile üretilecekti. HM-EV sisteminin boyuna ve dikey dinamik performansları bu nedenle bozulur. İlk olarak, HM-EV sisteminin uzunlamasına ve dikey dinamik performansını analiz etmek ve optimize etmek için, havalı süspansiyon modeli, kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım (PM BLDC) ile donatılmış yeni bir on serbestlik dereceli matematiksel çeyrek HM-EV sistem modeli hub motor modeli ve rijit halka lastik modeli önerilmiştir. Bu modelde PM BLDC hub motorunun UMP'si dikkate alınmıştır. Bir HM-EV sistem

modeli doğrulama test tezgahı oluşturulmuştur. Modelin doğruluğu deneyle doğrulanır. İkinci olarak, çeyrek HM-EV sistem modeline dayalı olarak, boyuna ve dikey UMP'yi hesaplamak için BP sinir ağı benimsenmiştir. BP sinir ağları ve elektromanyetik formül ile hesaplanan sonuçlar arasındaki bağıl hata %5'ten azdır ve ortalama karekök hatası (RMSE) 2'den küçüktür. Önerilen BP sinir ağları hesaplama yöntemi ile UMP hesaplama süresi %70,3 oranında kısaltılmıştır. Son olarak, ayarlanabilir kuvvet tanıtlı ve HMEV sisteminin boyuna ve dikey titreşimini bastırmak için model öngörücü kontrol (MPC) yöntemi kullanılır (Duvigneau, F. et al. 2017).

Diğer bir araştırmada Fırçasız DC motorun (BLDCM) rejeneratif frenleme performansını etkileyen faktörler, tezgah testi ve yol testi yoluyla analiz edildi. BLDCM, dört tekerlekten bağımsız tahrikli bir EV'de tahrik motoru olarak kullanıldı. PWM görevi ile motor dönüş hızı, şarj akımı ve voltajı arasındaki ilişki, elektrik motoru için rejeneratif frenleme kontrol stratejisinin tasarımına fayda sağlayabilecek ve enerji verimliliğini artırmaya yardımcı olabilecek test ile belirlendi (Li, Z. et al. 2021).

Makalelerden birinde, hem dış rotorlu hem de iç rotorlu sabit mıknatıslı senkron motor incelenmiştir. Hem iç rotorlu makine hem de dış rotorlu makine, çekiş tahrik motorları için yaygın yapısal biçimlerdir. İlk tip, aktarma organının tork hızı profili gereksinimlerini karşılamak için dişli kutusunun başlatılmasını gerektirir. Öte yandan, birçok mekanik bileşen, örneğin, şanzıman, diferansiyel ve şaft gerekli değildir. Tekerlek içi hub motor başlatıldığında. Bu aşınma

bileşenlerinin kaldırılması, elektrikli araçların maliyetlerini ve ağırlığını azaltmak için avantajlar sunar. İç rotor PMSM, FEA aracılığıyla tasarlanmış ve deneysel testlerle başarılı bir şekilde doğrulanmıştır (Wang, B. et al. 2012).

Bir araştırma çalışmasında, tek tekerlek içi hub motor arızalarının elektrikli araçların dinamik davranışı üzerindeki etkisini ve buna karşılık gelen sürücü tepkilerini incelemektedir. Otoyol hızları için tek tekerlek içi hub motor arızalarının etkisini analiz etmek için hareketli tabanlı bir sürüş simülöründe deneysel bir çalışma yapılmıştır. Sürücü tepki süreleri, ölçülen verilerden türetilir ve deneysel bağlamlarında tartışılır. Arıza, aracın dinamik davranışına göre objektif olarak derecelendirilir ve subjektif değerlendirme ile karşılaştırılır. Bulgular, otoyol hızlarında trafik güvenliğini bozan kritik trafik durumlarının oluşabileceğini göstermektedir. Sürücüler tarafından net karşı önlemler alınması gerekiyordu(Roumani, K. 2016).

Diğer bir çalışma, PM BLDC hub motorunun bilgisayar destekli tasarımını (CAD) sunmaktadır. Geliştirilen CAD programı kullanılarak, bir tavan fanı uygulamasına yönelik 30 W, 48 V, 310 rpm PM BLDC hub motoru tasarlanmıştır. Hava boşluğu ve demirdeki akı yoğunluğu, yarık boşluk faktörü, motorun yığın uzunluğu, hava boşluğu uzunluğu, mıknatıs kutup sayısı vb. gibi tasarım değişkenleri varsayılır. Tasarım algoritması için temel çıktı denklemi kullanılmıştır. Geliştirilen CAD programının çıktısı tasarım verilerini verir ve aynı FE analizi ile doğrulanır. Bu makale ayrıca tasarlanan

PM BLDC hub motorunun parametrik analizini sunmakta ve parametrik analiz sonuçları sunulmaktadır (Wanner , D. et al 2016).

Günümüzde, piller, şanzımanlar ve elektrik motorları gibi yeni bileşenlere ihtiyaç duyulan teknolojinin yeniliği nedeniyle piyasada birkaç elektrikli araç (EV) bulunmaktadır. Literatürde çalışmalardan birinde, altı bağlantılı mekanizmalı tekerlek içi hub motor şanzımanlarının konfigürasyon sentezi ve simülasyonu için tasarım prosedürünü önermektedir. Sentez süreci, altı elemanlı ve sekiz eklemli altı mekanizma, 15 yeni debriyajsız motor şanzıman ve 16 yeni debriyajlı motor şanzıman gösterir. Güç akışı modları ve çalışma modları ile bağlantılı çalışma kurallarını analiz etmek için bir durum olarak sentezlenmiş konfigürasyon olasılığı olan yeni bir motor şanzımanı seçilmiştir. Ayrıca, bu tasarım, çalışma modu geçişi ve enerji düzenlemesinin sonuçlarını üreten simülasyon süreci için modellenmiştir (Rajagopal, K. 2006).

Bu makale, toplu parametre (LP), sonlu eleman (FE) ve hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) modelleri kullanarak elektrikli iki tekerlekli bir aracın hub motorundaki ısı yayılımını incelemektedir. Motor, harici rotorlu sabit mıknatıslı fırçasız DC topolojisi kullanır ve kayıplarının neredeyse tamamı statorda üretilir. Hub motor konstrüksiyonu, stator dan çevreye sadece shaft yoluyla ısı dağılımı için mevcut iletken yolları kısıtlar. Stator sargı kayıplarının iletim yoluyla yayıldığı dahili rotor yapısının aksine, burada konveksiyon, kayıp dağılımında önemli bir rol oynar. Bu nedenle, hub motorunun içindeki bileşenlerin sıcaklığını hesaplamak için geliştirilmiş konveksiyon

modellemesine sahip bir LP termal modeli önerilmiştir. Geliştirilen model, FE termal modeli ve test verileri ile doğrulanmıştır. Ek olarak, hub motorunun konvektif ısı transferinin yanı sıra dahili ve harici akışı doğru bir şekilde modellemek için CFD araçları kullanılmıştır. Son olarak, statordan ısı transferini iyileştirmek için CFD modeli kullanılarak hub motorunun bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir (Ji, Y.et al. 22018).

Bu yazıda ise, güneş enerjisiyle çalışan alternatif bir araç geliştirmek için bir yaklaşım geliştirdik. Bu makale, güneş enerjisiyle çalışan bir araba için bir prototip geliştirmeyi amaçlamaktadır. Burada özel bir motor tipi Fırçasız Kalıcı Mıknatıslı DC Motor (BLDC) ve arabayı çalıştırmak için mikroişlemci tabanlı bir kontrolcü kullanıyoruz. Güneş enerjisiyle çalışan araba, güneşten elde edilen güneş enerjisiyle çalışan ve aracın çatısında bulunan güneş panelleri ile kullanılabilir hale dönüştürülen elektrikli bir araçtır. Güneş panelindeki fotovoltaik (PV) hücreler, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür (Hoang, N.T. et al. 2018).

Tasarım aşamasında olan araç, yaklaşık olarak bir şarj işlemi için 30Km/Saat hızında çalışır. Şarj başına18 saat ve100Km olduğu başarıyla test edildi. Şu anda BLDC ile çalışan aracın Relüktans motorlu versiyonunu geliştirmek için daha fazla çalışma sürüyor. Ayrıca minimum boyutta daha yüksek verimli güneş panelleri kullanılması önerilmektedir(Fasil, M. et al 2015).

Başka bir çalışmada, elektromıknatıs ve kalıcı mıknatısın, homopolar mıknatısların itme ve heteropolar mıknatısların çekme biçiminde etkileşime girdiği düzenlemeye göre yeni bir tekerlek içi hub motoru önerilmiştir. Motor, statorda U-şekilli elektromıknatıslar ve rotorda kalıcı mıknatıslar bulunan aynı elektromanyetik üniteler tarafından monte edilebilir, bu da onu pratik gereksinimler için uygun ve esnek hale getirir. Voltaj denklemi ve elektromanyetik tork formülü, sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonla doğrulanan elektromekanik enerji dönüşüm ilişkisi analiz edilerek verilmiştir. Toplam torkun üç bileşene ayrıştırılmasıyla, bu makalenin araştırma vurgusu, tork dalgalanması, ortalama tork, amper başına tork ve akım değiştikçe torkun bakır kaybına oranı dahil olmak üzere tork karakteristiklerine yerleştirilmiştir ki, bunlar da bu tip motorların optimal tasarımı ve hız regülasyonu için önemlidir (Rattankummar, V, Gopinath, N. 2012).

Bu çalışmada, yedi ana sistem parametresi ölçülerek hub motorunun hatalarını gerçek zamanlı olarak izlemek ve teşhis etmek için yapay besleme ileri geri yayımlı sinir ağı (the artificial feedforward backpropagation neural network) yaklaşımı önerildi. Gerekli bir model oluşturmak için, en iyi model elde edilene kadar MATLAB ortamı tarafından her birinin 7 parametreye sahip olduğu 4160 örneklerden oluşan bir veri kümesi kullanarak modeli belirledik. Geliştirilen model diğer hub motorları için geçerli olabilir. Tüm sistemin geliştirmiş modeli Arduino Due mikrodenetleyici kartı kullanarak, hub motoru için mobil gerçek zamanlı izleme ve arıza teşhis sistemi prototipi tasarlanarak üretildi (Sun, C. et al 2016).

Diğer bir literatür çalışmasında, iki performans kriterine dayalı olarak hub motorunun ve pil takımının boyutlandırılması için bir metodoloji önerilmiştir - başlangıç derecelendirilebilirlik ve sürüş çevrimi. Hub motoru, güç taleplerine göre boyutlandırıldı ve pil takımı, iki performans kriterinin hem güç hem de enerji taleplerine göre boyutlandırıldı. Kütle dağılımını analiz etmek için göbek motoru tahrikinin (önden çekişli ve arkadan çekişli) farklı konfigürasyonları ve akü paketi yerleşimleri kullanıldı ve bunun sürücü sürüş konforu üzerindeki etkisi, aşırı yüklenme koşulları için ISO 2631-1 standardına göre incelendi (Şimşir, M et al 2016).

Motor, tekerlek jantı içindeki sınırlı alana yerleştirildiğinden, yüksek tork yoğunluğuna ve verimliliğe sahip olmalı ve çevresel döngü, giriş, şok ve titreşim ve sürücü kötüye kullanımı açısından tekerlek içinde olmanın zorluklarına dayanmalıdır. Son olarak, yeterli düzeyde işlevsel güvenliğin karşılandığından emin olmak için, arızaların aracın kontrolünün kaybedilmesine yol açmaması esastır. Çalışmada, tekerlek içi motorların tasarımı için hataya dayanıklı konsept çalışmalarını sunulmaktadır. Hem simülasyon hem de deney yoluyla, bir arızayı takip eden tepe tork bozulmasının, sürücü için kontrol sorunlarına neden olması muhtemel olan değerin %20'sinden daha az olduğu gösterilmiştir. Bu çok düşük değer, arıza akımlarını sınırlamak için uygun bir endüktans tasarımının bir kombinasyonu ve motorun bir dizi sekiz bağımsız alt motora bölünmesiyle elde edilir. Bu bölünme olmadan, arıza torkunun sekiz kat daha yüksek, yani 400

N.m olacağı tahmin edilmektedir ki, bu da güvenlik izinlerinden %40 daha fazladır(Suriyamoorthy, S. 2019).

Çalışmalardan birinde de, yağ-su bileşikli soğutma motor yapısı önerilmiş ve simülasyon modeli kurulmuştur. Farklı çalışma koşulları altında iki soğutma yapısının simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Nominal çalışma koşulu ve en yüksek çalışma koşulu altında motor iç sıcaklığının simülasyon sonuçlarını karşılaştırarak, rotor ve kalıcı mıknatıs sıcaklığının, yağ soğutması eklendikten sonra etkin bir şekilde kontrol edilebileceği sonucuna varılmıştır, bu da çok yüksek rotor sıcaklığı ve rotor sorununu çözebilir (İfedi, C.J. et al 2013).

Diğer bir çalışmada, yüksek tork kapasiteli ve artan hata toleransına sahip bir tekerlek göbeği tahriki sunulmaktadır. Hataya dayanıklı tasarımın genel tahrik konsepti ve özel gereksinimleri açıklanmıştır. Sürücü sisteminin normal modda ve hata modunda çalışma davranışı, bir motor test tezgahında gösterilmiştir (Zhang, C.N. et al 2019).

Literatür taraması sonucu, çift çıkıntılı elektromanyetik göbekli motorun sonlu elemanlar analizine uygulanan program tanıtılmış bir çalışma ile karşılaştık. Program, C++ dili ve MFC sınıf kütüphanesi ile derlenmiştir ve fonksiyonel modülleri, motorun boyutunu belirleme, sonlu eleman ön işleme, sonlu eleman hesaplama ve sonlu eleman metodunu içermektedir (Kock, A. et al 2012).

Çalışmalardan birinde de, gömülü V-şekilli manyetik devre yapısına sahip kalıcı bir mıknatıslı göbek motoru, tekerlek jant tahrik sisteminin daha yüksek gereksinimlerine göre, göbek motorunun çıkış

torku ve dinamik sürüş konforuna göre önerildi, yapı iç alanı tam olarak rotor çekirdeğinin hava boşluğu manyetik akı yoğunluğunu ve aşırı yük direncini iyileştirmek için kullanıldı. Etkili manyetik akı ve kaçak akı, manyetik devre yapısının uygulanabilirliğini doğrulamak için eşdeğer manyetik devre yöntemiyle hesaplandı. Homopolar kalıcı mıknatıs açısı ilişkileri ve kalıcı mıknatıslanma yönü kalınlığı ile hava aralığı akı yoğunluğunun kalınlığı ve dişli torku arasındaki ilişki, optimal kombinasyon şemasını elde etmek için analiz edildi. Prototip modelin diğer simülasyon sonuçları, gömülü V şeklindeki yapının, göbek motorunda kullanılan sabit mıknatıslı rotor için uygun olduğunu ve bu da analiz sonuçlarının doğruluğunu doğruladığını göstermektedir(Wang, D.Z., Chen, S.Y. 2015).

Başka bir literatür çalışmasında, yeni bir tekerlek içi motor (IWM) topoloji şeması öne sürülmektedir. Bu şema, tekerleğe gömülü motor ve yol yüzeyi pürüzlülüğü uyarımı ile ortaya çıkan motor mıknatıs aralığı (MMG) deformasyonu nedeniyle yayılmayan kütle artışını ele geçirmeyi amaçlamaktadır. IWM cihazına kauçuk burçlar monte edilerek, IWM kütlesi yaysız kütleden esnek bir şekilde izole edilir. Lastik burçlar eşzamanlı olarak yol yüzeyinden gelen titreşim enerjisini emebilir ve MMG deformasyonunu azaltabilir.

IWM, yaysız kütlelerin artmasına neden olur ve bu, kritik MMG deformasyonuna yol açacaktır. Ayrıca, geleneksel IWM EV'lerde araç dinamikleri daha da kötüleşiyor. Böylece, yeni bir IWM topoloji şeması öne çıkarıldı. Lastik burçlar, motoru tekerlekten esnek bir

şekilde izole etmek için monte edilmiştir. Sonuç olarak, motora gelen RSR uyarımı ve mıknatıs boşluğu etkin bir şekilde emilir.

Burç sertliği ve sönümlenme, IWM EV tasarımı için optimize edilmiştir. BVA tasarım hedefini karşıladığından, sertlik daha küçükse daha iyi olmuştur. Daha çok MGD ile ilgili olduğu için sönümlenme dikkatli bir şekilde optimize edilmiştir.

Kauçuk burç montajı, IWM EV'nin dinamiklerini geliştirmek için etkili bir yaklaşımdır; özellikle, MBD'yi %90'ın üzerine çıkarabilir. Bu nedenle, bu şema IWM topoloji optimizasyonu, araç sürüş konforu ve güvenlik için verimli olabilir (Luo, Y. et al 2012).

Bir çalışmada, farklı göbekli motor tahrik sistemleri arasında karşılaştırmalı bir analiz sunmuştur. Özellikle iki ve dört tekerlekten çekişli tahrik sistemleri analiz edilmiştir. Bu ikinci durumda, farklı ve eşit nominal güçlere sahip BLDC'ler simüle edilmiştir. Her konfigürasyon için özel akü-inverter sistemleri tasarlanmış, ağırlıkları ve fiyatları göz önünde bulundurulmuştur. Sonuçlar enerji tüketimi, toplam ağırlık ve maliyet açısından karşılaştırılmıştır. İki tekerlekten çekişli tahrik sisteminin en ucuz ve en hafif, ancak enerji tüketimi açısından en kötü olduğu gösterilmiştir. Aksine, dört tekerlekten çekiş kullanmak enerji tüketimini azaltır, ancak maliyeti ve ağırlığı artırır. Araştırma, dört eşit motorlu bir tahrik sisteminin enerji tüketiminin, farklı karakteristik eğrilere sahip iki farklı motor çifti kullanılarak iyileştirilebileceğini göstermektedir. Bu hibrit çözüm, homojen tahrik sistemine göre maliyetin ve ağırlığın azaltılmasını sağlar. Ek olarak,

2WD ve 4WD homojen konfigürasyonlarda, hibrit tahrik sistemlerine göre maliyet ve ağırlık açısından bir özerklik artışının daha pahalı olduğu gösterilmiştir (Cordopatri, A., Cocorullo, G. 2017).

Başka bir çalışmada da, EV hub sürücü uygulamaları için 12 farklı optimum tasarlanmış çift katmanlı PM konsantre bobin makinesinin performansı ele alınmıştır. Ayrıca, bir EV için geliştirilmiş düşük maliyetli, su soğutmalı bir PM hub sürücüsünün pratik tasarım detayı ve test sonuçları sunulmuştur(Rix, A.J. 2011).

Bu makale, istenen işlevlerle kompakt bir yapısal montaj oluşturmak için 6 vitesli bir bisiklet tahrik göbeğine bir dış rotor fırçasız DC (BLDC) motoru entegre ederek yenilikçi bir tasarım geliştirmeyi amaçlamaktadır. Geleneksel tasarımlardaki doğal dezavantajların üstesinden gelmek için daha fazla işlevsel ve yapısal entegrasyon sağlayan uygulanabilir bir tasarım konsepti önerilmiştir. Her hızın güç aktarım yolunu yönetmek için iki çalışma moduna sahip bir kavrama sırası tablosu sunulur. Temel devre denklemlerinin yardımıyla, iki serbestlik dereceli, altı bağlantılı bileşik planet dişli takımının her bir hızının hız oranı hesaplanır. Harici düz dişli dişler statorun kutup pabuçlarına entegre edildiğinden, dişli torku Ansoft/Maxwell sonlu eleman paketi kullanılarak analiz edilir. Sonuçlar, aynı manyetik malzeme özellikleri ve motor boyutu koşulları altında, entegre cihazın vuru torkunun tepe değerinin orijinal BLDC motorun sadece %9'u olduğunu göstermiştir (Wu, Y., Lin, B.W. 2012).

Elektrik makinelerinde manyetik kuvvetler, yapı ve bağlı bileşenlerinde titreşimlere neden olur. Bu, toplam sistemde istenmeyen gürültü ve titreşime yol açar. Bu makale, örnek olarak kullanılan bir elektrikli tekerlek göbeği tahriki ile stator dişlerine etkiyen radyal kuvvetler nedeniyle bir motorun bağlantı noktasındaki alternatif kuvvet üretiminin açıklaması ve azaltılması ile ilgilidir. Bu değişken kuvvetler, sürücü üzerinde gürültü veya titreşim şeklinde rahatsız edici bir etkiye sahip olduğu bellidir. Bir literatür çalışmasında, deneyden elde edilen operasyonel bir titreşim analizi ile karşılaştırılan sistemin çoklu fiziksel bir simülasyonunu geliştirildi. Simülasyon, ana nedenin mahfazanın aksel asimetrik yapısı olduğunu göstermektedir. Böylece, aksel simetrik bir yapı kullanarak bağlantı noktasındaki alternatif kuvvetleri azaltıldı (Strez,D. et al 2017).

Hub Motor da fırçasız doğru akım makinesinin bir türü olduğundan kontrolünde aynı metodlar uygulanabilir. Literatür taraması yapıldığında bu konuda birçok çalışma yapılmıştır. Karthikeyan ve Dhana Sekaran yaptıkları çalışmayla farklı bir BLDC motor kontrol stratejisi geliştirmişlerdir. Bu kontrol biçiminin diğer kontrol biçimlerine göre bazı avantajları olduğunu görmüşlerdir. Bunlar, daha basit bir kontrol biçimi, faz akımlarını dengede tutabilme, bir DC bileşen vasıtasıyla akımın kontrol edilmesi ve bundan dolayı akımlardan ziyade fazın elimine edilmesidir. Onlara göre, bu yöntemle elde edilen karakteristikler, güç transistörleriyle bir akım kontrol stratejisi olarak bir üçgensel taşıyıcının kullanılmasına olanak

sağlarlar ki bu da, diğer biçimlere göre daha basit ve daha fazla yanlırsız bir sonuç sağlar. Bu kontrol biçimi diğer bilindik kontrol biçimleriyle mukayese edildiğinde, daha mükemmel modülasyon karakteristiklerine sahiptir (Karthikeyan, J. et al 2011).

Wu ve Tian yaptıkları çalışmada, sürekli mıknatıslı BLDC motorların çalışma prensibi ve Microchip Technology Inc.'ın geliştirdiği dsPIC30F4012 ile BLDC motorların dijital sinyal kontrolü tanıtıldıktan sonra, fanlar ve pompaların yük gereksinimlerine göre BLDC motorların dsPIC30F4012 kontrol çipi ile kontrol çözümleri önerilmiş; donanım devresi dizayn edilerek bu donanıma kaynak oluşturan yazılım programının bir bölümü verilmiştir. Oluşturulan devre donanımıyla ve kontrol programının yazılımıyla sistem hatalarından arındırılmış ve geliştirilmiştir. Sonuçta, geliştirilen sistem mükemmel bir kontrol performansı, güvenilirlik ve tüm üretim dizayn gereksinimlerinin üstesinden gelmiştir (Wu, Q., Tian, W. 2012).

Wang yaptığı çalışma ile, yüksek güçlü BLDC motorun kapalı çevrim kontrol sistemini dizayn etmişse de; daha ziyade IR2130 sürücü devresi, H köprüsü sürücü devresi, motor için dönüş yönetimi kontrolü ve hız algılama devresi dizaynını hedef seçmiştir. Bu amaçla, motor ayar parametreleri boyunca performansının iyileştirilmesi için güncel uygulama gereksinimleri, güvenilirlik ve kararlılık ilkeleri göz önünde tutularak çekirdek kontrol algoritması olarak PID (oransal-integral ve türev kontrol) kontrolü kullanılmıştır. Bu kontrol iyi bir performans sergilemiştir. Deneylerle görülmüştür ki, hem donanım hem de yazılım kontrol algoritması güvenilir ve kararlıdır. Sistemin

çalışma performansının motor hem yüklü, hem de yüksüz iken çok iyi olduğu tespit edilmiştir. Wang'a göre, BLDC motor için hız kontrolü çok önemlidir. Her çeşit kontrol gereksinimlerini karşılamak, BLDC'nin sayısal ve etkin bir kontrolünü gerçekleştirmek için en yaygın kontrol biçimleri: PID kontrolü, bulanık mantık kontrolü ve birleşik kontrol biçimleri olarak bulanık-sinir ağı, bulanık-genetik algoritma v.b. biçimleri kapsar. Bunlardan PID kontrolü günümüzde geniş uygulama alanlarında kullanılmaktadır (Wang, H. 2012).

Janpan, Chaisricharoen ve Boonyanant yaptıkları çalışmada, doğal mıknatıslı BLDC motorların çalışması esnasında bir taraftan da elektrik enerjisi üretimi yapabileceklerini düşünmüşlerdir. Bu amaçla üç stator sargısına sahip BLDC motorun her kontrol adımında iki sargısı kullanılarak manyetik alan dönüşü elde edilmiş; serbest olan diğer sargıda endüklenen bir zıt-emk ile ise elektrik enerjisi elde edilmiştir. Deney sonuçlarından da görülmüştür ki, BLDC motorun kombine biçimdeki kontrolü ile, motor yüksüz iken elde edilen çıkış voltajı, giriş voltajının %75'i civarında olmuştur (12 V girişten, yaklaşık 9 V çıkış elde edilmesi) ve bu çalışmalar daha da sürmektedir (Janpan, I. et al 2012).

Yapılmış ve yapılmakta olan çalışmalardan görüldüğü gibi, Hub motorlar ve hub motorların da bir türü olduğu BLDC motorlar zamanla geliştirilmiş ve daha da optimizasyon ve geliştirilmeye açık elektrik makine türüdür.

REFERANSLAR

- Rajashekara K. History of electric vehicles in General Motors. IEEE transactions on industry applications. 1994;30(4):897-904.
- Toliyat HA, Kliman GB. Handbook of electric motors: CRC press; 2018.
- Ağaçayak, A.C., (2020). Asenkron Motor Yapısı, Eş Değer Devre ve Parametrelerinin Belirlenmesindeki İlerlemeler. Mühendislik Alanında Akademik Çalışmalar, Gece Akademisi Publishing, Basım sayısı:1, 1-29, ISBN : 978-625-7938-96-9,pp. 1- 29.
- Terzioğlu, H., Ağaçayak, A. C., Yalçın, G., & Neşeli, S. (2019). Asenkron Motorun Çalışma Parametrelerinin SCADA ile İzlenmesinin Tasarımı. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 418-427.
- Terzioğlu H.,Ağaçayak A.C., Yalçın G.,Neşeli S., (2019). Alternatif Akım Ölçme ve Kaydetme Sistemi. 8thInternational Vocational Schools Symposium (UMYOS'xx19), 69-77. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Cilt:2, Sayı:8)
- Terzioğlu, H., Yalçın, G., & Kısa, M. (2019). Servomotorun SCADA ile Kontrolü. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 428-435.
- Yedamale P. Brushless DC (BLDC) motor fundamentals. Microchip Technology Inc. 2003;20(1):3-15.
- Yoldaş M., Terzioğlu H. (2020). Elektrikli Araçlarda Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Darbe Genlik Modülasyonu İle Kontrolü. Elektrikli Araçlara Genel Bir Bakış-2, iksad Publishing House, Basım sayısı:1, 3-30.ISBN: 978-625-7687-48-5, pp. 3- 30.
- Bayraktar HC. Fırçasız doğru akım motorlarının kontrolü. 2014:51.
- Hanselman DC. Brushless permanent magnet motor design: The Writers' Collective; 2003.
- Chau K, Zhang D, Jiang J, Liu C, Zhang Y. Design of a magnetic-g geared outer-rotor permanent-magnet brushless motor for electric vehicles. IEEE transactions on magnetics. 2007;43(6):2504-6.
- Tong W. Mechanical design of electric motors: CRC press; 2014.

- Wrobel R, Goss J, Mlot A, Mellor PH. Design considerations of a brushless open-slot radial-flux PM hub motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2013;50(3):1757-67.
- Gruber W, Bäck W, Amrhein W, editors. Design and implementation of a wheel hub motor for an electric scooter. 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference; 2011: IEEE.
- Borchardt N, Kasper R, Heinemann W, editors. Design of a wheel-hub motor with air gap winding and simultaneous utilization of all magnetic poles. 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference; 2012: IEEE.
- Gülgün T., Terzioğlu H., Neşeli S., (2020). Elektrikli Araçlarda Yapılan Çalışmaların Aerodinamiğe Etkileri. Elektrikli Araçlara Genel Bir Bakış-1, iksad Publishing House, Basım sayısı:1, 3-30. ISBN: 978-625-7687-47-8, pp. 3- 30.
- Kaya Y., Neşeli S., Ağaçayak A.C., (2020). Süspansiyon Sistemleri. Elektrikli Araçlara Genel Bir Bakış-1, iksad Publishing House, Basım sayısı:1, 47-66. ISBN: 978-625-7687-47-8, pp. 47- 66.
- Bozkır M., Yalçın G., Ağaçayak A.C., (2020). Elektrikli Araçlarda Direksiyon Sistemi. Elektrikli Araçlara Genel Bir Bakış-1, iksad Publishing House, Basım sayısı:1, 67-90. ISBN: 978-625-7687-47-8, pp. 67- 90.
- Sun X, Shi Z, Cai Y, Lei G, Guo Y, Zhu J. Driving-Cycle-Oriented Design Optimization of a Permanent Magnet Hub Motor Drive System for a Four-Wheel-Drive Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2020;6(3):1115-25.
- Lu D, Li J, Ouyang M, Gu J, editors. Research on hub motor control of four-wheel drive electric vehicle. 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference; 2011: IEEE.
- Jürgens J, Brune A, Ponick B, editors. Electromagnetic design and analysis of a salient-pole synchronous machine with tooth-coil windings for use as a wheel hub motor in an electric vehicle. 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM); 2014: IEEE.

- Sun Y, Li M, Liao C, editors. Analysis of wheel hub motor drive application in electric vehicles. MATEC Web of Conferences; 2017: EDP Sciences.
- Ji Y, Ren L, Zhou J. Boundary conditions of active steering control of independent rotating wheelset based on hub motor and wheel rotating speed difference feedback. Vehicle System Dynamics. 2018;56(12):1883-98.
- Duvigneau F, Perekopskiy S, Kasper R, Gabbert U, editors. Acoustic optimization of an electric wheel hub motor. 9th Aachen Acoustics Colloquium–AAC; 2017.
- Li Z, Liu C, Song X, Wang C. Vibration suppression of hub motor electric vehicle considering unbalanced magnetic pull. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2021:09544070211004507.
- Wang B, Wang RG, Cai QY, Sun HW, editors. Experimental research on regenerative braking of wheel-hub motor. Advanced Materials Research; 2012: Trans Tech Publ.
- Roumani K, Schmuelling B, editors. Electromagnetic design of central motor and in-wheel hub motor according to their voltage range. 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS); 2016: IEEE.
- Wanner D, Kreuzlein M, Augusto B, Drugge L, Stensson Trigell A. Single wheel hub motor failures and their impact on vehicle and driver behaviour. Vehicle System Dynamics. 2016;54(10):1345-61.
- Rajagopal K, Sathaiah C, editors. Computer aided design and FE analysis of a PM BLDG hub motor. 2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems; 2006: IEEE.
- Hoang N-T, Yan H-S. On the Design of In-Wheel-Hub Motor Transmission Systems with Six-Link Mechanisms for Electric Vehicles. Energies. 2018;11(11):2920.
- Fasil M, Plesner D, Walther JH, Mijatovic N, Holbøll J, Jensen BB. Numerical and Experimental Investigation of Heat Flow in Permanent Magnet Brushless DC Hub Motor. SAE International Journal of Alternative Powertrains. 2015;4(1):46-57.

- Rattankumar V, Gopinath N, editors. Solar powered car using Brushless DC hub motor with advanced PIC microcontoller. 2012 International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM); 2012: IEEE.
- Sun C, Bai L, Du X, Zhou Y, editors. A novel wheel hub motor based on U-shaped electromagnet working principle and torque characteristics. 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications; 2014: IEEE.
- Sun C, Bai L, Du X, Zhou Y. A Novel Wheel Hub Motor Based on U-Shaped Electromagnet.
- Şimşir M, Bayır R, Uyaroğlu Y. Real-time monitoring and fault diagnosis of a low power hub motor using feedforward neural network. Computational intelligence and neuroscience. 2016;2016.
- Suriyamoorthy S, Gupta S, Kumar DP, Subramanian SC, editors. Analysis of hub motor configuration and battery placement on ride comfort of electric trucks. 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC); 2019: IEEE.
- Ifedi CJ, Mecrow BC, Brockway ST, Boast GS, Atkinson GJ, Kostic-Perovic D. Fault-tolerant in-wheel motor topologies for high-performance electric vehicles. IEEE Transactions on Industry Applications. 2013;49(3):1249-57.
- Zhang C-n, Guo F-l, Dong Y-g, editors. Oil-water Composite Cooling Method of Hub Motor for Electric Vehicles. 2nd International Conference on Electrical and Electronic Engineering (EEE 2019); 2019: Atlantis Press.
- Kock A, Gröniger M, Mertens A, editors. Fault tolerant wheel hub drive with integrated converter for electric vehicle applications. 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference; 2012: IEEE.
- WANG D-z, CHEN S-y. Utility Program of Finite Element Method of Doubly Salient Electro-Magnetic Hub-Motor. Small & Special Electrical Machines. 2015:01.
- Luo Y, Tan D. Study on the dynamics of the in-wheel motor system. IEEE transactions on vehicular technology. 2012;61(8):3510-8.

- Cordopatri A, Cocorullo G, editors. A hub motors choice strategy for an electric four independent wheel drive vehicle. 2017 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive; 2017: IEEE.
- Rix AJ, Kamper MJ. Radial-flux permanent-magnet hub drives: A comparison based on stator and rotor topologies. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011;59(6):2475-83.
- Wu Y-C, Lin B-W. Integrated Design of a Brushless DC Motor with a Multi-Speed Bicycle Drive Hub. Advanced Science Letters. 2012;9(1):271-6.
- Stretz D, Nees D, Gauterin F, Kolb J, Kurch M. Influence of the symmetric structure of a wheel hub drive on the vibro-acoustic behaviour of electric vehicles due to magnetic forces. International Journal of Vehicle Noise and Vibration. 2017;13(2):164-86.
- KARTHIKEYAN, J., DHANA SEKARAN, R., [2011], “Current Control of Brushless DC Motor Based on a Common DC Signal for Space Operated Vehicles”, Electrical Power and Energy Systems 33 (2011) 1721-1727.
- WU, Q., TIAN W., [2012], “Design of Permanent Magnet Brushless DC Motor Control System Based on dsPIC30F4012”, Procedia Engineering 29 (2012) 4223-4227.
- WANG, H., [2012], “Design and Implementation of Brushless DC Motor Drive and Control System”, Procedia Engineering 29 (2012) 2219-2224.
- JANPAN, I. et al. [2012], “Control of the Brushless DC Motor in Combine Mode”, Procedia Engineering 32 (2012) 279-285.

BÖLÜM 3

TALAŞLI İMALAT VE İŞLENEBİLİRLİK

Arş. Gör. Rüstem BİNALİ*, Prof. Dr. Halil DEMİR**

*Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye. rustem.binali@selcuk.edu.tr. ORCID ID: 0000-0003-0775-3817

** Tobb Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri, Makine Pr., hdemir@karabuk.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-9802-083X

GİRİŞ

Talaşlı imalat, ürünlerin işlenmesi için yaygın bir biçimde kullanılan yöntemdir. Ham malzemelerin istenilen nihai ürüne ulaşabilmek ve bir ürünün son biçimini verebilmek, bunun yanı sıra malzemedan istenmeyen kısımların çıkarılması için kullanılan bir imalat yöntemidir. Talaşlı imalat yöntemleri, frezeleme, tornalama, delme, diş açma gibi işlemleri ihtiva etmektedir.

Talaşlı imalat işlemlerinde tornalama ve torna tezgahında diş açma işlemleri tek ağızlı kesici takımlar ile yapılmaktadır. Ancak delme ve frezeleme gibi işlemlerde kesici takımın kendi ekseninde dönmesiyle ve iş parçası malzemesinin ilerleme hareketiyle meydana gelen bir işlemdir. Bu işlemden kesici takımda birçok kesici ağız bulunmaktadır ve bu kesici kenarın her biri iş parçası malzemesinden bir miktar talaş kaldırabilme kapasitesi bulunmaktadır. Talaşlı imalat işlemleri ile verimlilik daha iyi, yüzey pürüzlülüğü, hassasiyet ve düzgün toleranslar dahilinde ürünlerin üretmesi daha avantajlıdır (Lee and Lin, 2000).

Talaşlı imalat işlemlerinde en önemli unsurlar ise işleme parametreleridir. Bunlar, kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliğidir. Bu parametrelerde yapılan değişiklikler hem işlem sırasında oluşan kesme kuvvetlerini hem de işlem sonra malzeme yüzeyinin pürüzlülük değerini etkilemektedir. İlerleme miktarı ve talaş derinliğinin artırılması ile kesme kuvveti değerlerinde de artış olmaktadır. Kesme hızının artması ile de kesme kuvveti değerleri de

azalmaktadır. Bu nedenle talaşlı imalat işlemlerinde işleme veya kesme parametrelerinin düzgün ve optimum değerlerinde seçilmesi önem arz etmektedir (Duran ve Acır, 2004). Yüzey pürüzlülük değerlerini iş parçası malzemesinin sünekliliği (parça sünekse daha pürüzlü bir yüzey meydana gelir, iş parçası malzemesinin sertliği arttıkça yüzey pürüzsüz bir şekilde ortaya çıkar), kesici takımın uç yarıçapı (uç yarıçapının artmasıyla oluşan yüzey daha pürüzsüz oluşur), ilerleme miktarı (ilerleme miktarındaki artış pürüzlülük değerlerinin artmasına sebebiyet verir), kesme hızı (kesme hızındaki azalış pürüzlülük değerlerinin artmasına sebep olur) ve takım tezgahının rijitliliği (tezgah rijit değil ise pürüzlülük artmaktadır) gibi etkenler yüzey pürüzlülük değerlerini etkilemektedir (Çiftçi, 2013; Yalçın, G. et al. 2016).

1. TALAŞLI İMALAT

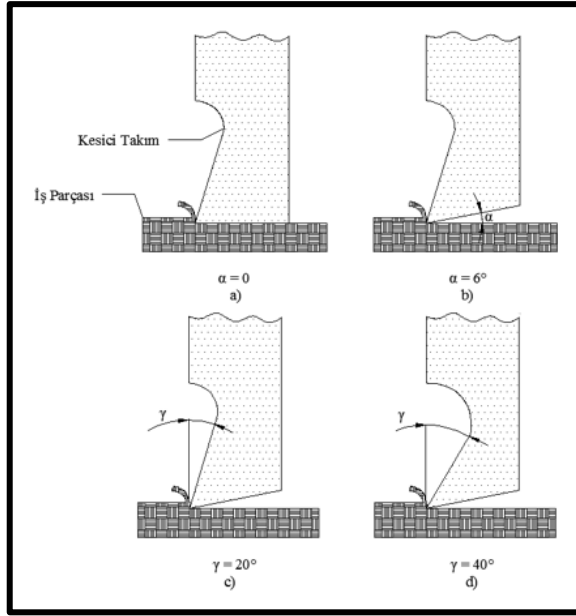
Ham madde halinde olan malzemelerin istenilen son haline getirilmesi için şekil vermek maskadıyla malzemelerin üzerinden malzemedan daha sert olan bir kesici takım vasıtasıyla talaş kaldırılması işlemi talaşlı imalat olarak ifade edilmektedir. Bu işlem kesici takımın kesme hızı, ilerleme miktarı ve tek bir paso da kaldırılan talaş miktarı (talaş derinliği) ile gerçekleşmektedir. Kesme hızı imalat işlemlerinde talaş kaldırma işlemini etkileyen esas parametredir, ilerleme miktarı iş parçası malzemesinin üzerinde işlem uzunluğu veya işleme genişliği boyunca belirlenen bir yerin işlenebilmesini gerçekleştiren harekettir. Kesme (talaş) derinliği ise malzeme eksenine veya yüzeyine dik malzemedan kaldırılan talaş kalınlığıdır (Şahin, 2003).

1.1. Talaşlı İmalat Sırasında Talaş Kaldırma ve Talaşın Oluşumu

Talaş kaldırma işlemi, malzemelerden belli boyut, biçim ve yüzey pürüzlülük kalitesine sahip ürünü oluşturmak maksadıyla keskin kesici ucu olan bir kesici takım ve kesme gücü uygulayarak, iş parçası malzemesinin üzerinden tedrici olarak katmanlar şeklinde malzemenin kaldırılması işlemidir. Fiziki olarak bu işlem, malzemenin plastik ve elastik biçim değişimine, sürtünme nedeniyle ısı oluşmasına, talaşın büzülmesine ve kırılmasına, iş parçası malzemesinin yüzeyinde sertleşme meydana gelmesine, takım ucu aşınması gibi durumların meydana geldiği karmaşık bir olaydır (Lin et al., 2001).

1.1.1. Talaş kaldırmayı Etkileyen Faktörler

Kesici Takımın Geometrisi: Kesici takım geometrisinin boşluk açısı (α), kama açısı (β), talaş açısı (γ) ve takımın uç yarıçap değeri (r) belirlemektedir. Şekil 1'de boşluk açısının değerlerine göre değişen takım durumları şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1. Takım açılarının durumları (Akkurt, 1998).

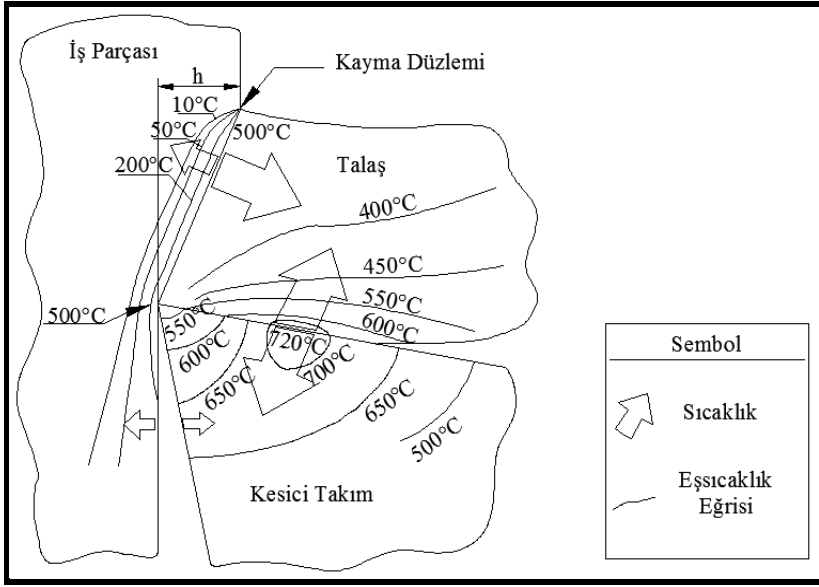
Kesici takım ile malzeme yüzeyi arasında oluşan sürtünmenin engellenmesi için boşluk açısı değeri ortalama olarak 6° olması gereklidir. Genel olarak α kesici takım ve iş parçasına bağlı olarak 3° ve 7° açılarında seçilmektedir (Mendi, 1996).

Şekil 1.c'deki gibi γ küçükse malzemenin işlenebilmesi zor olacağından, kesme kuvveti ve ısı oluşumu artar ve ayrıca kesici takımında aşınma mekanizmalarının oluşumu aşınmanın daha çabuk gerçekleşmesine neden olur.

Şekil 1.d'deki gibi γ büyükse takımın kesici uç inceliği daha fazla olacağı için malzemenin işlenmesi kolayca gerçekleşir. Takım kesici ucunun ince olması nedeniyle daha düşük kesme kuvvetleri işlem için yeterli düzeyde olacaktır ve bu durumda talaş daha kolay atılarak

yüksek kesme hızlarında işlem yapılabilir. Ancak takım kesici ucun inceliği oluşan kesme kuvvetlerine karşı mukavemeti azaltacağından takımın kırılma ihtimalini arttırır (Yeyen, 2006).

İşleme sırasında ısı oluşumu: İşleme sırasında malzeme yüzeyinden kaldırılan talaş sebebi ile oluşan ısı, malzeme yüzeyinden kaldırılan talaş için gerekli olan güçten, kesici takımla malzemedan kaldırılan talaş arasında oluşan sürtünmeden ve takımla iş parçası malzemesi yüzeyleri arasındaki sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Oluşan ısı miktarının bir kısmı, malzemedan kaldırılan talaş ile birlikte işlem alanının dışına atılır, kalan ısı miktarıysa kesici takım ve iş parçasının üzerine geçer. İş parçası ve kesici takım üzerine geçen ısı ile birlikte sıcaklık miktarında artış olur ve kesici takımda aşınma oluşmasına neden verir. Bu durumda kesici takım ömründe azalmaya neden olur. İşlem sırasındaki ısı oluşumu şematik olarak Şekil 2’de verilmiştir (Yontar, 2011).



Şekil 2. İşleme esnasında ısının oluşumu (Yontar, 2011).

Kesici takım ömrü: Talaşlı imalat işlemlerinde önem arz eden etkenlerden biri de takım ömrüdür. Kesici takımın ömrü, takım ve malzeme, kesme parametrelerine ve takım tezgahının durumuna bağlıdır. Talaş kaldırma işlemleri sırasında meydana gelen sürtünmeler ve sıcaklıktaki artıştan dolayı kesici takımda aşınma meydana gelir. Oluşan sürtünme kesici takımdaki aşınma mekanizmalarının ve tiplerinin en önemli sebebidir. Artış gösteren sıcaklık ise kesici takım dayanımını azaltması nedeniyle aşınmanın meydana gelmesini hızlandıran faktördür (Yontar, 2011).

Takım aşınmasının oluşumu, takım ve malzeme, kesici takım ve işlem sırasında malzemeden atılan talaşın geometrisi, kesme hızı ve kesme ortamları (kuru veya soğutma sıvısının kullanılması) vb. faktörlere

bağlıdır. Kesici takım ömrü de aşınmaya bağlıdır. Bu nedenle aşınmayı etkileyen faktörler kesici takım ömrü içinde geçerlidir. Takım ömrüne etki eden işleme parametrelerinden en önemlisi ise kesme hızı parametresidir. Taylor tarafından yapılan çalışmalar doğrultusunda takım ömrünün (T) ve kesme hızının (v) arasında bir ilişki bulunmaktadır ve bu ilişkiye bağlı olarak “Taylor takım ömrü modeli” olarak bilinen,

$$v = C_t / T^n \quad (1.1)$$

eşitlik sağlanmıştır. Denklem 1.1’de yer alan takım ömrü (T) dk, kesme hızı (V) mm/dk, kesici takım ve malzemeye göre değişim gösteren sabit (n) ve C_t ise taylor sabitidir (Yeyen, 2006).

Kesme hızı (v): Kesme hızı, talaş kaldırma sırasında işleme yönüne doğru hızla ilerlemesidir. Sıcaklığa etki eden faktörlerin arasında olması nedeniyle talaş kaldırma sırasında optimum kesme hızının, takım ömrünün ve talaş kaldırma miktarının dengelenebilmesi için düzgün bir şekilde seçilmelidir (Yaşar, 2011).

Kesme derinliği (a) ve ilerleme miktarı (f): Talaş kaldırmada diğer etkenler kesme derinliği ve ilerleme miktarıdır. Bu etkenlerden birinin değişmesi halinde malzemedan kaldırılan talaş miktarını değiştirmektedir. Ayrıca bu etkenlerdeki yapılan her bir değişiklik, kesici takım ömründe de değişime sebep olmaktadır (Sürücü, 2010).

Uygun talaş kaldırma işlemlerinin yapılabilmesi için uygulanabilecek maksimum kesme derinliği ve minimum ilerleme miktarı seçilmelidir. Bunun sebebiyse seçilen kesme hızına göre takım ömrünün

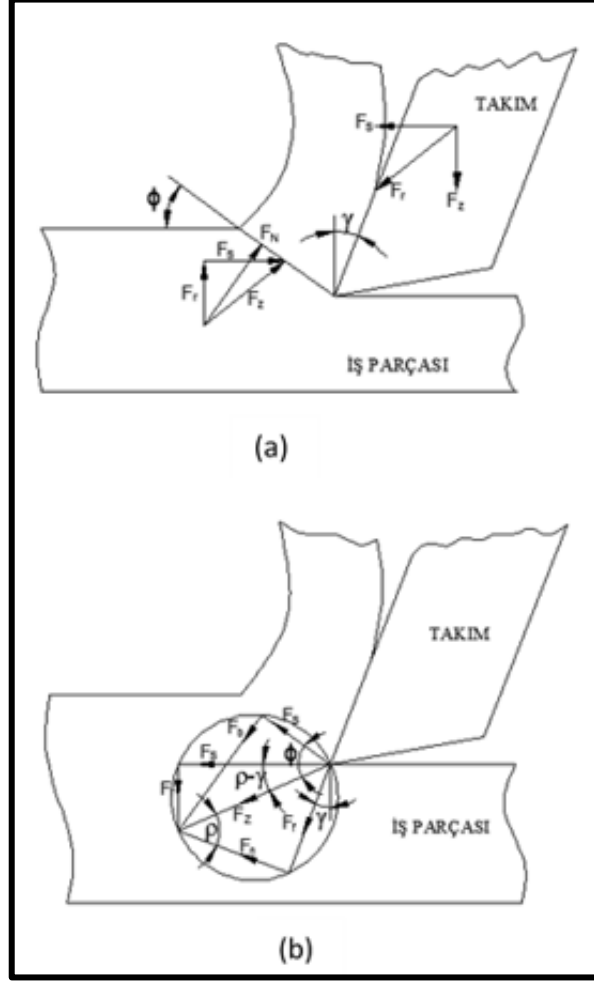
değişmesinde kesme derinliğinin minimum düzeyde etkili parametre olmasıdır. Optimum ilerleme miktarı, takım ömrünü ve kaldırılan talaş miktarını da dengelemelidir (Şahin, 1999).

Kesme kuvvetleri: Talaş kaldırma işleminin gerçekleşebilmesi için takıma, kesme düzlemindeki dirençlere karşı, talaş kaldırma kuvveti (F_z) uygulanmaktadır (Şekil 3a). Kesme düzleminde bulunan kuvvetler, takımla talaş ve kesici takımla malzeme arasındaki sürtünmeden kaynaklanan kuvvetlerden oluşmaktadır. Düzlem boyunca yayılmış durumda olan kuvvetler, kesme düzlemi ortasında (Şekil 1.3.a) veya Merchant hipotezine göre kesici takımın ucuna (Şekil 1.3.b) uygulanan tek kuvvet ile gösterilebilir. Böylece, takım ucuna uygulanan talaş kaldırma kuvvetine F_z denirse, bu kuvvetin denklem 1.2’de belirtilen bileşenlerden meydana geldiği düşünülebilir. Kesme yönüne doğru kesme kuvveti (F_s) ve bu yöne dik yönde oluşan radyal kuvvet (F_t), kesme düzleminde kesme kuvveti (F_k) ve bu yöne dik yönde sürtünme kuvveti (F_f), basma kuvveti (F_b) ve bu kuvveti meydana getiren normal kuvvet F_n ile F_z ’nin arasındaki ρ açısı sürtünmenin açısıdır, sürtünme katsayısını μ ile ifade edersek,

$$\mu = F_t / F_n = \tan \rho ; \quad \rho = \arctan \mu \quad (1.2)$$

dır. Denklem 1.2’de açıklanan kuvvetlerin arasından pratik bakımdan en önemlileri kesme kuvveti F_s ve radyal kuvvet F_r ’dir. Şekil 3’teki gibi kesme düzleminde, kesmeye karşı direnç kuvvetinin yanında kesici takımı malzemedan ayırmaya çalışan radyal bir direnç oluşmaktadır. Bu sebeple kesici takımı malzemenin üzerinde

tutabilmek için takıma radyal bir kuvvet uygulanmalıdır, bu durum takımın tutturma aparatına bağlanması ile sağlanabilir (Akkurt, 1998).



Şekil 3. Kesme kuvvetleri (Akkurt, 1998).

Kesme kesiti ve kesme kuvveti τ_k iş parçasının kesme mukavemeti olmak üzere,

$$F_k = A_k \tau_k \quad ; \quad A_k = hb / \sin \phi \quad (1.3)$$

denklemleriyle ifade edilir ise, Şekil 3.b'den kesme ve radyal kuvvetleri

$$F_s = hb\tau_k \frac{\cos(\rho - \gamma)}{\sin\phi \cos(\phi + \rho - \gamma)} \quad (1.4)$$

$$F_t = hb\tau_k \frac{\sin(\rho - \gamma)}{\sin\phi \cos(\phi + \rho - \gamma)} \quad (1.5)$$

olarak elde edilir.

Denklem 1.4 ve 1.5'e dayanarak, malzemenin en düşük kesme gücü ile talaş kaldırılması için ϕ -kesme açısının optimum (ϕ_0) değeri bulunur. Bu durumda;

$$\frac{dF_s}{d\phi} = 0 \text{ dan } \phi_0 = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2}(\rho - \gamma) \quad (1.6)$$

bulunur. 2.6 denklemleriyle F_s ve F_t kuvvetleri,

$$F_s = hb\tau_k = \frac{2}{\tan\phi_0}; \quad F_t = hb\tau_k \left[\frac{1}{\tan^2\phi_0} - 1 \right] \quad (1.7)$$

şeklinde yazılır.

Yukarıdaki denklemlerden görüldüğü üzere, talaş kaldırılmasında gereklilik arz eden harcanan güç için önemli olan F_s kuvveti; iş parçasının kopma mukavemetine (τ_k), talaşın boyutlarına (b, h) talaş açısına (γ), kesme açısına (ϕ) ve sürtünmenin olduğu açığa bağlıdır. Kesme açısının ideal kesme açısı olması durumunda (denklem 1.7), belirli bir malzeme ve talaş boyutları için minimum seviyede kesme kuvveti ve gücünün elde edilmesi sağlanır (Akkurt, 1998).

2. İŞLENEBİLİRLİK ve YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

2.1. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik araştırmaları aslında ürünlerin kalitesinin en iyi olması ve en düşük işleme maliyetlerinin oluşmasını sağlayan ideal kesme koşulları için işlenecek malzemeyle kesici takım etkileşimlerinin incelenmesidir. İşlenebilirlik, malzemelerin takımlama ve işleme süreçleri yönünden tasarlanan şekilde (yüzey toleransı ve kalitesi) kolayca işlenebilmesini tanımlamak amacıyla kullanılan bir tabirdir (Neşeli S., et al 2019). Bir işleme sürecinde işlenebilirliği ölçebilmek için talaş şekillerinin yanı sıra kesici takım ömrü, kaldırılan talaş miktarının oranı, meydana gelen kesme kuvvetinin bileşenleri, güç tüketimi ve işlenmiş malzemelerin yüzey kalitesini ve yüzey bütünlüğünü kullanılabilmektedir. İşlenebilirlik, seçimi yapılan kesme parametreleri, kesici takım geometrisi ve özellikleri, iş parçası malzemesinin özellikleri ile işleme koşulları, takım tezgahının rijit olup olmadığı gibi faktörlerden önemli düzeyde etkilenebilmektedir. İşlem verimliliği, işlenen malzemelerin ölçüsel toleranslar içerisinde ve bütünlüğünü bozmadan yüksek hızda işlenebilmesini sağlayacak bir kesici takım, kesme koşulları ve takım tezgâhı bileşenlerinin doğru seçilmesi ile önemli düzeyde iyileştirilebilir (Ezugwu, 2005).

İşlenebilirlik, talaşlı imalatla şekillendirilmek üzere seçimi yapılan malzeme özelliklerinin (mekanik ve kimyasal), seçilen talaşlı imalat metodundaki kesme parametrelerine bağlı olarak, malzeme ve talaşlı imalat yöntemi değişkenlerinin tek tek ve bir bütün olarak gösterdikleri davranışlardır. İşlenebilirlik terimi, iş parçasının bir

özelliği gibi olarak idrak edilse de sadece işlenen iş parçasına bağlı değil aynı zamanda işleme metodu ve kesme parametrelerine de bağlıdır (DeGarmo et al., 1997).

2.1.1. İşlenebilirliği Etkileyen Faktörler

İşlenebilirliği malzemeye ısıtma işleminin uygulanıp uygulanmadığını, malzemenin mikro yapısı, alaşım elementleri ve mekanik özellikler gibi faktörler etkilemektedir.

Isıl işlem ve mikro yapı etkisi: Malzemelerin işlenebilirlikleri, mikro yapısı ile alakalı olup, malzeme yapısının içinde bulunan sert parçacıklar kesici takım ömrünü düşürürken, malzeme yapısının içindeki kristallerin büyümesi ile kesici takımın ömrü de artmaktadır. Temel anlamda çeliklerin işlenebilirlikleri, çeliklere ilave edilen alaşım elementlerin yanı sıra çeşitli ısıl işlemler vasıtasıyla kontrolü sağlanan malzemelerin mikro yapısına bağlı olarak değişim göstermektedir. Birçok alaşımlı ve yüksek karbonlu çelik malzemelerinde talaşlı imalat için ideal mikro yapının sağlanması amacıyla çeşitli ısıl işlem uygulamaları yapılmaktadır.

Çeliklerin içinde bulunan karbona bağlı olarak işlenebilirlik için optimum mikro yapı oluşumunu sağlayan ısıl işlemler, aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Düşük karbona ($\leq 0,15C$) sahip çelikler soğuk çekilmiş ya da normalleştirilmiş durumda en iyi işlenebilirlik özelliklerine sahiptir. Küçük ferritik tanecik yapısına sahip ve soğuk çekme

yoluyla sertliğinde artış sağlanan çeliğin işlenebilirliği iyileşme eğilimindedir.

- Yumuşak çelik malzemeleri (%0,15 C-0,45 C) normalleştirme ya da tam tavlama sonucunda maksimum işlenebilirlik özelliklerini göstermektedir. Bu işlemler ile çeliğin içerisinde lamelli perlitik yapı oluşturulur. Bunun yanı sıra küreselleştirilmiş yapı zayıf kesme özelliğini vermektedir.
- Orta karbonlu (%0,45 C-0,80 C) çelik malzemelerden en iyi işlenebilirliğin elde edilebilmesi için çeliklere düşük sertlik özelliği ekleyen küreselleştirilmiş ve kaba perlitik karbür yapının olması gereklidir.
- Yüksek karbonlu (>%0,85C) çelik malzemeler, tamamen küreselleştirilmiş mikro yapıda ise sertleşebilirlik özelliği de en iyi seviyededir.
- Kaba görünüme sahip yapılar ise kötü bitirme yüzeylerini meydana getirerek kesici takım ömrünün kısa olmasına neden olur.
- Küçük östenitik tane boyutuna sahip çelik işlenmesi esnasında daha fazla gücü absorbe etmektedir. Fakat ince taneye sahip çelikler bitirme işlemlerinde iyi yüzey kalitesini gösterir (Elieyioğlu, 2005; Binali, R. et al. 2020;2021).

Alaşım elementlerinin etkisi: Çeliğin sertliğini arttırmaya yarayan esas element karbon (C) elementidir. C miktarındaki değişim işlenebilirlik özelliğinin de değişmesine sebep olmaktadır. Ötektoid altı çeliklerde sementit (Fe_3C) çeliğinin sünekliliğinde de azalma meydana gelmektedir. Sertliğin artırılması ile süneklilikte oluşan azalmaya karşın işlenebilirlikte iyileşme meydana gelir. Yumuşak çeliklerdeki düşük işlenebilirlik özelliği talaş kaldırma esnasında önemli bir deformasyona müsaade eden metalin sünek olmasından kaynaklanmaktadır. Bu deformasyon için aşırı güç tüketimi gerektiği için önemli miktarda ısı meydana gelir.

Alaşım elementlerinin kesici takımın ömründeki etkileri farklıdır. Karbon miktarındaki azalma işlenebilme özelliğini düşürmektedir. Bunun nedeni süreklilik arttığında malzeme, takımın ucuna yapışarak kesici takımın aşınmasını hızlandırmaktadır. Ayrıca karbon oranının artması iş parçası malzemesi sertliğini arttırdığından dolayı kesici takımdaki aşınma mekanizmaları oluşumu da hızlanmaktadır.

Mekanik özelliklerin etkisi: Malzemelerde genelde kopma ve sertlik dayanımlarının arasında ilişki yoktur. Ancak bir malzemenin sertlik ve kopma dayanımının artması, işlenebilirlik özelliğini azalmaktadır (Elieyioğlu, 2005).

SONUÇ

Genel anlamda talaşlı imalat ve işlenebilirlik işlemlerini özetleyecek olursak, talaşlı imalat, endüstride en yaygın kullanılan işlemlerin başında gelmektedir. İmalat işlemlerinde takım ve iş parçası, takım

tezgahının gücü ve rijitliliği, kesme koşulları (kesme sıvılı veya kuru şartlar), işlem sırasında kullanılan kesme parametreleri istenilen ürün/ürünlerin oluşturulmasında etkili faktörlerdir. Bu faktörler işlem öncesinde, işlem sonrasında oluşabilecek ihtimaller dikkate alınarak optimum düzeyde belirlenmelidir.

REFERANSLAR

- Akkurt M. (1998). Talas Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgâhları”, Birsen Yayın Evi, İstanbul, 57-61.
- Binali Rüstem,Ulaş Hasan Basri,Demir Halil (2018). Toolox 44 Malzemesinde Talas Kaldırma Miktarının Yüzey Pürüzlülüğü ve Takım Aşınması Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Technological Applied Sciences, 13(1), 19-28. (Yayın No: 4418698)
- Binali Rüstem, Demir Halil, Neşeli Süleyman, Yıldız Süleyman (2020). An Investigation of Factors Affecting Machinability of Milling Toolox 44 Hot Work Tool Steel by Taguchi Method . International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'20), 317- 321. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:6864833)
- Binali Rüstem, Yıldız Süleyman, Neşeli Süleyman (2021). Optimization of Machinability Parameters of S960QL Structural Steel by Finite Elements and Taguchi Method. International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'21) (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:7301857)
- Binali, R., Yıldız, S. & Neşeli, S. (2021). S960QL Yapı Çeliğinin İşlenebilirliğinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (31)
- Çiftçi, İ. (2013). Talaşlı imalat ders notları, Teknoloji Fakültesi imalat Mühendisliği, Karabük.
- DeGarmo, E.P., Black, J.T. and Kohser, R.A. (1997). Materials and Processes in Manufacturing, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 214-652.
- Duran, A. ve Acır, A. (2004). HSS torna kalemindeki talaş açısının kesme kuvvetlerine etkisi, Politeknik Dergisi, 7: 3, 211-215.
- Elieyioğlu, S. (2005). Çeliklerin ısı işlem altında gösterdiği yapısal değişikliklerin taramalı elektron mikroskobu (sem) ve mössbauer spektroskopisi ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 18-20.

- Ezugwu, E. O. (2005). Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45 (12-13): 1353-1367.
- Lee, T. S. and Lin, Y.J. (2000). *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 16, 773–783.
- Lin, W.S., Lee, B.Y., Wu, C.L. (2001). Modeling the surface roughness and cutting force for turning, *Journal of Materials Processing Technology*, 108: 286-293.
- Mendi F. (1996). *Takım Tezgâhları Teori ve Hesapları*, TDFD Ltd. Sti Yayınları, Ankara, 53-55.
- Neşeli S.,Yalçın G.,Terzioğlu H.,Ağaçayak A.C. (2019). Nano Yüzey Kalitesi Oluşturmak İçin Lepleme Makinesi Tasarımı. V Science Technology and Innovation Congress, 374-380. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5601104)
- Şahin, Y. (2003). *Talaş Kaldırma Prensipleri I*, Gazi Kitabevi, Ankara.
- Yalçın G.,Neşeli S.,Terzioğlu H.,Ağaçayak A.C. (2018). Fatigue Tester Design and Frame Analysis for Estimation of Fatigue Life of Helical Compression Springs. *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'18)*, 563-566. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4509752)
- Yalçın G.,Neşeli S.,Terzioğlu H.,Ağaçayak A.C. (2019). Design and Construction of Compact CNC Router. *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'19)*, 1(3), 474-478. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5642081)
- Yalçın G.,Sağlam H.,Terzioğlu H. (2016). Designing of Hydraulic Actuated and PLC Controlled Thread Fatigue and Tensile Testing Machine. *2nd International Conference On Science, Ecology and Technology (ICONSETE'xx2016)* (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3147353)
- Yalçın G., Neşeli S., (2020), “Pnömatik Sistemlere Giriş, Enerji Araştırmaları, Kitap, Bölüm 2, Sayfa 29-52, ISBN: 978-625-7897-46-4

- Yeyen H. E. (2006). AISI 303 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin İşlenebilirliğinin Deneysel Olarak Araştırılması Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi, Ankara, 13.
- Yontar A. A. (2011). AISI 304 Paslanmaz Çeliklerin İşlenebilirliğinin İncelenmesi”, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 16.

BÖLÜM 4

2kW 72V DIŞ ROTORLU HUB MOTOR TASARIMI

Seyidkhadija Mirjafarli*, Dr. Öğr. Üyesi Hakan TERZİOĞLU**,
Öğr. Gör. Gökhan YALÇIN***

* Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği,
khadice.jafarli@mail.ru

** Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği,
hterzioglu@selcuk.edu.tr, ORCID NO: 0000-0001-5928- 8457

***Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine Ve Metal
Teknolojileri Bölümü, gyalcin@ktun.edu.tr, ORCID NO: 0000-0003-4491-0228

GİRİŞ

Geçmişten günümüze doğru otomobillerin kullanım alanları ve sıklıkları giderek artmış, hayatımızın önemli bir parçası halini almıştır. Yaygın olarak pek çok ülke hala fosil yakıtlarla çalışan araçları kullanıyor olsa da, bu yakıtların yenilenemez enerji kaynağı olarak tanımlanmasından dolayı tükenecek olması ve çevre kirliliğinin her geçen gün artmasından dolayı otomobillerde yakıt için yeni arayışlara yol açmıştır.

Otomobillerin sahip olduğu dış yüzeylerindeki direnç, yola tutunma sistemleri ve aerodinamik özellikler; sürüş sırasındaki hissedilen konfor, gürültü seviyesi, araç dinamiği ve harcanan yakıt gibi birçok parametreye etkisi bulunmaktadır (Gülgün, T. et al. 2020; Neşeli, S. et al. 2019). Bir diğer etken ise aracı yola tekerlekleriyle bağlayan süspansiyon sistemleri ve özellikle ön kontrol sistemleridir (Kaya, Y. et al. 2020; Bozkır, M. et al. 2020).

Günümüzde elektrikli araçların menzil sorununu çözmek için yapılan çalışmalar devam etmektedir. Ayrıca özellikle batarya teknolojisinde yaşanan gelişmeler elektrikli araç sektörünü tekrardan canlandırmıştır. Bataryaların depolama kapasitelerinin artırılması, ağırlıklarının azaltılmasıyla elektrikli araçlar otomotiv sektöründe yeniden hâkimiyet kurmaya başlamışlardır (Ataner, E. et al. 2020). Özellikle araçların ağ sistemleri üzerinden takip edilmesi şarj durum analizi yapılarak şarj ihtiyacı olan araçlara öncelik verilmesi gibi çalışmalar hızla devam etmektedir (Özdeş, B. et al. 2020).

Tüm elektrik motorları yapısal ve çalışma mantığı olarak benzerlikler buldukları için elektrikli araçlardan kullanılan elektrik motorları da parametre değişimleri ve sürme sistemlerinde yaşanan zorluklarla karşılaşılması muhtemeldir. Bu yüzden motor parametrelerin motorların çalışması esnasında anlık değişimleri ve motor sürme yöntemleri araştırmalarda hala güncelliğini korumaktadır (Ağaçayak, A.C. 2020; Terzioğlu, H. et al. 2019; Terzioğlu, H. et al. 2019). Bilindiği üzere, Alternatif Yakıtlı Araçlarının(AFV) bir türü olan Elektrikli Araçların sürülme ve çalışma sistemlerinin tasarlanması sürecinde referans olarak AFV'ler alınabilir. Genel olarak, Alternatif Yakıt Araçlarının sürülme sistemi, 4 temel yapıdan oluşur; Enerji Depolama Sistemi, Elektronik Kontrol Sistemleri (yazılımsal ve donanımsal denetleyiciler),Güç Dönüştürücüleri, Motor(Bayraktar, H. 2014). Bu yazıda, bu 4 temel parçadan biri olan motor tasarımı verilmiştir. Tasarlanan Motor türü Fırçasız doğru akım hub motordur. Makalede 2kw 72V sayısal değerlerde, kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım hub motor tasarlanmış, analiz ve hesaplamaları verilmiştir.

1. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTOR TÜRLERİ VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Fırçasız doğru akım motorları (BLDC Motors) sahip oldukları basit yapı ve avantajlardan dolayı çok tercih edilir. Avantajlarına başlıca olarak; yüksek verim, güvenilir çalışma ortamı, daha az bakım, sessiz çalışma, kolay soğutma ve fırçasız yapısından dolayı uzun ömürlü olması şeklinde belirtilebilir. Tabii bu avantajların yanı sıra karmaşık kontrol yapısına sahip olması, pahalı bir sistem olması, rotor

pozisyonunu algılayabilmesi için pozisyon sensörlerine veya karmaşık tekniklere ihtiyaç duyması gibi dezavantajlara da sahiptir (Bayraktar, H. 2014; Kudelina, K. Et al. 2020). Bu bahsedilen avantajlar dezavantajlarından daha çok faydalı olduğundan ve dezavantajlar teknik olarak çözülebilir kriterler olduğundan bu motor türü hayatın birçok alanında kullanılmaktadır. Bir fırçasız doğru akım motoru duran bölüm olan üç faz sargılı stator, mıknatısların sabitlendiği dönen kısım rotor, geri besleme üniteleri, evirici ve sürücü katmanı ile denetleyici yapılardan oluşur. Rotor konumu algılayıcılarla belirlenir ki, genelde Hall sensör veya optik sensörler kullanılır(Bayraktar, H. 2014; Scarpion, M. 2015).

Aslında fırçasız doğru akım motorları da bir senkron elektrik makinası türüdür. Hub motorun stator sargıları, akım kaynağından beslenen invertör üzerinden beslenir. Rotorun konumu ile senkronize bir şekilde, invertördeki güç anahtarları sırayla anahtarlama yapar. Rotora yerleştirilmiş konum algılayıcı sensör ile rotorun konum bilgileri göz önünde bulundurularak hangi güç anahtarının açılıp kapanması gerektiği ve stator sargılarındaki akımın yönü belirleniyor. Rotorun dönme hareketi statordaki akım ve gerilimin değişmesiyle, bu da güç anahtarlarının kontrol edilmesiyle sağlanır. Böylece stator sargılarında manyetik alan kutupları oluşturulmuş olur. Kısacası, motorun çalışma prensibi elektronik komütasyona dayanır. Rotorla birlikte hareket eden kutbun altındaki iletkenlerdeki akımın yönü, iletken bir kutbun altından diğer kutbun altına doğru hareket etmesiyle yön değişikliğine uğrar. Bobin iletkenlerinden geçen akımın bu tür yön değiştirmesi

komütasyondur (Scarpion, M. 2015; Yedamale,P. 2003).

Fırçasız DA motorları yapılarından dolayı üç sınıfa ayrılır: Dış rotorlu, disk tipi, iç rotorlu.

Disk tipi Blde Hub Motorlarda çelikten yapılan ve iki yüzeyinden birine mıknatıs yerleştirilen bir disk rotoruna ve rotor mıknatıslarına karşılık olarak stator da uyarma sargıları mevcuttur. Düşük hız uygulamalarında, kapalı çevrim kontrolü ve hız geri beslemesine sahip bir sistem kullanılarak uygun bir performans elde edilebilir. Lakin yapısındaki rotor ve stator disk çeliklerinde ısınma sorunu baş göstermektedir ki, bu da kullanıldığı hız değerleri 1000 rpm üzerine çıkarsa olur. Kullanılacağı uygulamada açısız hızın 1000 rpm üzerinde olması gerekiyorsa, ısınma sorununun önüne geçmek için bazı tedbirle görülmeli ve güncellemeler yapılmalıdır ki, bu da ek maliyetlere neden olacaktır. Motorun istenmeden ısınması güç kayıplarına, mıknatıslanmanın azalmasına ve verimin düşmesine neden olması bu durumun göz ardı edilmemesi sonucuna vardırır bizi. Böylece motorda belirli mekanik ölçülerin değişmesi, daha güçlü mıknatısların kullanılması ve buna benzer birçok çözüm yolları vardır ki, bunlardan biri de farklı tip Hub motor kullanmaktır(Bayraktar, H. 2014;Wang, X. 2016; Ainslie, M.D. 2014).

1.1.Dış Rotorlu Hub Motorlar

Dış Rotorlu Hub Motorlarda isminden de görüldüğü gibi mıknatısların yerleştirildiği döner kısım stator sargısının dışında olur. İç kısımda bulunan stator endüvi sargıları, dış kısımda ise daimi

mıknatısların bulunduğu rotor dönmektedir. Fırçalı bir DC motorla, stator ve rotorun yapısı örtüşmektedir. Bu tipte, mıknatıslar rotora gömülü bir vaziyette yerleştirilir. Bu tür elektrik motorunun tasarım ve üretiminde dikkat edilmesi gereken birkaç faktör vardır. Rotorun dışta olup yüksek bir kütleyle sahip olduğunda, mıknatısların rotora yerleştirilmesi esnasında bir denge sorunu oluşturabilir. Bu sorunun karşısını almak için, üretim zamanı birincisi bu tip motorlarda, diğer çeşitlerin aksine tek rulman ve yatak kullanımı söz konusudur. Diğer nokta, rotorun dışta olması mıknatıs alanını büyütmede ve bu nedenle aynı manyetik alan etkisi daha ucuz mıknatıslarla elde edilebilmektedir. Böylece maliyet açısından kıyaslandığında daha ucuzdur. Yüksek eylemsizliğe sahip olmaları nedeniyle, mevcut hız değerlerini, yüklerinin ani değişimi durumlarında muhafaza ederler ki, bu özelliklerinden dolayı birçok uygulama alanına sahiptirler. Diğer bir sorun ise bobin sargılarının merkezde olması nedeniyle motorun soğutulma işlemini güçleştirmesidir. Termal analizlerde bu faktör kesinlikle dikkate alınmalı ve gereken soğutma metodu seçilmelidir. Uçan araçlarda, bu tip motorların hızlarının daha düşük, torklarının ise yüksek değerde olmaları nedeniyle tercih edilmektedir(Bayraktar, H. 2014;Hanselman, D.C. 2003).

1.2.İç Rotorlu Hub Motorlar

İç Rotorlu Hub Motorlar yapı olarak asenkron ve senkron elektrik motorlarına daha çok benzemektedir. Dıştaki statorda, endüvi sargıları bulunmakta, iç tarafa yerleştirilen mıknatıslar ise yüzey mıknatıslı, kanal mıknatıslı veya gömülü mıknatıslı olacak şekilde

yerleştirilebilir. Dış rotorlu hub motorla kıyasladığımızda yüksek hızlara çıkıldığında rotordaki mıknatısların stabilizasyon sıkıntısı ve statorun sarımı, daha zor ve maliyetli olması gibi dezavantajları vardır. Lakin, dış rotorlu motorlara göre sargının dışarıda olması bu tip motorların daha kolay soğumasını sağlar. Hızları, dış rotorlu motorlara nazaran daha yüksek, volt başına tork üretimi ise daha düşüktür.

Hub motorları tasarlamak için ilk adım bağımlı ve bağımsız değişkenlerin bulunmasına yöneliktir(Bayraktar, H. 2014;Hanselman, D.C. 2003).

2.TASARIM

Teorik olan bu bilgilerin ışığında, proje de göz önünde bulundurularak Elektrik motorunun tasarımı yapılır. Lakin Tasarıma başlamadan bazı önemli terimlerin bilinmesi gerekiyor.

2.1. Önemli Kriterler ve Terimler

Tork- motorda hareket eden parçalara iletilen itme kuvveti ya da dönme kuvvetidir. Vuruntu momenti ve hizalama momenti gibi iki türü vardır.

1.Vuruntu momenti(Cogging Torque) Hub motor gibi sabit mıknatıslı motorlarda yüksüz koşullardaki momentidir ve rotorun kendi etrafında dönüşü sırasında, rotor mıknatıslarını çevreleyen manyetik iletkenliğin değişiminden kaynaklanır. Karşısı alınmazsa motor miline yayılıp

gereksiz titreşime ve akustik gürültüye neden olur. Manyeto statik etkidir. Bu tork konuma bağlıdır ve dönüş başına periyodikliği manyetik kutupların sayısına ve stator üzerindeki diş sayısına bağlıdır. Bu nedenden dolayıdır ki, vurutu momentini azaltmak için; stator oluklarına ya da mıknatlara eğim verilmesi, mıknatlara özel şekiller verilmesi yada kaydırılması, yardımcı olukların yada dişlerin kullanılması gibi teknikler uygulanabilir (Hanselman, D.C. 2003; Tong, W. 2014).

2.Hizalama momenti(Alignment/repulsion torque)- Eğer bobinlere akım uygulanırsa kutuplar elektromıknatıs haline gelir. Bu durumda, mıknatıs ve ters kutuplu elektromıknatıs oluk hizalama torkunu oluşturur. Bu tork motorun çalışmasını ve iş yapmasını sağlar. Motorda üretilen bu torkun güç hesaplamalarının yapılmasında ve motor hızının belirlenmesinde önemli rolü vardır(Hanselman, D.C. 2003;Tong, W. 2014).

Hub motorları tasarlamak için ilk adım değişkenlerin bulunmasına yöneliktir. Değişkenler bağımlı ve bağımsız olarak iki kategoride verilebilir:

Bağımsız değişkenler - motor boyutları, sarım teli, mıknatıs malzemesi...

Bağımlı değişkenler - tork, akım, verim, sıcaklık artışı(veya sıcaklığın değişme aralığı)...

Birçok bağımsız değişken tekrarlanan hesaplamalar ve analiz

gerektirir ve bu proses istenen performans elde edilene kadar devam edilir. Analizler Ansys, Matlab gibi analiz programlarından yapılabilir.

2.2. Kararlar ve Parametreler

Motor tasarlamaya başlamadan önce verilmesi gereken bazı kararlar ve belirlenmesi gereken belirli parametreler vardır ki, bunlar hangi elektrik motorunun kullanılacağı, kullanılması düşünülen farklı manyetik malzemeler, motorla dışarıdan kurulacak iletişim yöntemi, rotor türü, kullanılacak mıknatısın kalitesi ve içeriği ile ilgili tahmini fikir, faz, mıknatıs ve stator oluklarının sayısı, sargı biçimi, manyetik malzemenin özellikleri uygulama alanına, kullanılacağı yer ve nedenlerden dolayı bu aşamada verilen karar önemlidir çünkü kullanılacak malzeme sıcaklık ve atmosferden etkilenmeyeceği şekilde belirlenmeli ve uygulamaya bağlı olarak yapılacak komütasyon metodu seçilmelidir. Tüm bu maddelere karar verip, seçimimizi yaptıktan sonra motorun basit çizgi diyagramını (simple line diagram), gelişmiş tasarım ve dijital tasarıma geçmeden önce çizilmesi gerekmektedir. Sonraki aşama motorun temel boyutlarının yani, iç çapı, rotorun dış çapı, statorun iç yapısı, statorun dış yapısı, oluk derinliği, mıknatıs kalınlığı, hava boşluğu (air gap) belirlenmesidir. En son tasarıma geçmeden önce Tasarım Akış Diyagramı çizilerek yapılacaklar ve sırası belirlenecek (Pyrhonen, J. et al. 2013; Duan, Y. 2013).

2.3. Tasarım Hesaplamaları

Motor tasarımı için gerekli hesaplamaları yapmadan önce bazı mekanik değerler belirlenmeli ve motorun maksimum güç hesabı yapılmalıdır(Çetinkaya, S. 2005):

Araç Ağırlığı – m (kg)

Araç Hızı – V (m/s)

İvmelenme – a (m/s²)

Teker Çapı – R (m)

$$\text{Hava sürtünmesi} - F_a = 0.5 \cdot C \cdot S \cdot \rho \cdot V^2 \quad (1.1)$$

$$\text{Yuvarlanma direnci} - F_r = f \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha \quad (1.2)$$

$$\text{İvmelenme Kuvveti} - F_i = m \cdot a \quad (1.3)$$

$$\text{Toplam Kuvvet} - F_t = F_a + F_r + F_i \quad (1.4)$$

$$\text{Toplam Güç} - P_t = F_t \cdot V \quad (1.5)$$

$$\text{Devir} - \omega = \frac{V \cdot 60}{\pi \cdot R} \quad (1.6)$$

Moment (Tork) – T

Motor Gerilimi (Bataryadan alınan değer) – V

Boyut hesaplamaları:

- Rotor Boyutları(Hanselman, D.C. 2013):

$$T = k \cdot D^2 \cdot L \quad (1.7)$$

$$TRV = \frac{4T}{\pi \cdot D^2 \cdot L} \quad (1.8)$$

TRV – birim hacim başına düşen tork, mıknatıs veya motor türüne göre seçilir. Hub motorlarda bu değer 20'dir.

D – rotorun dış çapı

L- (axial) rotorun uzunluğu

$$\lambda = \frac{L}{\tau_p} \quad (1.9)$$

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} \quad (1.10)$$

λ – oran, uygulamaya göre tasarımcı tarafından belirlenir

τ_p – kutup adımı

p – kutup çifti sayısı

NOT: kutup çifti sayısı oluk sayısına göre belirlenir ve oluk sayısı da uygulama talepleri ile tasarım tercihleri göz önünde bulundurularak seçilir. Herhangi özel metodu veya formülü yoktur.

$$\Delta = 0,2 + 2\sqrt{D \cdot L} \quad (1.11)$$

Δ – hava aralığı büyüklüğü. Mekanik zorlamalar da göz önünde bulundurularak bu değer eşitlikte hesaplandıktan sonra biraz daha büyük alınması gerekmektedir.

$$h_{rb} = \left(\frac{\tau_p}{2 \cdot k_{fe} \cdot B_{rb}} \right) \cdot B_g \quad (1.12)$$

h_{rb} – rotor boyunduruk yüksekliği

k_{fe} - sacların sıkıştırma faktörü, değeri 0,95'dir

B_{rb} – rotor boyunduruğundaki manyetik alan yoğunluğu, değeri 1,3T -1,7T arasında olur.

B_g – hava aralığındaki manyetik alan yoğunluğu, değeri 0,7 T – 1T arasında olur.

Stator boyutları (Çetinkaya, S. 2005):

$$E = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_w \cdot \omega_a \cdot f \cdot V}{\sqrt{2}} \quad (1.13)$$

E- endüklenen faz gerilimi EMK

k_w - sargı faktörü

ω_a – sarım sayısı

f- frekans

$$f = \frac{1.25 \cdot p \cdot n}{60} \quad (1.14)$$

$$k_w = k_d \cdot k_p \quad (1.15)$$

k_d - dağılıma faktörü(sargının vektörel toplamının skaler toplamına oranına eşittir)

k_p – kirişleme faktörü(sargının kutup adımından ne kadar uzun ya da kısa olduğunu belirler)

$$\tau = \frac{N_s}{2p} \quad (1.16)$$

τ – kutuplama adımındır

$$k_p = \sin\left(V \cdot \frac{y}{\tau} \cdot 90^\circ\right) \quad (1.17)$$

y- sargı adımı

• Kutup başına akı :

$$\phi = 2 \cdot B_g \cdot \tau_p \cdot L \quad (1.18)$$

B_g - hava aralığındaki (air gap) manyetik alan yoğunluğu, değeri 0.7T-1Tarası değerler alır.

Not: Mıknatıslı makinalar yüklenmeye başladıkça devir sayıları düşmeye başlar. Boşta çalışma devri yükte çalışma devrinden çok

olur. Yani, 1,25*Boşta çalışma devri = nominal devir.

- Faz başına sarım sayısı

$$\omega_a = \frac{E \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi \cdot k_w \cdot f \cdot \phi} \quad (1.19)$$

- Toplam iletken sayısı

$$Z = 2 \cdot m \cdot \omega_a \quad (1.20)$$

- Oluk başına iletken sayısı

Not: Oluk başına iletken sayısı çift sayıda olmalı.

$$Z_0 = \frac{Z}{N_s} \quad (1.21)$$

N_s - sarım sayısı

- Çift katmanlı sargı için spin sayısı $Z_0/2$ tur olacaktır.
- Boşta çalışmada endüklenen Faz- Nötr gerilimi(rms)

$$V_{rms} = \frac{V - V_{tr}}{\sqrt{2n}} \quad (1.22)$$

V_{tr} - motor sürücüde bir kolda transistör üzerindeki gerilim düşümü.

n - faz sayısı

- Faz akımı :

$$I_f = \frac{P}{\eta \cdot V_{rms} \cdot C} \quad (1.23)$$

η - Motor verimi

$$\eta = \frac{P_a}{P_v} \quad (1.24)$$

P_a - alınan(verimli, iş yaptıran) güç

$$P_a = 2 \cdot \pi \cdot M \cdot n \quad (1.25)$$

M- dönme momenti, tork

Pv – harcanan (verilen) güç

C- oluk doluluk oranı

- Toplam oluk alanı

$$A_{sl} = \frac{q_{cu} \cdot z_0}{C} \quad (1.26)$$

C- oluk doluluk oranı

- Motorun oluk adımı:

$$\tau_0 = \frac{\pi \cdot D}{N_s} \quad (1.27)$$

- Dişlerdeki manyetik alanı sağlamak için gerekli diş genişliği

$$b_d = \left(\frac{\tau_p}{k_{fe} \cdot B_d} \right) B_g \quad (1.28)$$

- Oluk üst genişliği

$$b_0 = \tau_0 - b_d \quad (1.29)$$

- Statorun boyunduruk yüksekliği

$$h_{rb} = \left(\frac{\tau_p}{2 \cdot k_{fe} \cdot B_b} \right) \cdot B_g \quad (1.30)$$

Bb – boyunduruk endüksiyonu, 1,3T – 1,7T arası değerler alır.

Not: boyunduruk endüksiyonu; yüksek seçilse demir kayıpları artar, verim azalır, düşük seçilse motor boyutu artar. Genelde 1,5T olarak seçilir. Paydadaki 2 boyunduruktaki akı kutup akısının yarısıdır, çünkü kutup akısı boyundurukta 2'ye ayrılır.

- Max stator iç çapı:

$$D_i = D - 2 \cdot h_0 - 2 \cdot h_b \quad (1.31)$$

İletken kesiti ve oluk alanı

$$q_{cu} = \frac{I_s}{j_s} \quad (1.32)$$

q_{cu} - iletken kesitidir

I_s - faz akımı

j_s – stator akım yoğunluğu. Akım yoğunluğuna karar verildiğinde avantaj ve dezavantajlar göz önünde bulunmalı ve tasarlanan makineye uygun olarak verilen aralıktan seçilmesi gerekmektedir[18]

Makine türü	Akım Yoğunluğu
Tam kapalı makine	1.5-5
Hava fan soğutmalı makine	5-10
Sıvı soğutmalı makine	10-30

Daha sonra oluk doluluk oranı belirlenmesi gerekmektedir. Oluk doluluk oranı iletken alanının toplam oluk alanına oranıdır. Değer olarak 0,4 – 0,66 arasında değişir.

Oluk alanı belirlendikten sonra oluk genişliği ve oluk derinliğini bulmamız gerekiyor.

h_0 – oluk derinliği

b_0 – oluk genişliği olursa,

$\frac{h_0}{b_0}$ genelde 3-5 arasında bir orandır. Burada motorun geometrik

yapısını göz önünde bulundurarak matematiksel işlemler yapıp, bu değerleri ayrı ayrı bulabiliriz.

- Motor dış çapı

$$D_0 = D + 2g + 2d_{mag} + 2h_{rb} \quad (1.33)$$

3. MALZEME BİLGİSİ[13]

3.1.Nüve Malzemelerinin seçilmesi

Elektrik makinalarının tasarımı ve üretimindeki amaç olabildiğince ekonomik, istenilen bazı özellikleri yerine getiren ve garanti eden bir makina üretmektir. Bu yüzden iyi bir tasarım teknik bakışla ekonomik ve üretim yönlerine aynı önem verildiğinde geliştirilebilir. Nüve malzemesinin nasıl seçileceğinin bazı örnekleri uygulama gereksiniminden etkilenir ve bunlar aşağıda verilmiştir.

Evsel uygulamalarda kullanılan küçük güçlü motorlar: Bu tek fazlı motorların verimi tipik olarak % 60-70 civarındadır. Düşük maliyet ve seri imalata uygunluk öncelikli önemde bulunur. Bunu takip eden diğer faktörler: 890-50-D5 gibi alaşımsız (silikonsuz), yarı işlenmiş malzeme, yönlendirilmemiş yönde zımbalama kolaylığı olan ve düşük maliyetli malzemedir.

Standart üç fazlı indüksiyon motorları: Bu endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan motor tipidir. 250 W'lık bir motorun verimi tipik olarak % 70 iken 18,6 kW'lık bir motorun verimi % 90'a yükselir. Burada da ekonomik etmenler önemlidir fakat dengeli bir tasarım genelde 4 W/kg civarında nüve kayıpları ile düşük kayıplı, yönlendirilmemiş, tamamen ısıl işleminden geçirilmiş elektriksel çeliklerin kullanımını zorunlu kılar.

Tanecik yönlendirmeli elektriksel çelikler ve özel amaçlı alaşımların kullanımı 400 Hz'lik makinalar ile sınırlandırılmıştır. Tanecik yönlendirmeli elektriksel çelikler bazı turbo jeneratörlerde ve yüksek verimli makinalarda da kullanılmaktadır fakat bunlar kitabın amacının dışında kalmaktadır.

Adım motorları ve DC servo motorlar: çoğu kez yüksek akı yoğunluğu (1,8 T) ile tasarımılanır ve verim bir başlangıç tasarım parametresi olarak nadiren dikkate alınır. Normalde bunlarda ince, yönlendirilmemiş elektriksel çelikler kullanılır fakat bazı tasarımlarda gelişigüzel açısız davranışta paketlenmiş tanecik yönlendirmeli malzeme kullanılır.

Yekpare nüve malzemeler normalde DC makinaların alan çerçeveleri gibi kararlı akı taşıyan manyetik devrelerin parçalarında kullanılır. Bunların özellikle akı yoğunluğunun yüksek değerlerinde yüksek geçirgenlikte olması istenilir. Kullanılan ana malzemeler: dökme demir (maliyet öncelikli önemde olduğunda alan çerçevelerinde kullanılır ve ağırlığın artması dikkate alınmayabilir), saf demir ve silikon-demir (DC elektro mıknatıs kutup pabuçları), yumuşak çelikler (çerçeveler) ve ferro-kobalt (kutup parçaları).

3.2. Yalıtım Malzemeleri

Makinanın muhtelif parçalarının sıcaklığı ısı üretimi ve kayıp oranları ile belirlenir ve bu iki oran eşit olduğunda kararlı durum sıcaklık artışına ulaşılır. Elektrik makinasında kullanılan aktif malzemelerin (demir ve bakır) sınırlayıcı değerleri çok daha yüksek sıcaklıklara

dayanabilmektedir. Spesifik elektriksel ve manyetik yüklemelerin azaltılması kayıpları ve makinada üretilen ısıyı azaltmasına rağmen bu ekonomik değildir. İyi bir tasarımda aktif malzemelerden tamamen yararlanılmış ve yeterli yalıtım ve soğutma sistemleri sağlanmıştır.

Makinanın farklı parçalarının sıcaklığı yükteki değişimler ile farklılık gösterir ve bu durum yalıtım sistemini ek streslere maruz bırakır. Tasarımcı bütün çalışma şartları altında makinada kullanılan yalıtkan malzemelerin beklenen sıcaklık artışına dayanabilmesini garantiye almalıdır. Elektrik makinalarının arızaları çoğunlukla ısıl streslerden dolayı olduğundan yalıtım ve havalandırma sisteminin tasarımına üstünlük bakılamaz.

Sentetik reçine ve çeşitli plastik malzemelerin son günlerdeki gelişimleri elektrik makinalarının boyutlarında önemli etki yapmıştır. Özellikle oyuk yalıtıcıları hem kullanılan malzemelerde ve hem de bunların yerleştirilme metodunda önemli gelişmelere konu olmuştur. Boyutun küçülmesi yalıtkanların çok fazla yer işgal ettiği küçük makinalarda daha fazla söz konusudur.

3.3.Sabit Mıknatıslı Malzemeler

Sabit mıknatıslar doğru akımla uyartılan elektromıknatıslar gibi aynı etkiyi meydana getirerek elektrik makinalarında uyartımın sağlanmasında kullanılır. Sabit mıknatıs manyetik enerjiyi depoladığı ve bu enerji aygıtın çalışmasında tüketilmediğinden kullanışlıdır. Sabit mıknatıslar kimyasal reaksiyondaki katalizörle karşılaştırılabilecek rol oynarlar; aracı olarak gerekirler fakat enerjileri kullanılmaz. Normal

sınırları içinde çalıştırıldığında mıknatıs sonsuz zaman süresince enerjisini üzerinde barındırır. Eğer sabit mıknatıs yerine elektromıknatıs kullanılarak manyetik alan oluşturulursa uyartım alanının enerjisinin hala korunumlu olduğuna dikkat edilebilir. Bununla beraber uyartım akımında iletkenin direncinden dolayı omik kayıplar adında bir miktar enerji kaybolur.

REFERANSLAR

- Ataner E., Terzioğlu H., Yalçın G., (2020). Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemi. Elektrikli Araçlara Genel Bir Bakış-2, iksad Publishing House, Basım sayısı:1, 31-52.ISBN: 978-625-7687-48-5, pp. 31- 52.
- Ağaçayak, A.C., (2020). Asenkron Motor Yapısı, Eş Değer Devre ve Parametrelerinin Belirlenmesindeki İlerlemeler. Mühendislik Alanında Akademik Çalışmalar, Gece Akademisi Publishing, Basım sayısı:1, 1-29, ISBN : 978-625-7938-96-9,pp. 1- 29.
- Ainslie MD, George A, Shaw R, Dawson L, Winfield A, Stekete M, et al., editors. Design and market considerations for axial flux superconducting electric machine design. Journal of Physics: Conference Series; 2014: IOP Publishing.
- Bayraktar HC. Fırçasız doğru akım motorlarının kontrolü. 2014:51.
- Bozkır M., Yalçın G., Ağaçayak A.C., (2020). Elektrikli Araçlarda Direksiyon Sistemi. Elektrikli Araçlara Genel Bir Bakış-1, iksad Publishing House, Basım sayısı:1, 67-90. ISBN: 978-625-7687-47-8, pp. 67- 90.
- Çetinkaya S. Taşıt mekaniği: Nobel Yayın Dağıtım; 2005.
- Çabuk AS, Sağlam S, Üstün Ö. Investigation on efficiency of in-wheel BLDC motors for different winding structures. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. 2019;34(4):1975-85.
- Duan Y, Ionel DM. A review of recent developments in electrical machine design optimization methods with a permanent-magnet synchronous motor benchmark study. IEEE Transactions on Industry Applications. 2013;49(3):1268-75.
- Gülğün T., Terzioğlu H., Neşeli S., (2020). Elektrikli Araçlarda Yapılan Çalışmaların Aerodinamiğe Etkileri. Elektrikli Araçlara Genel Bir Bakış-1, iksad Publishing House, Basım sayısı:1, 3-30. ISBN: 978-625-7687-47-8, pp. 3- 30.
- Gürdal O. Elektrik makinalarının tasarımı: Atlas Yayın Dağıtım; 2001.
- Neşeli S.,Yalçın G.,Terzioğlu H.,Ağaçayak A.C. (2019). Nano Yüzey Kalitesi Oluşturmak İçin Lepleme Makinesi Tasarımı. V Science Technology and 29 Innovation Congress, 374-380. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5601104)
- Hanselman DC. Brushless permanent magnet motor design: The Writers' Collective; 2003.
- Kaya Y., Neşeli S., Ağaçayak A.C., (2020). Süspansiyon Sistemleri. Elektrikli Araçlara Genel Bir Bakış-1, iksad Publishing House, Basım sayısı:1, 47-66. ISBN: 978-625-7687-47-8, pp. 47- 66.
- Kudelina K, Asad B, Vaimann T, Rassölkin A, Kallaste A, Lukichev DV, editors. Main faults and diagnostic possibilities of BLDC Motors. 2020 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED); 2020: IEEE.
- Özdeş B., Terzioğlu H., Ağaçayak A.C., (2020). Elektrikli Araçlarda Telemetri. Elektrikli Araçlara Genel Bir Bakış-2, iksad Publishing House, Basım sayısı:1, 53-72.ISBN: 978-625-7687-48-5, pp. 53- 72.

- Pyrhonen J, Jokinen T, Hrabovcova V. Design of rotating electrical machines: John Wiley & Sons; 2013.
- Scarpino M. Motors for Makers: A Guide to Steppers, Servos, and Other Electrical Machines: Que Publishing; 2015.
- Terzioğlu, H., Ağaçayak, A. C., Yalçın, G., & Neşeli, S. (2019). Asenkron Motorun Çalışma Parametrelerinin SCADA ile İzlenmesinin Tasarımı. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 418-427.
- Terzioğlu, H., Yalçın, G., & Kısa, M. (2019). Servomotorun SCADA ile Kontrolü. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 428-435.
- Tong W. Mechanical design of electric motors: CRC press; 2014.
- Yedamale P. Brushless DC (BLDC) motor fundamentals. Microchip Technology Inc. 2003;20(1):3-15.
- Yoldaş M., Terzioğlu H. (2020). Elektrikli Araçlarda Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Darbe Genlik Modülasyonu İle Kontrolü. Elektrikli Araçlara Genel Bir Bakış-2, iksad Publishing House, Basım sayısı:1, 3-30.ISBN: 978-625-7687-48-5, pp. 3- 30.
- Wang X, Li C, Lou F, editors. Geometry optimize of printed circuit board stator winding in coreless axial field permanent magnet motor. 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC); 2016: IEEE.

BÖLÜM 5

FARKLI KESİCİ AĞIZ YERLEŞİMİ VE HELİS AÇILARINA SAHİP FREZE TAKIMLARININ PERFORMANS ANALİZİ

Altuğ Emre Çankaya*, Prof. Dr. Süleyman Neşeli**

* Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Mail: altugemrecankaya@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9434-6659

**Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Mail: sneseli@selcuk.edu.tr, ORCID NO: 0000-0003-1553-581X

GİRİŞ

Gelişmekte olan teknoloji ile beraber havacılık, uzay, medikal ve otomotiv gibi hassasiyetin büyük önem taşıdığı imalat endüstrisinde proses verimliliğinin artışına bağlı ürün kalite ve maliyetini rekabet koşullarına uygun hale getirdiği rahatlıkla ifade edilebilir. Günümüzde imalat metotları ürün çeşitliliğine paralel oldukça fazladır. Halen yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan talaşlı imalat ise endüstriyel üretimde geçmişten günümüze önemli bir yer tutmaktadır. Bu yöntem içerisinde sıklıkla kullanılan frezeleme operasyonlarında, takımın karakteristik özelliğinden dolayı kesintili kesme gerçekleştirilir (Binali, R. et al. 2018). Özellikle parmak freze ile talaş kaldırma sırasında istenilen yüzey kalitesi ve işleme verimliliğinin arzulan seviyelerde olabilmesi, pürüzlülüğü tetikleyen geleneksel takım geometrileri yerine farklı kesici ağız yerleşimlerinin olduğu titreşim engelleyici takımın kullanılmasıyla gerçekleştirilebilir. Akademik olarak titreşim ve etkileşimleri üzerine özellikle son yıllarda yoğun araştırmalar yapılmakta ve sonuçlar literatür ve ilişkili endüstrilerle paylaşılmaktadır (Binali, R. et al. 2020;2021).

Talaşlı imalatta ana hedef maksimum verimlilikte üretim gerçekleştirmek yani düşük maliyet ile daha çok parça üretmektir. Bu amacın gerçekleştirilmesi doğrultusunda operasyonlarda ilerleme hızı, devir sayısı, kesici kalitesi, talaş kaldırma oranı, takım geometrisi ve daha birçok parametre ve etkilerinin düşünülmesi gerekmektedir. Bu sayede kalite göstergesi olarak kabul edilen titreşim, ölçüsel tamlık ve aşınma gibi bağımlı değişkenlerin ideal seviyelerde kalması sağlanır.

İmalat süreçlerinde titreşimin minimize edilmesi, takım-işparçası sistemlerinin dinamik davranışlarının iyi tanımlanmasına bağlı olarak, mümkündür. Eğer sisteme giren enerji, sistem tarafından tüketilen enerjiden fazla olursa takıma ait titreşim genliklerinde ani yükselmeler meydana gelir. Bu durumda oluşan titreşimler (self-excited vibration), kendi kendini yenileyerek şiddetini artırır ve ürün kalitesinin bozulması, takım aşınmalarının ve kırılmalarının hızlanması, çalışma ortamlarında şiddetli gürültünün oluşması, tezgâh fener mili ve yataklamalarının zarar görmesi gibi ve daha birçok istenmeyen sonuçlara neden olur (Neşeli, 2013).

Literatürde kesici geometrisi yerleşimine bağlı talaş kaldırma işlemi kararlılığının belirlenmesi 1900'lü yılların başından günümüze halen araştırılan konular arasında önemini muhafaza etmektedir. Özellikle 1960 ve sonrası yıllarda titreşim sönümlenerek kararlı kesme işlemlerinin gerçekleştirilmesi maksadıyla takım titreşimi, takım geometrisi, iş parçası özellikleri, kullanılan analiz ve talaş kaldırma yöntemleri, yüzey pürüzlülük değerleri vb parametrelere bağlı kararlı kesme limitlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Hahn (1953) tarafından yapılan çalışmada metal kesme işleminde kendiliğinden doğan titreşim ve onun yok edilmesi konusu üzerinde durulmuştur. İçeriğinde vurgulanan ana tema; kendiliğinden doğan titreşim probleminin çözümü için titreşim modlarına bağlı sönümleyici uygulanması gerektiğidir. Kendiliğinden doğan titreşimlerin sebeplerini üç kısımda inceleyen araştırmacıya göre

titreşimin başlangıcına (primary chatter) faz farkı ve kayma düzlemi civarındaki gerilme durumu sebep olarak ifade edilmiştir. Kendiliğinden oluşan titreşimin nedenlerinden ikincisi, geçiş kararsızlığıdır. Bu kararsızlık iş parçasının homojen olmayan yapısından kaynaklanmaktadır. Yüzeyi sertleştirilmiş bir iş parçasının işlenmesi esnasında bu titreşimlerle karşılaşılabilir. Üçüncü neden, dalgalı olan bir iş parçası üzerinden talaş kaldırma esnasında oluşabilecek ve periyodik bir alternatif oluşturabilecek geri besleme etkisidir. Hahn ayrıca metal kesme işleminde meydana gelen zorlanmış titreşimlerde periyodik dalgalanmaların frekansının iş mili hızıyla orantılı olduğunu, fakat kendiliğinden doğan titreşimlerde periyodik dalgalanmaların iş mili hızından bağımsız ve doğal frekansla orantılı olduğunu açıklamıştır. Temel teoriyi Den Hartog (1947)'dan alan araştırmacı neticede kendiliğinden doğan titreşim için yeni bir teori geliştirmiştir.

Tobias ve Fischwick (1958) tarafından yapılan araştırmada takım tezgâhının kısıt şartlarındaki herhangi bir değişimin sönüm, eşdeğer rijitlik ve sapma eğrisi ile ilgili doğal frekanslara etkisi gösterilmiş ve titreşim izolatörlerinin sönüm ve rijitlik üzerindeki etkileri belirtilmiştir. Buna bağlı olarak yapının iç ikaz kuvvetlerine karşı olan durumu ile titreşim karakterlerinin tesiri incelenmiştir.

Tlusty ve Polacek (1963) yaptıkları çalışmada, tezgâhın yüksek kararlılığa sahip olması için kendiliğinden doğan titreşimin, tezgâhın karakteristiklerine etkisini incelemişlerdir. Sunulan teoride, işleme parametrelerindeki değişmelerin titreşim üzerindeki etkileri

belirlenmiştir. Bu çalışmada tezgâh n-serbestlik dereceli bir titreşim sistemi olarak düşünülmüş, kararlılık sınırlarının hesaplanması için basit bir grafik metot kullanılmıştır.

Titreşim işlenmiş son yüzeye, boyutsal ölçülere, takım ve tezgâh ömrü gibi kalitenin yanında imalatı da etkileyen en önemli göstergelerin hepsi için olumsuz bir etkiye sahiptir. Yüzey kalitesi titreşimi tanımlamada en yaygın kullanılan göstergelerden birisidir. Şiddetli titreşimler sırasında kendinden oluşan titreşimler sıklıkla görülür. Titreşim tanımlanırken n-serbestlik dereceli denklemler kullanılarak sistemlerin stabilite sınırlarının tespitinde kullanılan titreşim teorileri geliştirilebilir. Bu teorilerle titreşimin olduğu stabilite sınırlarının aşıldığı durumlar ve titreşimi tetikleyen sebeplerin tespiti yapılır. Merritt (1965) tornalama işlemi olarak yaptığı çalışmada, kararlı bölge (stabilite lobe) sınır çizgisi, tanjant stabilite sınırı ve asimtotik kararlı sınırları dikey doğrultuda talaş derinliği, yatay doğrultuda iş mili hızı (devir sayısı) grafiğiyle göstermiştir. Yüksek hızlarda kararlı olmayan bölgenin oluştuğunu gösteren grafikte kesme kuvvetlerine iki şekilde yaklaşmıştır. Birincisi takımın iş parçasına yaklaşması diğeri ise iş parçasından uzaklaşma anıdır. Talaş kaldırma sırasında kendiliğinden doğan titreşimin aynı zamanda takım tezgâhı ile kesme işleminin birlikte düşünülmesiyle oluşan sistemin kararsızlık bölgesinde olduğu kabul edilmiştir. Kararsızlık bölgesi dışında kalan alanlar kararlı çalışma bölgesi olarak ifade edilmiştir. Tezgah, takım ve malzemenin de yapısal ve geometrik özelliklerinin dahil edildiği denklemlerle

titreşime etki eden faktörler belirlenmiş ve Laplace dönüşüm denklemi kullanılarak matematiksel model oluşturulmuştur.

Talaş kaldırma işlemlerinde verimliliğin artırılması, kararlılık diyagramlarının yüksek hız ve talaş derinliği bölgelerinde çalışmayı zorunlu kılar. Fakat bu, çalışılacak tezgâhın ne kadar yüksek hızlarda çalışabildiği ile bağlantılıdır. Bu durumda daha düşük devirlerde de kararlı kesme yapabilmeyi sağlamak için değişken aralıklı kesicilerin kullanılması gerektiği ilk defa Slavicek (1965) tarafından açıklanmıştır.

Kendiliğinden doğan titreşimleri kontrol altına almak için kesme işleminde uygun kesici takım ve optimum kesme parametreleri gibi koşullar seçilmelidir fakat bu optimum değerler her zaman maliyet açısından uygun görünmeyebilir. Maliyeti en çok etkileyen kesme parametrelerinden biri olan talaş derinliği kesme stabilitesini sınırlar. Kesme derinliğinin artmasıyla stabilite limiti aşılar ve kesme kararlılığı bozularak titreşim görülmeye başlanır. Titreşim ise istenmeyen yüksek kesme kuvvetlerinin oluşmasına ve kötü yüzey kalitesine sebep olur. Vanherck (1967) yaptığı çalışmada standart ve değişken adımlı parmak frezelerin titreşim değerlerini kıyaslayarak stabilitelelerini değerlendirmiştir. Sabit adımlı takımların kesici uç aralıklarını değiştirerek standart takımlara göre % 400 daha stabil olabileceğinin mümkün olduğunu açıklamıştır. Sonraki zamanlarda Tlusty ve ark. (1983) özel geometrili (değişken adımlı veya testere dişi benzeri bir yapıya sahip) takımlar için matematiksel modeller geliştirmişlerdir.

Halen uzay, havacılık ve endüstrisinin daha bir çok alanında özel imalat şartlarına ihtiyaç duyan malzeme bakımından spesifik ve özel boyutlu parçalar üretilmektedir. Bu parçaların imalatında ise işlenebilirlik kısıtları, yüzey kalitesi bozukluğu, optimum işleme sürelerinin tespiti gibi çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Talaş kaldırma oranları arttıkça titreşim problemi doğru orantılı olarak daha da artmakta ve ürün kalite göstergesi olan pürüzlülük giderek bozulmaktadır. Özellikle frezeleme işlemleri için buna engel olabilmek maksadıyla özel parmak frezeler tercih edilmektedir. Altıntaş ve Shirase (1996) yaptıkları çalışmada Ø20, 30° helis açılı ve 4 kesme ağızlı olarak belirlenen üç parmak frezenin karşılaştırması üzerine çalışmışlardır. Bu parmak frezeler sıra ile 90°-90°-90°-90°, kesici ağız yerleşimine sahip bir adet standart takım ve 120°-100°-80°-60° ile 120°-120°-60°-60° 2 adet değişken adımlı takımlardır. Yapılan çalışmada kuvvet değerleri ölçülerek değişken adımlı takımların her diş arası periyodunun farklı olmasından kaynaklı talaş derinliklerinde değişim olduğu ortaya çıkartılmıştır. Çalışmada formüle edilen sonuçlar ile deneyler karşılaştırılmış ve simüle edilen çalışmaların sonuçları ile deneysel çalışmaların sonuçları birbirlerini doğrulamıştır. Sonuçlara göre değişken adımlı takımların standart takımlara göre titreşimi bastırmada %20 daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Altıntaş ve ark. (1999) yaptıkları çalışmada çapı 19.05 mm olan dört helisel oluğa sahip, standart kesici ağız yerleşimli ve ağızları değişken yerleştirilmiş toplamda üç farklı parmak freze ile Al356 alüminyum

alaşımı üzerinde kesme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada iki amaç hedeflenmiştir; ilk olarak yanal kesme işlemi sırasındaki kesme kuvvetleri izlenerek titreşim seviyelerini tahmin etmek için matematiksel model geliştirmişlerdir. İkinci olarak ise parmak freze üzerindeki değişken kesici ağız konumlarının sebep olduğu titreşim değerleri ölçülerek takımlar arası performans kıyaslaması yapmışlardır. Kesme parametreleri aynı kalmak şartı ile fiziksel deneyler sonucunda elde edilen verilerle matematik model vasıtasıyla yapılan tahminlerin uyumluluk gösterdiği ifade edilmiştir. İlaveten değişken adımlı parmak freze seçiminin titreşimi indirgemenin bir yöntemi olduğunu belirtilmiştir.

Lee ve ark. (2000) yüksek hızla frezeleme sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve bu esnada oluşan titreşimleri incelemiştir. Araştırmacılar, normal kesme hızlarında yapılan işleme şartlarında oluşan kuvvetlerin tespit edilmesinin kesme parametrelerinin incelenmesinde yeterli olacağını belirtmişlerdir. Ancak, yüksek hızla işlemede bu incelemenin yeterli olmadığını bildirmişlerdir. Yüksek hızla işleme şartlarında işlenen parçaların geometrik tamlığı ve yüzey kalitesine, kesme sırasında oluşan titreşimlerin etkisinin büyük olduğu ve bu şartlarda yapılan işlemenin gerçek anlamda incelenip irdelenerek benzetim yapılabilmesi için titreşimlerin de dikkate alınmasının gerekli olduğu vurgulanmaktadır. Dikkat çekici olarak kesme sırasında oluşan titreşimlerin en büyük sebeplerinden birinin kesici ekseninin sapması olduğu belirtilmiştir. Elde edilen deneysel veriler hazırlanan bir program ile irdelenmiş buna göre işlenen

yüzeyin pürüzlülük değerleri ile deneysel verileri işleyen benzetim algoritmasının sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda deneysel veriler ile simülasyon sonuçlarının yaklaşık aynı olduğu ve kesme sırasında oluşan titreşimlerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkin bir parametre olduğu tespit edilmiştir.

Frezelemede titreşim; imalat endüstrisinin yüksek performansta üretebilirliğinin en büyük engellerindendir. Titreşimi engelleme veya en aza indirme adına yukarıda verilen literatür el çalışmalarına ilaveten gün geçtikçe çalışmalar giderek artmaktadır. Tlustý'nin (1986) yüksek hızlarda frezeleme işlemi için yaptığı çalışmada ortaya çıkardığı ortogonal stabilite lobları ve kararlılık bölgeleri ile başlayan tanımlar bugüne dek yapılan çalışmalarla genişletilmiş ve titreşim matematik olarak modellenmiştir. Kararlılık bölgelerini oluştururken dikkat edilen tezgâh rijitliği, kesici takım dinamiği, iş parçası malzemesi özelliği ve işleme parametreleri önem arz etmektedir. Bu parametrelerdeki değişimler ise faz değişikliklerine, frekans değerlerinde dalgalanmalar oluşturmaktadır. Oluşan frekans değerleri tezgâhın, malzemenin doğal frekansıyla çakışırsa titreşim, zıt yönlü bir değer ortaya çıkarsa titreşim sönümlenme meydana gelmektedir. Bu doğrultuda frezeleme operasyonu esnasında sistemin oluşturduğu doğal frekans parmak frezelemelerde kesici uçlar arası boşluklarda oluşan fazlar ile aynı anda oluşursa sistem titreşimi sönümler. Ancak sistemin doğal frekansı kesici ucun talaş kaldırdığı andaki frekansıyla aynı anda olur ise talaş derinliğinde değişimlere neden olur ve bu da titreşimi oluşturur. Turner ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada

Aluminium 6061 malzemesi üzerinden çap 16 mm parmak freze ile yanal frezeleme işlemi yapmışlardır. Yapılan çalışmada bir adet standart takım ve 2 adet değişken adım ve helisli takım kullanılmıştır. Geliştirdikleri zaman domainli titreşim tanımlama teknikleri ile parmak frezelerin kararlı kesme bölgelerini belirlemişlerdir. Belirledikleri kararlı bölgelere göre takımların performanslarını kıyaslamışlar ve değişken adımlı ve helisli takımların standart takımlara göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Li ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışmada, açılacak olarak düzensiz kesici ağız yerleşimine sahip genel amaçlı bir yüzey freze takımı tasarlanmış ve performansı normal ağızlı bir kesicinin performansı ile kıyaslanmıştır. Performans kriteri olarak ise titreşim kuvvetleri ve ses faktörü dikkate alınmıştır. AISI 1045 çeliği kullanılarak yapılan deneysel çalışma ile elde edilen verilerden yola çıkarak düzensiz kesici ağız yerleşimine sahip takımın sadece titreşim ve akustik gürültü seviyesinde önemli bir azalma sağlamakla kalmayıp aynı zamanda iş parçasının yüzey bitirme kalitesinde de dikkate değer bir iyileşme sağladığı ifade edilmiştir.

Değişken adımlı parmak freze ile talaş kaldırma prosesinin kararlılığını etkileyen bir faktör olarak diş kavrama faktörü (tool engagement) dikkate alınabilir. Song ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada yüksek frezeleme stabilitesine sahip değişken ağızlı parmak freze tasarlamak için diş kavrama faktörünün analizine dayanan bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşımda, kesici ağızların değişken adımlı yerleştirildiği parmak frezelerin helis açısı ve sayısı gibi yapısal

parametreler kullanılmıştır. Bu yöntemin geçerliliğini göstermek havacılıkta yoğun olarak kullanılan alüminyum alaşımı (Al7050) malzeme üzerinden talaş kaldırma işlemleri sırasında bir eşit adımlı ve iki farklı değişken adımlı toplamda üç parmak freze arasındaki karşılaştırmalar detaylı olarak incelenmiştir. Frezeleme stabilitesini iyileştirmek için helis açısının büyütülmesine, kesici diş sayısının stabilite sınırı üzerindeki etkisinin tespitinde diş sayısı ve devir sayısının tek bir değişken olarak ele alınması gerektiğine ve son olarak dinamik kararlılığın artırılması için değişken hatveli (adımlı) parmak frezelerin kullanılmasının gerekli olduğu sonucuna varmışlardır.

Titreşim imalatta istenmeyen durumlardan biridir. İşleme esnasında oluşan titreşimler imalatta kararsızlığa yol açacağı gibi, takım aşınmasına ve kötü yüzey kalitesine de sebep olur. Huang ve ark. (2012) yaptıkları deneysel çalışmada 4 ağızlı, çapı 20 mm ve helis açısı 42° olan değişken adımlı parmak freze ile Ti-6Al-4V kalitede titanyum alaşımından talaş kaldırmışlardır. Kesme hızlarını değiştirerek (80 ile 360 m/dk arasında) ivmeölçer ile titreşim frekans (Hz) değerleri ölçmüş ve karşılaştırılmıştır. Titreşim değerleri üzerinde yapılan karşılaştırmalarda optimum değer (160 m/dk) ile değerler arasında pik yapan noktalar arası kıyaslamada titreşim kaynaklı kesme kuvvetlerinin %61.9-66.8 oranında, yüzey pürüzlülüğünün ise % 34.2-40,5 oranında arttığını göstermişlerdir.

Frekans spektrum hattının enerji denge teorisi kullanılarak değişken adımlı parmak frezelerin titreşim azaltma mekanizması analiz edilebilir. Bu teoride değişken adımlı kesici takımın frekans

spektrumu hat enerjisinin homojen dağılımı ve daha düşük tepe enerjisine sahip kesme kuvvetinin oluşturulması ile zorlanmış titreşimler azaltılabilir. Ti6Al4V alaşımlı malzeme üzerinde kuru kesme koşullarında yapılan dalma frezeleme işleminde değişken açısız dağılımlı ve eşit ağızlı kesiciler kullanılarak yüksek hızlı kesme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Spektrum hatlarındaki enerji dağılımının daha yoğun olduğu ve değişken adımlı kesicinin oluşturduğu kesme kuvveti genliğinin standart ağız dağılımına sahip kesicinininkinden daha küçük olduğu dolayısıyla zorlanan titreşimin azaltıldığı sonucuna varmışlardır (Huang ve ark., 2013).

Değişken helisli takımların talaş kaldırma işlemi sırasındaki performanslarını etkileyen birçok faktör vardır. Matematiksel modellemede oluşturulan değişken katsayı matrisleri, doğrusal olmayan kesme kuvvetleri, tezgâh ve tutucu gibi imalat elemanlardan kaynaklı salgı etkenler zamanla takımların performansını olumsuz yönde etkiler. Otto ve ark. (2017) de 4 ağızlı değişken helisli parmak freze ile St-50 kalitesindeki iş parçası üzerinde yaptıkları deneysel çalışmada dinamometre ve ivmeölçer ile titreşim ve kuvvet değerlerini ölçerek değişken helisli takımları geleneksel frezeleme takımları ile kıyaslamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre değişken helisli takımların oluşturduğu faz farklılıklarının kesme işlemlerinde geleneksel takımlara göre sağladığı avantajları; yaklaşık olarak %151 oranında daha kararlı kesme şartlarının oluşması ve minimum kesme derinliğinin %146 artması şeklinde sıralamışlardır.

İlerleme artışı kesme zamanını azaltarak verimliliği artırır ve kesme kenarını daha iyi kullanarak iyi bir takım ömrü sağlar (Çakır, 1999). Ancak işleme verimliliğinde kullanılan yüksek talaş kaldırma oranı takım iş parçası ve kesici takımın dinamiğini etkileyerek kararlı olmayan kesme kuvvetlerine neden olur. Talaş derinliğinin fazla olması durumunda kesme kuvvetlerinin etkisiyle de takımda titreşim oluşur.

Titreşim; iki boyutlu bir düzlemde belirlenen sıfır noktasına göre bu düzleme dik bir doğrultunun mutlak değer içinde bu noktadan uzaklaşması olarak kısaca anlatılmak gerekirse talaşlı imalat için de kesici ucun kesme ekseninden sapması olarak da düşünülebilir. Talaşlı imalat sırasında kendinden kaynaklı titreşim olan tırlama titreşimi, tırlama limit noktasını aştıktan sonra talaş kalınlığının artması ile başlar ve talaş derinliğinin en yüksek değerinde daha belirgin hale gelir. Tlustý' (1999) ye göre yüzey pürüzlülüğünün değeri ise takım tezgâhının, iş parçası malzemesinin, takımın kesme hızı ve geometrisinin dinamik karakteristiklerine bağlı olduğu ifade edilerek titreşimin imalat verimliliğine etkisinden bahsedilmiştir.

Neşeli ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada Ø40x250 mm ebatlarındaki AISI 1040 çeliği üzerinden 0.5 mm derinliğinde tornalama operasyonu ile talaş kaldırarak yaptıkları çalışma da yaklaşma açısı ve talaş açılarına bağlı olarak oluşan tırlama titreşimin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemişlerdir. Bu çalışma da kesme hızı, ilerleme hızı ve devir sayısı sabit tutularak yaklaşma açısı ve talaş açıları belirlenen 3 farklı değerlerde ele alınmıştır. Yapılan deneylerde

açıkların neden olduğu titreşim ölçülmüş olup titreşimin artması ile de yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirtilmiştir.

Yine Neşeli (2013), yaptığı çalışma da talaşlı imalat esnasında titreşimin kontrolünün öneminden ve titreşimin kontrol altına alınması gerektiğinden bahsetmiştir. Titreşimi kontrol altına almak için ise öncelikle tırlama kararlılık diyagramının belirlenmesi gerekmektedir. Talaşlı imalat sırasında oluşan titreşimin sönmelenmeme durumlarında sonuç olarak kötü yüzey pürüzlülüğü, yüksek takım aşınmaları hatta tezgâha mekanik olarak zarar verecek durumların oluşması muhtemeldir. Kesme parametreleri üzerinde yapılan optimizasyon ile titreşim kararlı bölgede tutulmalı ve titreşimin neden olacağı kötü yüzey pürüzlülüğü, ses şiddetinde artmalar, takım aşınması gibi sorunların önüne geçilmelidir.

İşlenebilirlik, imalatta üstesinden gelinmesi gereken en önemli konuların başında gelmektedir. Bu bağlamda işlenebilirliğe etki eden faktörler belirlenmiş olup, her bir etki eden faktörü değerlendirecek deney mekanizmaları tasarlanmıştır. İşlenebilirliğe etki eden faktörler için; malzeme, kesici takım, kesme parametreleri önem sırasına göre en başta yer alan unsurlardır. İşlenecek malzemenin ve kesici takımın belirlendiği bir talaşlı imalat operasyonu sırasında verimlilik göz önünde bulundurularak takım aşınması, tezgâhta oluşabilecek sorunlar ve ölçüsel hatalara engel olmak için en ideal kesme parametreleri belirlenmelidir. Kesme parametrelerinin belirlenmesi ise bir takım deney ve tecrübe gerektirmektedir. Yapılacak deney ve çalışmalarda titreşimin oluşturduğu frekans ve dalga boyu sinyallerinin kararlı

bölge olarak tanımlanan sınırlar içinde tutulması ve rezonansa sebep olacak eşiğin altından kalması sağlanmalıdır.

Şahinoğlu ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada Ø50 mm olan silindirik GGG50 küresel grafitli dökme demir malzemesi kullanarak tornalama operasyonu yapmışlardır. 4 farklı ilerleme hızı, kesme hızı ve talaş derinliği kullanarak yaptıkları fiziksel deneylerden elde edilen veriler kullanılarak kararlı bölge tespiti maksadıyla yüzey pürüzlülüğü ile kesmede oluşan ses şiddeti objektif fonksiyonlarına bağlı kesme parametrelerinin optimizesi gerçekleştirmişlerdir.

Yardımeden ve ark. (2018) Ø50x250 mm boyutlarındaki AISI 1040 çeliğinin farklı kesme parametreleri kullanarak yaptıkları çalışmalarında, titreşimin sebep olduğu yüzey pürüzlülüğünün tespiti üzerine odaklanmışlardır. İlerleme oranının artışıyla titreşim genliğinin arttığını, ilerleme oranı ve talaş kalınlığının artışıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını ve kesme hızının artışıyla da yüzey pürüzlülüğünün azaldığını göstermişlerdir. Sonuç olarak titreşim ve yüzey pürüzlülüğü arasında doğru orantı olduğunu ve en iyi yüzey pürüzlülüğünün, yüksek kesme hızı (238 m/dak), düşük ilerleme oranı (0.052 mm/dev) ve düşük kesme derinliğinde (0.5 mm) elde edileceğini ifade etmişlerdir.

Asiltürk ve ark. (2012) yaptıkları çalışma da AISI 4140 ıslah çeliğini 51 HRc sertlikte kuru kesme şartlarında sert tornalama işlemine tabi tutmuşlardır. Kesme parametreleri olarak kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği değerleri seçilerek tornalama sonucu ortalama yüzey

pürüzlülüğü değeri offline olarak, takım tutucu üzerindeki titreşim ve akustik emisyon değeri ise online olarak ölçülmüştür. Lineer, kuadratik ve logaritmik regresyon denklemleri kullanılarak yüzey pürüzlülüğü tahmin modelleri oluşturulmuştur. Modellerin güvenilirliği varyans analizi (ANOVA) ile tespit edilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde yüzey pürüzlülüğüne en etkin parametrenin titreşim olduğunu göstermişlerdir.

Oral ve ark. (2020) yapılan testlerde titanyum (Ti6Al4V) iş parçası kullanmışlardır. Test parametreleri olarak 4 farklı seviyede kesme hızı ve ilerleme oranı alınarak tam faktöriyel deneysel tasarım yöntemi ile deneysel kombinasyonlar oluşturulmuştur. Testlerden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri için regresyon analizleri yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, titreşimin ve ilerleme oranının artışı ile ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum kesici takımında oluşan titreşimin kesilen iş parçası yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etken olduğunu açıkça ortaya koyduğu ifade edilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülük değerinin ilerleme hızının en az olduğu değerlerde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kesme hızının 50 m/dk ve ilerleme hızının 0,10 mm/diş değerinde olması halinde yapılan deneylerde kesici takım aşınmasının daha fazla olduğu belirtilmiş ve bu durumun yüzey pürüzlülük değerlerini olumsuz yönde etkilediği ifade edilmiştir.

Tobias, S.A. (1965), tarafından “Talaşlı imalatta öngörülemeyen problemlerden biri” olarak belirtilen titreşimin minimize edilmesi ve kontrol edilmesine dair çalışmalar geçmişten günümüze halen devam

etmektedir. İmalat sırasındaki belirsizliklerin ortadan kaldırılması ve daha verimli üretim yapılması adına işleme parametrelerinde yapılan optimizasyon çalışmaları ile beraber titreşim değeri minimize edilerek takım kırılma ve aşınmasının engellenmesi, kalite göstergesi değeri olan yüzey pürüzlülüğü değerinin düşürülmesi gibi maliyete olumlu etki eden faktörlerin istenilen düzeylerde tutulması hedeflenmiştir.

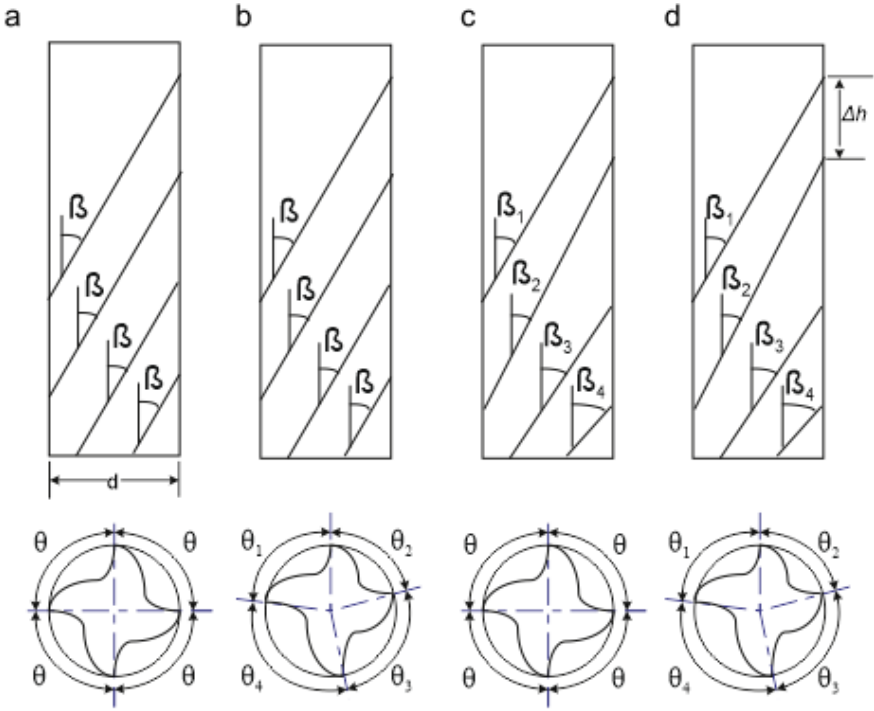
Insperger ve Stépán (2002), gecikme diferansiyelinin kararlılık analizi için kullanılmak üzere zaman gecikmeli kararsız sistemlerin doğrusal dinamikliği için bir kararlılık tahmin yöntemi önermişlerdir. Frezeleme işlemlerinde bir önceki kesici ağzın kesme esnasındaki titreşiminden kaynaklı sonraki kesici ağza dalgalı bir yüzey bırakılır. Bu durum bir sonraki kesme dişinin kesme koşullarını etkiler ve frezeleme işlemi için kesme kararlılığı değişir. Önerilen yöntem, yalnızca gecikmiş terimleri ayıran yarı ayrıklaştırma (semi-discretization) yöntemi olarak adlandırılır. Sistem N adet periyodik zamana ayrılır ve zamana bağlı katsayılar monodromi matrisleri kullanılarak sistemin kararlılığı analiz edilir. Ayrıca yapılan bu çalışmada tam ayrıklaştırma (full-discretization) yöntemi adını verdikleri hem geciken süreleri hem de mevcut zamandaki şartları ayırt eden bir yöntemi de araştırmacılar için tavsiye etmişlerdir.

Stepan ve ark. (2003) frezeleme işlemleri sırasında ortaya çıkan frekanslar için çoklu tırlamanın belirlenmesi için analitik modeller sunmuşlardır. Sundukları modellerde hem kararlı hem de kararsız frezeleme işlemlerinde takımların sönümlü doğal frekansları ve kesici ağzın uyarılma frekansları ortaya çıkarılmıştır. İlâveten Insperger

ve ark., (2008) tarafından yapılan çalışmada takım salgısının titreşim frekansları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Stepan ve diğ. Tarafından yapılan çalışmadan farklı olarak sistem prensibi periyodunu dış periyodu yerine mil periyodu olarak kabul etmişlerdir.

Doolan ve ark. (1975) değişken ağızlı kesme ağızlarına sahip bir yüzey taraması tasarlamak için bir yöntem geliştirmişlerdir. Tasarlanan takım ile standart takım kullanılarak 10 deney yapılmış ve değişken ağızlı takımın daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Budak (2003) ve Turner ve ark. (2007) yaptıkları çalışmalarda, değişken kesici uç açıları özelliğine sahip parmak frezeler için analitik bir tasarım yöntemi önermiştir. Bu çalışmanın ana fikri, işlenen yüzeyde bırakılan titreşim kaynaklı dalgalanmaların daha sonraki kesici ağız tarafından kontrollü bir faz farkı ile kesilmesine imkân sağlayan kesici ağız yerleşiminin oluşturulmasıdır. Bu şekilde kararlılık sınırları artar ve yenilenebilir titreşim bastırılır. Budak tarafından kullanılan farklı ağız yerleşimli uniform helisli parmak frezelerin kullanıldığı önerilen yöntem, örnek frezeleme işlemleri için ses ölçümlerinde uygulanmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Turner ve diğ. tarafından kullanılan kesici ise hem farklı kesici ağız yerleşimi hem de farklı helis açılarına sahip bir takım (Şekil 1) olmasına rağmen çalışmalarında Budak tarafından bahsedilen kararlılık artışını destekler sonuçlar elde etmişlerdir.



Şekil 1. Geleneksel ve geleneksel olmayan parmak frezelerin karşılaştırılması
 a) Geleneksel (standart) takım
 b) Değişken adımli takım
 c) Değişken helisli-düzenli adımli takım
 d) Değişken helisli takım

Sivasakthivel ve ark. (2013) yaptıkları çalışmalarda cnc frezeleme imalatının optimizasyonu için Taguchi metodu kullanılmıştır. Parametre olarak helis açısı, ilerleme, devir, aksenal kesme derinliği ve radyal kesme derinliği seçilmiştir. Fener mili titreşimi için en ideal parametreleri; 45° helis açısı, ilerleme oranı için 0,04 mm/dk, devir için 2 m/ dk, aksenal kesme derinliği 3,5 mm ve radyal kesme derinliği 3 mm olarak araştırma sonuçlarında tavsiye etmişlerdir. Mengene titreşimini en aza indirmek için ise 45° helis açısı, ilerleme oranı için 0,04 mm/dk, devir için 1,75 m/ dk, aksenal kesme derinliği

2,5 mm ve radyal kesme derinliği 2,5 mm parametreleri tavsiye edilmiştir.

Huang ve ark. (2014) dinamometre kullanarak kesici takım üzerindeki titreşimin yer değiştirmesinin bölgesel olduğunu çalışmasında belirtmişlerdir. Araştırmada 35/38 değişken açılı ve 35 dereceli sabit açılı helis iki tip kesici takımlarla yapılmıştır. Yapılan deney sonuçları analiz edildiğinde değişken helisli takımın daha küçük titreşim değerlerine sahip olduğu gösterilmiştir.

Balajı ve ark. (2016) araştırmalarında kesme parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi metodunu kullanmışlardır. Sonuç olarak en iyi yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için optimum kesme parametreleri 25° helis açısı, 12 mm/dk ilerleme ve 800 devir, en düşük titreşim değeri için ise 25° helis açısı, 10 mm/dk ilerleme ve 600 devir araştırma sonucu olarak sunulmuştur.

Otto ve ark. (2017) 36/38 değişken helisli ile 30 derece helisli takımların kararlılık diyagramı sonuçlarını karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre değişken helisli takımlar zaman gecikme varyasyonlarına sahip olduğu için titreşimi engellediğini açıklamışlardır. Bu zaman gecikme varyasyonları standart takımlarda mevcut değildir.

Niu ve ark. (2017) yapılan çalışmada yenilenen tırlama ile 40/42 dereceli değişken helis kesici ağız yerleşimine sahip kesici takımın ardışık dişleri arasında oluşan titreşim fazını tanımlamışlardır. Sonuçlara dayalı olarak araştırmalarda değişken helisli ve adımli

takımların düşük devirli uygulamalarda titreşimin arttığını ve oluşan tırlamanın kararlılık diyagramında oluşturduğu kararsız bölgeleri vurgulamışlardır. Ek olarak tırlamanın etkisinin arttırmak için daha büyük adım ve helislerin seçilmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Farklı kesici ağız ve helis açı değerlerine sahip kesici takımların farklı kesme koşullarına bağlı kullanılmasıyla farklı malzemeler üzerinden talaş kaldırılmak suretiyle gerçekleştirilen deneysel çalışma neticesinde, endüstride kararlı kesme şartlarının oluşturulabilmesi maksatlı kullanılan her bir kesici takımın, son işleme operasyonlarında oluşturdukları kesme esnasında oluşan titreşim değerlerine göre performans analizi yapılmıştır. Bu sayede kararlı kesme şartlarının belirlenmesi amacı doğrultusunda literatürde olmayan istatistiki yaklaşımın kullanılmasıyla ilerleme, devir sayısı ve talaş derinliği parametrelerinin deneysel tepki parametresi üzerine etkileri açıkça belirlenmiş, titreşim kriterine bağlı olarak kesme koşulları optimize edilmiştir.

2. TİTREŞİM VE SÖNÜMLEME METODOLOJİLERİ

İşleme operasyonlarında oluşan geometrik ve/veya ölçüsel hataların ana sebebi, kontrol edilemeyen takım ve iş parçası arasındaki bağlı dinamik hareketlerdir. Bu hareketler takım ucunda genliği büyük yer değiştirmelerin oluşmasına dolayısıyla kararlı olmayan takım ucu davranışlarına sebep olacağından dolayı işlenmiş son yüzeye, kesici takıma ve tezgâh yapısına büyük ölçüde zarar verebilir. Kabul edilebilir limitlerin ötesinde gerçekleşen bu hareketler tırlama olarak

adlandırılır. Dolayısıyla her titreşim tırlama olarak adlandırılmaz. Bu tür titreşim mekanizması üzerine analizler ve çalışmalar yaklaşık 60 yıl önce Tobias (1965) ile başlamıştır. O zamandan beri farklı imalat işlemleri için titreşim kararlılığının limitlerini tahmin etmek ve kontrol altına alabilmek için birçok metodoloji geliştirilmiştir.

1.1. Yerdeğişimine Bağlı Kontrol

Titreşimi kontrol etmek için kesici takım ve iş parçası arasındaki yerdeğiştirme miktarını düşürerek kararlı olmayan titreşimleri sönümlemek hedeflenir. Genel olarak metotlar aktif, yarı aktif ve pasif kontrol olarak sınıflandırılabilir.

Aktif kontrolde istenmeyen titreşimi engellemek için harici güç gerekir. Delik işleme operasyonu için doğrusal kuadratik düzenleyici kontrolünü öneren Tewani ve ark. (1995) yaptıkları çalışmalarında, piezoelektrik aktüatör vasıtasıyla titreşim sönümleyici kütleleri sisteme dâhil ederek tırlamanın engellenebileceğini göstermiştir. Tamg ve ark. (2000) tornalama operasyonu için frekans cevap fonksiyonu kullanarak kesici takımın kararlı bölgede kalmasına sebep olacak ayarlamalar yaparak titreşimin bastırılmasını sağlamıştır. Huyanan ve Sims (2008) yaptığı çalışmasında, frezeleme prosesinde tırlama titreşiminden uzaklaşabilmek için aktif titreşim sönümleyicilerini modelleyerek sanal pasif kontrol temelli sönümleyiciler kullanmıştır. Sanal pasif sönümleyicilerin, frezeleme operasyonlarında titreşimi azaltmak için basit ve güvenilir olduğu ifade edilse de aktüatör saturasyonu ile sınırlı olduğuna dikkat

çekilmiştir. Pratt ve Nayfeh (2001) delik delme operasyonunda aktif geri besleme kontrolünde sanal pasif sönümleyiceleri kullanmışlardır. Chung ve ark. (1997) dinamik yapıya ait frekans cevap fonksiyonunun negatif kısmını azaltmak suretiyle makine fener mili titreşimini sönümlemek için çalışmıştır. Ganguli ve ark. (2007), hem frezeleme hem de tornalamada tırlama titreşimini minimize etmek için aktif sönümleyici vibratör kullanmıştır. Artan kararlılığı döngüsel simülasyon yaklaşımı kullanılarak gösterilmiştir. Zhang ve Sims (2005) tırlamayı bastırmak için pozitif konum geri besleme kontrol stratejisinin uygulandığı bir piezoelektrik aktüatör kullanmışlardır.

Dohner ve ark. (2004) tarafından yapılan çalışmada, durum geri besleme kontrolörü, gerinim ölçer sensörleri ve elektro-aktif aktüatörler kullanan bir kutupsal yerleştirme stratejisi önerilmiştir. Glaser ve Nachtigal (1979) torna ve delik işleme operasyonlarında tırlamayı kontrol etmek için ileri besleme yaklaşımını bir kontrolör kullanmışlardır. Anlık iş mili hızı değişikliğinin sağlanabilmesi için aktif kontrolü, iş mili tahrik sistemine entegre ederek çalışmalarını sürdürmüşlerdir. Bu maksatla yüksek torklu bir iş mili hızına, iş mili hızını artırmak için geniş bir genlik ve frekans aralığına ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir.

Wang ve Fei (2001) ve Segalman ve Butcher (2000) yaptıkları çalışmalarında tırlamayı bastırmak için yarı aktif bir yöntem olarak akıllı sıvıları (elektroreolojik veya manyetoreolojik sıvılar) kullanmışlardır. Delme operasyonunda kullanılan katerin sertliğini ayarlayarak tırlamayı kontrol etmek için ise Nigm (1981) yaptığı

çalışmada elektrik akımı uygulandığında elektroteoloji özelliklerinin değişimine dayalı kuvveti kontrol sistemi kullanmıştır.

Pasif kontrolde titreşimi sönmölemek için ek kütle sisteme dâhil edilir. Tobias (1961) titreşen bir kesme sisteminin sönmöleme kararlılığını arttırmak için çalışmasında, sönmöleyici ve yapı arasında oransal olarak mümkün olduğunca büyük sönmöleyici kütesinin kullanılması gerektiğini ifade etmiştir. Bu sayede oluşacak dinamik hareket genliğinin minimum seviyede kalacağı belirtilmiştir. Semercigil ve Chen (2002), yine Liu ve Rouch (1991) frezelemede ve Sims (2007) torlamada tırlamayı azaltmak için optimum pasif dinamik sönmöleyici önerilerinde bulunmuşlardır. Ema ve Marui (2000) ise delme prosesi esnasında oluşan titreşimi pasif metod ile minimize etmiştir.

1.2. İş Mili Hızı Kontrolü

Kesme sırasında titreşimi önlemek için kullanılan takım tezgâhının uygun olan iş mili hızı seçimi ve iş mili hızı modölyasyonu kullanılabilir. İş mili hızı seçimi, dinamik sistem bilgisinin veya önceki kesme verilerinin, iş mili hızını ayarlayarak tırlama stabilitesini iyileştirmek için kullanıldığı çevrimdışı bir tekniktir. İş mili hızı modölyasyonu ise iş mili hızı veya kesme koşulları manipölasyonuna dayalı çevrimiçi bir tekniktir.

Çevrimdışı teknik, iş mili tasarımını geliştirerek titreşim kararsızlığını azaltmak için uygulanabilir. Özellikle yüksek hızlı kesme ile işleme sırasında iş mili hızı değişiminin, kesme performansını titreşimin başlayacağı frekanslardaki çalışma hızlarına kadar olumlu yönde

etkileyeceği ifade edilmiştir. Tlusty (1985) tarafından ileri sürülen yapısal modifikasyonun dikkate alındığı çevrimdışı teknikte ise deneysel sonuçlar ya da sayısal tahminler kullanılarak kararlı bölge sınırında kesmenin yapılabileceği önerilmiştir. Wang ve Lee (1996) tarafından susnulan çalışmada, yüzey frezeleme işlemlerinde kesici hareketlerinin kararlı hale getirilebilmesi için fener mili rijitliğinin artırılması ve daha büyük çaplı yataklamaların kullanılması önerilmiştir. Tırlamanın azaltılarak kararlı kesme koşullarının oluşturulabilmesi için yapılan optimizasyonda kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği parametreleri dikkate alınmıştır. Chiou ve ark. (2003) parametreleri önceden belirlemek ve değiştirmek için bir eşdeğer sistem yapısı kullanılmıştır. Ancak burada, takım tezgâhlarındaki mod şekli değişiklikleri meydana geldiğinde kesme kuvveti değişiminin de gerçekleştirebilmesi için kapsamlı bir bilgisayar simülasyonuna gerek olduğunu belirtilmişlerdir.

İş mili hız modülasyonu tekniği, tırlamayı önleme için çevrimiçi bir yöntemdir. Bu teknik, tırlama algılandığında kesme hızını etkiler ve radyal veya aksenal kesme derinliğini azaltır. Altıntaş ve Chan (1992) devir sınırlaması kullanılmasıyla kesme sürecinin kararlı hale dönüşeceğini ifade etmişlerdir. Kurdi ve ark. (2004) kararlı kesme bölgesinde işleme yapabilmek için talaş kaldırma oranını ve yüzey konum hatasını aynı anda optimize ederken iş mili hızı ve kesme derinliği için uygun kesme değerlerini seçmek için analitik bir tahmin aracı olarak zamana bağlı sonlu elemanlar analizi kullanmışlardır. Benzer olarak, frezeleme ve delme işlemlerinde en kararlı kesme şartı

için mil hızı ve faz açısı farkının 90 derece olması gerektiği Tarng ve Lee (1997), Sridhar ve ark. (2001), Tsao ve ark. (1993), ve Liao ve Young (1996) tarafından da önerilmiştir. Ancak, kesme kuvveti ve iş mili hızından gelen sinyalin aynı anda izlenmesi için hızlı bir hesaplama işlemcisinin gerekliliği yapılan çalışmaların genel sonucu olarak sunulmuştur. Lin ve ark. (1990) yüzey frezelemede değişken hızı kontrol etmek için nominal iş mili hızı ve frekansı dikkate alınarak bir iş mili servo sistemi önermişlerdir. Günümüz bakış açısıyla yukarıda bahsedilen iş mili hızı değişimine dayalı oluşturulan titreşim önleme tekniklerinin, dönen parçaların ataletleri dikkate alındığında, ani iş mili hız değişiminin motorlara zarar verebileceği, sınırlı güce ve torka sahip tezgâhlar için pratik olmayacağı düşünülmelidir. Bir başka bakış açısına göre; Sim ve ark. (2002) ve Delio ve ark. (1992) kesme esnasında oluşan sesi bir mikrofonla algılayarak baskın titreşim frekansını saptayarak analiz etmişlerdir. Bu sayede yüksek titreşimin olduğu frezeleme işleminin ses sinyalini kullanarak sistemin kararlı kesme aralığında çalışabilmesi için keme parametrelerini optimize etmişlerdir. Ancak Sim ve diğ. Şiddetli titreşimi algılayabilmek için kullandıkları sistemde varolan arka plan gürültülerinin elimine edilmesi gerektiğini ileri sürmüşlerdir.

1.3. Alternatif Metotlar

Yukarıda belirtildiği şekilde titreşimi engellemenin yollarından biri olan iş mili hızının istenilen parametrelerde kullanılmasını tezgâhların mekanik sınırları engelleyebilir. Bu kısıtlamadan dolayı araştırmacılar takım geometrisi ve takım yolu üzerine çalışmalara yönelmiştir.

Titreşimi kontrol altına almak ve istenilen seviyelerde tutmak imalatta en önemli hedeflerden biridir. Bunun için araştırmacılar özel geometri takımlar kullanarak birçok araştırma yapmışlardır. Hashimoto ve ark. (1996) frezeleme işleminde boşluk açısını (relief angle) ve kesme kenarı yarıçapını değiştirerek tırlama titreşiminin azaltılmasını incelemişlerdir. Xiao ve ark. (2006), Mei ve ark. (1994) ve Liu ve Liu (1985) tornalama operasyonu esnasında oluşan titreşimleri bastırmak için takım geometrisi kontrolü kavramını önermişlerdir. Eğim açısı ve boşluk açısının kararlılık sınırı üzerindeki etkisini incelemişler, artan takım eğimi ve azalan takım boşluk açısının titreşimi engellediğini gözlemlemişlerdir.

Tornalama proseslerinde kesici uçlardaki talaş ve boşluk açılarını değiştirmek, freze proseslerinde parmak freze ve tarama kafalarında helis açısını değiştirmek ile aynı sonuçlara ulaşmak hedeflenir. Zatarain ve ark. (2006) parmak frezelerde helis değişiminin titreşim frekanslarına etkisini gösteren bir yöntem geliştirmişler ve sonuçları yarı ayrıklaştırma yöntemi kullanarak analiz etmişlerdir. Özellikle yüksek iş mili hızlarındaki düşük radyal derinlikler kullanılarak yapılan kesme işlemlerinde helis açısı değişiminin, periyodun artması nedeniyle kararsızlığa neden olduğunu göstermişlerdir. Patel ve ark. (2008) zamana bağlı sonlu elemanlar analizini kullanarak Zatarain ve ark. (2006) kuvvet modelini tanımlamak için karmaşık Fourier serisi modeli uygulamışlar ve düşük radyal derinliklerde değişen helis açısının etkisini ortaya koymuşlardır.

Frezelemede titreşimi bastırmada helis açısını değiştirmenin yanı sıra, değişken hatve kullanımının da önemli rol oynadığı literatürde ifade edilmiştir. Slavicek (1965) değişken hatve özellikli takım kullanarak yaptığı çalışmasını, Tlusty'nin ortogonal kesme modelinde sabit titreşim genliğine sahip takımın doğrusal hareketi ve sabit kesme derinliği varsayımıyla titreşim değerlerini ölçme ve kıyaslama yaparak gerçekleştirmiştir. Daha sonra, Opitz ve ark. (1966), Altıntaş ve ark. (1999), Budak (2003), Olgaç ve Sipahi (2007), Stone (1970), Varterasian (1971), Tlusty (1978), Slavicek'in (1965) araştırmasına paralel olarak değişken adımlı takımların devir sayısı aralığı, doğal frekans, diş sayısı ve hatve oranı dikkate alınarak geniş bir aralıkta takım performanslarını incelemişler ve değişken adımlı takımında, faz açısı 90°'ye kaydırıldığında yüksek kesme derinliklerinde daha kararlı bir yapı olduğunu göstermişlerdir.

Elbestavi ve ark. (1994) salgı faktörünü ihmal ettikleri dinamik işleme şartlarında süreç sönümlenme modeli oluşturmuşlardır. Takım helis açınının, kesme bölgesinden talaşı uzaklaştırmaya yardımcı olduğunu ve titreşim kararlılığını iyileştirmek için süreç sönümlenmeye (process damping) katkısı olduğunu çalışmalarında göstermişlerdir. Turner ve ark. (2007) düşük iş mili hızlarında gerçekleştirilen talaş kaldırma esnasında düzensiz aralıklarla yerleştirilmiş dişlere sahip takımların oluşturdukları kesme frekanslarının titreşimi sönümlenme hususunda değişken helisli takımların davranışını sergilediğini çalışmalarında ifade etmişlerdir.

Weck ve ark. (1994), bilgisayar destekli tasarım aracına dayalı otomatik kesme için titreşim içermeyen takım yolu yaklaşımı önermişlerdir. Eksenel veya radyal kesme derinliğini ayarlamak için Sayısal Kontrol kullanan bir takım yolu stratejisi gereklidir ancak belirli bir takım ve iş parçası ile sınırlıdır. Weck'e benzer şekilde, Ariffin ve Worden (2004) ve Smith ve Dvorak (1998) ince cidarlı bir iş parçasını işlerken yenilenebilir tırlamayı önlemek için bir takım yolu stratejisi önerdi. FRF'nin gerçek kısmının büyüklüğünü azaltmak ve daha yüksek kesme derinliklerinde kesmeye izin vermek için iş parçası sertliği artırıldı. Smith ve ark. (1998) sapma iş parçası Sonlu Elemanlar Metodu kullanılarak değerlendirilmiştir ve bir uygunluk fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Genetik Algoritma, eleman dizisi girdi olarak sağlandı ve Sonlu Elemanlar Metodu, veri yoluyla iletişimin değiş tokuş edildiği makinede işlenmiş elemanın sapmasını hesapladı. İşlemler, optimal sıra veya takım yolu elde edilene kadar tekrarlandı. Sonlu Elemanlar Yöntemi, Genetik Algoritma veya başka bir optimizasyon algoritması ile birleştirilebilse de, bu yöntem, optimum yolu belirlemek için yüksek performanslı bir işlemci ve hesaplama zamanı gerektirir.

Yüksek talaş kaldırma sırasında titreşimi kararlılık sınırlarında tutabilmek için takımların geometrisi üzerine yapılan çalışmalarda değişken diş adımı ve ya değişken helis açılarının önemi görülmektedir. İmalatta istenmeyen bir durum olan titreşimi kontrol altına alabilmek için iş parçasına uygun takım geometrisi ve işleme parametreleri seçilmelidir. Bu doğrultu da titreşimi kararlılık sınırında

tutacak yöntemler tespit edilmeli ve kesici takımların geometrik yapısı belirlenerek uygun bir optimizasyon çözümü ile talaş kaldırılmalıdır.

2. TALAŞ KALDIRMA İŞLEMLERİNDE OPTİMİZASYON

Kaba veya ince talaş kaldırarak yapılan frezeleme işlemlerinde bir önceki bölümde değerlendirilen literatürlerden yola çıkarak dikkate alındığı ifade edilen genel işlem parametreleri; aksel kesme derinliği, radyal kesme derinliği, iş mili hızı, kesme hızı ve talaş genişliğidir. Bu parametrelerinin uygun değerlerde seçilmemesi takım tezgâhları ve kesme sistemi arasındaki etkileşimler düşük üretkenlik, takım ömrü azalması, yüzey pürüzlülüğü değerinin artması, titreşim oluşması vs. gibi işleme sorunlarına neden olur. Bu sorunları çözmek için kesme parametre değerleri ve birbirleriyle olan etkileşimlerinin tümüyle dikkate alınması gereklidir. Ancak bu sayede talaşlı imalat süreçlerinde yüksek verimlilik, kalite ve daha yüksek kâr rakamlarına ulaşmak mümkün olabilir. Bu maksatla ideal parametre kombinasyonlarının eldesine yardımcı olan optimizasyon teknikleri kullanılabilir. Bu bölümde imalatta hata gidermeye yönelik literatürde varolan çeşitli metot ve yöntemler sunularak titreşimi kontrol altında tutmaya dair optimizasyon uygulamaları açıklanmıştır.

2.1. Optimizasyon Yöntemleri

İmalat süreçlerinde genel olarak kullanılan optimizasyon süreçleri üç temel parametre içerir. Bu parametreler amaç fonksiyonu, bir dizi bilinmeyen veya değişken ve kısıtlamalar olarak ifade edilir. İşleme

problemleri, amaç fonksiyonlarına bağlı kısıtların dikkate alındığı parametrelerin optimizasyonu yapılarak çözülebilir.

Talaş kaldırma işlemleri için bilgisayar destekli optimizasyon yöntemleri geleneksel, modern ve akıllı yöntemler olarak sınıflandırılabilir. Yöneylem araştırması veya geleneksel yöntemler Geometrik Programlama, Dinamik Programlama ve Sıralı Kuadratik Programlamadır. Ancak geleneksel yöntemler türev tekniğine dayanmaktadır. Bu teknik uygulama açısından oldukça karmaşık bir tekniktir. Bu nedenle Taguchi Metodu, Cevap Yüzey Metodolojisi gibi istatistiksel yöntemler uygulanarak sorunların üstesinden gelmek daha hızlı ve pratik olmaktadır (Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006).

Abuelnaga ve El-Darddiry (1984) işlemedeki optimizasyon problemlerini çözmek için matematiksel yaklaşımları (Geometrik Programlama, Dinamik Programlama ve Sıralı Kuadratik Programlama) incelerken, Aggarwal ve Singh (2005) sadece geleneksel ve en son teknolojiye göre tornalamadaki optimizasyon problemlerini derlemişlerdir. Bu arada Mukherjee ve Ray (2006), mevcut araştırmalarda kullanılan optimizasyon yöntemlerinin avantajlarını ve dezavantajlarını gözden geçirmiştir. Buna karşılık Tablo 1, literatürde yer alan imalat sorunlarını problemler, teknikler ve parametrelerle optimizasyonu olarak özetlemektedir (Tablo 1, Yusoff, A. (2010) çalışmasından faydalanılarak düzenlenmiştir).

Tablo 1. Optimizasyonda kullanılan problemlerin, tekniklerin ve parametrelerin işleme sorunları

N	Problem	Teknik	Genel Olarak Kullanılan Parametreler
1	Üretim Maliyeti / Zaman verimlili ği	Genetik Algoritmalar [89-91] Simulated Annealing [92] Sıralı Kuadratik Programlama [85,93, 94] Spesifik algoritmalar [95] Hill Climbing [89] Memetik Algoritma [89]	Makine gücü [89-91, 93, 95] Talaş genişliği [89, 91-93, 95] Kesme kuvveti [89, 95] Yüzey pürüzlülüğü [89-91] Takım ömrü [92] Kesme hızı [90-93, 95] İş mili hızı [89, 90] Eksenel kesme derinliği [85, 90-94] Radyal kesme derinliği [94]
2	Talaş Kaldırma Oranı	Dinamik Programlama [96] Yapay Sinir Ağı [97] Sıralı Kuadratik Programlama [98] Geometrik Programlama [99] Spesifik Algoritma [100]	Talaş genişliği [96, 97, 99, 100] Kesme hızı [97, 99] Eksenel kesme derinliği [97] Radyal kesme derinliği [97] Takım ömrü [99] Makine gücü [99] Yüzey pürüzlülüğü [98]
3	İnce Talaş Kaldırma	Genetik Algoritmalar [101-103] Diferansiyel Evrim [83] Taguchi Yöntemi [104] Cevap Yüzey Metodolojisi [102] Deneysel Tasarım [101, 105] Spesifik algoritmalar [106]	Talaş genişliği [101-106] Kesme hızı [101-105] Mil hızı [103] Eksenel kesme derinliği [83, 101-105] Radyal kesme derinliği [102, 104,105]
4	Takım Ömrü	Spesifik algoritmalar [107]	Talaş genişliği [107] Kesme hızı [107] Eksenel kesme derinliği [107]

5	Tırlama	Genetik Algoritmalar[70] Hill Climbing [11, 108] Spesifik algoritmalar [5, 12, 86, 88, 109,110]	Malzeme kaldırma oranı [86, 110] İş mili hızı [5, 11, 12, 86, 88, 108-110] Hız kesmek Eksenel kesme derinliği [11, 12, 86, 88, 108-110] Radyal kesme derinliği [86, 110] Faz açısı [11, 108] Chatter frekansı [5, 11, 108] Takım yolu [70] Adım açısı [5, 11, 12, 88, 108, 109]
6	Birleştiren Promlemler	Parçacık Sürü Optimizasyonu [51, 111] Sıralı Kuadratik Programlama [51,111-113] Genetik Algoritmalar [113-117] Spesifik algoritmalar [118-122] Taguchi Yöntemi [123, 124] Diferansiyel Evrim [84] Simulated Annealing [114] Dinamik Programlama [114] Tabu Search [115] Geometrik Programlama [125, 126]	Makine gücü [113, 114, 117-119, 122, 125, 127] Yüzey pürüzlülüğü [113, 116, 118, 119, 122, 127] Takım ömrü [113, 116] Kesme hızı [112-114, 116-119, 121, 123-127] İş mili hızı [51, 111, 119, 120] Eksenel kesme derinliği [51, 111-113, 116, 117, 123-125, 127] Talaş genişliği [112-114, 116-127] Radyal kesme derinliği [116]

İmalat süreçlerindeki işleme sorunları ürün kalitesi, üretkenlik, takım ömrü ve tırlama olarak sınıflandırılabilir. Genetik Algoritma, Diferansiyel Evrim, Dinamik Programlama gibi daha popüler optimizasyon yöntemlerinin kullanılmasına rağmen yapılan bu çalışmada, sağlamlığı ve diğer metodlardan daha az sayıda deney ve maliyet gereksiniminden dolayı değişken helis ve değişken adımı

optimize etmek için Taguchi metodu uygulanacaktır. Taguchi metodolojisi optimizasyon için araştırmacıların tercih ettiği yaygın bir metottür. Bu metodun tercih edilmesindeki sebep Taguchi'nin de belirttiği üzere çok sayıda deney gerektiren çalışmaların gerek zaman gerek kaynakların çok sayıda kullanılması ile oluşan kayıplar ve deney sonuçlarının hesaplanabilmesinde zorlukların önüne geçen bir metot oluşudur.

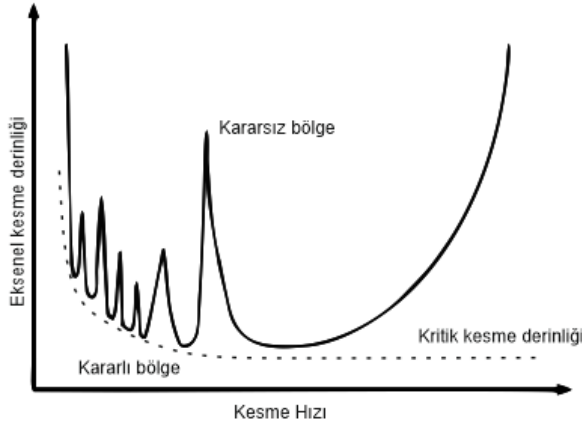
3.2. Tırlama Sönümlemede Optimizasyon

Kesmede oluşan titreşimler iş parçası ve takım malzemesi, tezgâh rijitliği, takım geometrisi ve kesme parametreleri gibi birçok faktörden etkilenir. Öte yandan çok ağızlı kesici yapısından kaynaklı periyodik kuvvet oluşturması nedeniyle meydana gelen çok serbestlik dereceli yapısal dinamikler frezelemenin kararlılık olgusunu tornalama ve taşlamadan daha karmaşık hale getirmektedir (Tlustý, 2000). Bu denli karmaşıklığın içerisinde ideal kesme koşullarının tespiti için Titreşimi sönümleyecek optimal parametre kombinsayonlarının belirlenmesi gerekir. Bu maksatla sürecin doğru analiz edilmesine imkan sağlayacak optimizasyon tekniğinin kullanılması talaşlı imalat için maliyet azaltıcı dolayısıyla rekabet gücü artırıcı etki yaratmaktadır.

Titreşim sorunu doğrudan iş mili rijitliği ile ilgilidir. Geometrisi optimize edilmiş uygun bir iş mili tasarımı, özellikle de titreşimsiz yüksek verimlilikte parça üretmek için gereklidir. Maeda ve ark. (2005) Sıralı Kuadratik Programlama kullanarak iş mili boyunca olan yatak dağılımını optimize etmişlerdir. Timoshenko kiriş teorisine

dayalı olarak iş mili hızının Frekans Tepki Fonksiyonunu (FRF) tahmin etmek için Sonlu Elemanlar Yöntemini uygulamıştır. Titreşim kararlılığı, kesme hızı ve eksenel kesme derinliği ile birleştirilerek elde edilen iş mili tahrik konfigürasyonu daha sonra tasarlamış ve optimize etmiştir. Rulman konumu FRF ve kanal sayısına göre değişen amaç fonksiyonuna maksimum kritik kesme derinliği dahil edilmiştir. Liu ve Rouch (1991), frezeleme işlemi için optimal bir pasif dinamik sönümleyici önermiştir. Pasif kontrolü gerçekleştirmeden önce dinamik kütle, yay ve damper gibi optimize edilmiş pasif elemanlarla sistemi kurmuştur. Amaç fonksiyonu, çok çeşitli iş mili hızlarında uygulanabilen optimum kritik kesme derinliği olarak seçilmiştir.

Titreşim kararlılığı, iş mili hızı fonksiyonunda kesme derinliği ile temsil edilir ve titreşimi en aza indirmek için optimize edilmesi gereken kesme işlemi parametrelerini içerir. Kurdi ve ark. (2004) TFEA yöntemini titreşimin kararlılık koşulu altında optimize edilmiş iş mili hızı ve kesme derinliğini kullanarak, yüksek talaş kaldırma oranı ve minimum yüzey konumu hatası elde etmişlerdir. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve Sıralı Kuadratik Programlama (SQP), Pareto ön yaklaşımı altında her seferinde tek bir hedefin çözüldüğü iki amaç fonksiyonunu aramak için uygulamışlardır. Her iki amaç fonksiyonu da kararlılık diyagramı öz değerlerinin parametresi ve kısıtlaması olarak iş mili hızını ve kesme derinliğini kullanmışlardır (Bkz. Şekil 2).



Şekil 2. Kararlılık diyagramının şematik gösterimi

Maksimum talaş kaldırma oranı, eksenel ve radyal kesme derinliğinin belirli kombinasyonlarında, iş mili hızı ve kesici sayısı sabitken elde edilebilir ve kesici takım değişiminin FRF'si ile ilgilidir. Budak ve Tekeli (2007) analitik yöntem ile titreşimi istenilen sınırlarda tutarak eksenel ve radyal kesme derinliğini optimize ederken malzeme kaldırma oranını maksimize etmişlerdir. Talaş kaldırma oranını en üst düzeye çıkaran ve aynı zamanda titreşim ve işleme süresini en aza indiren işleme sürecini optimize etmek için kendi algoritmalarını kullanmışlardır.

Kesici takımların geometrileri çeşitli yaklaşımlar kullanılarak düşük kesme kuvveti, yüksek malzeme kaldırma oranı ve hassas ürün oluşturmadaki tırlamaları azaltmak için optimize edilebilir. Örneğin, Altıntaş ve ark. (1999) yaptıkları çalışmada yenilenebilir faz açısı 90° 'ye kaydığında eksenel kesme derinliğinin maksimize edilebileceğini vurgulamışlardır. Faz açısı farklı iş mili hızı, tırlama frekansı ve kesme derinliği kullanıldığında değişir. Buna göre

çalışmalarında değişken hatve açılarını optimize etmek için titreşimi en aza indiren belirli iş mili hızı ve tırlama frekansı dikkate alınarak manuel bir matematiksel hesaplama uygulamışlardır. Benzer olarak değişken adımlı araçları kullanarak Shirase ve Altıntaş (1996) kuvvet ve konum hatasını en aza indirmişlerdir. Titreşimi engellemek için yapılan, kesici takımın diş adım aralığını optimize çalışmalarını faz açısının kısıtladığını ortaya koymuşlardır.

Bu arada Budak (2003) bir analitik kararlılık modeli ile sabit olmayan hatve açısına bağlı kesici modeli geliştirmiş ve süreci optimize etmiştir. Stabilite ve eğim varyasyonundan optimum helis açılarını belirlemek için Tepe Tırmanışına dayalı basit bir denklem kullanmıştır. Doğrusal olmayan varyasyonun takım imalatında zorluklara neden olacağını belirterek yerine daha yüksek stabilite sağlayan doğrusal adım varyasyonunu tercih etmiştir. Bu nedenle, sabit kesme derinliğinde hatve açılarını optimize etmek için iş mili hızı ve titreşim frekansını kullanmıştır. Faz farkı ve tırlama frekansı, daha yüksek stabilitenin elde edilmesini sağlamak için kısıt olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak değişken hatveli kesici düşük hızlı işleme için uygun bulunmuş, bu sayede kesme kuvvetinin azaltılabileceğini ifade edilmiş ancak kesici üretim maliyetinin artıracığını tespit etmiştir. Daha ötesinde ise bu yaklaşımın belirli bir adım değişikliğinde, yalnızca sınırlı bir frekans ve hız aralığına uygun olduğu kanaatini belirtmiştir.

Olgac ve Sipahi (2005) yaptıkları çalışmalarında karakteristik köklerin küme işleme (CTCR) algoritmasını kullanarak düzensiz hatveli bir

kesici ile eşzamanlı işlemede talaş kaldırma oranını maksimuma çıkarmışlardır. Kullanılan algoritma belirli aksel kesme derinliğinde ve iş mili hızında kararsız değişken hatveyi optimize etme yeteneğine sahiptir. CTCR Karakteristik denklemi, zaman gecikmelerini kullanarak kanal sayısına, iş mili hızına ve farklı kesme derinliğine bağlıdır. Değişken hatveli kesicilerle yapılan talaş kaldırma işlemlerinin optimal olması için, Altıntaş ve ark. (1999) tarafından bildirildiği gibi, özellikle küçük açılarda meydana gelen talaş tahliyesi olgusu dikkate alınmalıdır. Olgaç ve Sipahi (2007) aynı yaklaşımı 6 ağızlı bir kesici ile gerçekleştirmişler ve yaptıkları çalışmadaki deneysel sonuçları benzer çalışmalarla kıyaslamışlardır.

Talaş kaldırma işlemlerinde optimizasyon metotları kesme koşullarının modellenmesinde sistematik bir yaklaşım sunar. Bu sayede mevcut problemlerin karmaşıklığı, problemin hassasiyeti, veri toplama ve analizi gibi zorlu süreçlerin aşılmasında araştırmacılara büyük faydalar sağlamaktadır. Talaş kaldırma işlemlerinde uygulanan süreç optimizasyonu sayesinde kesme parametrelerinin optimal ve optimale yakın değerlerin bulunması, imalatta hem ürün hem işleme kalitesinde iyileştirilmesinde yüksek bir potansiye sahiptir.

Yukarıda verilen literatürde de değinildiği gibi titreşimden kaçınmak amacıyla birçok modelden faydalanılmıştır. Bu çalışmada daha önce üzerinde durulmamış bir yöntem olan Taguchi metodu kullanılarak imalat sürecinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Taguchi metodolojisi optimizasyon için araştırmacıların tercih ettiği yaygın bir metottur. Bu metodun tercih edilmesindeki sebep Taguchi'nin de belirttiği üzere çok sayıda deney gerektiren çalışmaların, zaman ve kaynak harcanması bakımından gerçekleşmesi muhtemel kayıpların ve deney sonuçlarının analizinde zorlukların önüne geçen robust bir metot oluşudur. Bu metotta belirlenen girdiler için sistemin serbestlik derecesine göre ortogonal diziler önerilir ve girdiler formulüze edilir, ardından değişkenlerin ve amaç fonksiyonlarının seçimi (S/N oranı) ile metot kurgulanmış olur. Amaç fonksiyonları “ne kadar küçükse o kadar iyi”, “ne kadar büyükse o kadar iyi” ve “nominal daha iyi” olmak üzere kullanılır (Kılıçkap, E., 2010). Taguchi metodu ile kurgulanan çalışmaların tasarım güvenilirliği, sonuçlarının doğruluk oranının yüksek olması ve maliyet tasarrufu gibi avantajlar sağladığı literatürde de sıklıkla değinilmiştir (Dutta ve Narala, 2021).

3. TAGUCHI YÖNTEMİ

Kalite ve verimin ön plana çıktığı üretim şekillerinde iyileştirmeler yaparak mevcut kaynakların en doğru biçimde kullanılması bir gerekliliktir. Günümüzde teknolojinin getirdiği avantajlarda göz önüne alınırsa ölçme, görüntüleme ve analiz tekniklerinin gelişmesi ile üretime olumlu ya da olumsuz etki eden durumların tespiti giderek kolaylaşmaktadır. Üretime etki eden olumsuz etkileri ortadan kaldırarak en iyi şekilde üretimi gerçekleştirmek için iyileştirme çalışmaları yapılması gerekir.

Talaşlı imalatta iyileştirmeler yapılırken belki de ena çok dikkat edilmesi gereken konu üretime etki eden faktörler ve faktörlerin birbirlerine olan etkileşimleridir. Bunun için yapılacak olan iyileştirme çalışmasında hangi faktörün ne kadar etkisinin olduğunun tespiti maksatlı bir dizi deney gerçekleştirilmelidir. Temel olarak deney tasarımı yöntemleri 20. yüzyıl başında tarımsal araştırmalarda kullanılarak Fischer tarafından geliştirilmiştir (Montgomery 2001, Yang ve Tarng 1998). Fischer'a göre deney sayısı, onu etkileyen faktör sayısı ile doğru orantılı olarak artış gösterecektir. Bu, istenmeyen bir durum olsa bile deneysel olarak ideal kombinasyonların tespiti için çok sayıda deney yapılması zorunda kalınmaktadır. Bu nedenle, az sayıda deney ile optimum işleme şartlarını belirlemek için deneysel sonuçlara Taguchi, Cevap Yüzey Metodu (Response Surface Methodology) gibi farklı optimizasyon teknikleri uygulanmaktadır (Özel ve ark., 2007; Göloğlu ve ark., 2009; Çiçek ve ark., 2015). Dr. Genichi Taguchi uzun yıllar yaptığı çalışmalar sonucunda, çok az deneme ile çok iyi neticeler veren ortogonal dizileri geliştirmiştir. Ortogonal diziler, belirlenen faktör seviyelerinin herbir değeri için deney yapmak yerine eş zamanlı olarak faktör seviyelerini değiştirerek deney sayılarında azalmayı kolaylık olarak sunmuştur.

Taguchi kaliteyi, bir ürünün istenen kalite düzeyine ulaşmaması durumunda yaşanan her tür kayıp olarak tanımlar. Daha kaliteli bir ürün elde etmek isteniyorsa ürünün müşteride yaratacağı zararın minimum olacak doğrultuda iyileştirmeler yapılması gerekmektedir

(Abuelnaga ve El-Dardiry, 1984). Taguchi metodu, maliyeti düşük olmanın yanında süreç ve sistem tasarımında ürünü performans açısından iyi seviyelere getiren bir problem çözücüdür. Taguchi metodu, toplam performansta önemli miktarda iyileştirme yapmak için sonuçlar üzerinde etki oranı yüksek olan parametreleri belirleyip deneysel ve analitik kavramları birleştirir. Bundan dolayı Taguchi metodu az miktarda deney yaparak tüm prosesi içerecek bir çalışma yapmak için ortogonal dizilerin özel bir tasarımını kullanmaktadır (Dhanapal, P., Mohamed S.S., 2010).

Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen Taguchi tasarımı, üründe ve proseste, değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçerek, ürün ve prosesteki değişkenliği en aza indirmeye çalışan bir deneysel tasarım metodudur. Bu metod; ürünlerin kalitesinin iyileşmesinde etkili olmasının yanı sıra, kalite geliştirmede çok daha az deneme ile daha iyi sonuç alma imkanını vermektedir (Canyılmaz E., 2001; Ross, 1989). Bunun yanında felsefe olarak, kalitenin tasarım ve proseste sağlanmasını öngörmektedir (Genichi ve Clausing 1990).

Taguchi felsefesini özetlemek gerekirse:

- İşletmenin rekabetçi piyasa da yer edinebilmesi için ürünün ve ya prosesin kalitesini arttırmalı, maliyeti düşürmeli ve hızlı hareket edilmelidir.

- Sürekli kalite geliştirme programı ile hedeflenen değerlerin dışında kalan sapmalar minimize edilmelidir.
- Ürünün nihai kalitesini etkileyen faktörler tasarım ve üretim süreçlerinde belirlenmeli ve mümkün oldukça bu faktörlerden bağımsız tasarımlar ve üretim gerçekleştirilmelidir.
- Kaliteyi belirleyen faktörlerdeki sapmaları meydana getiren parametrelerin lineer olmayan etkileri kontrol altına alınmalıdır.
- Kurgulanan deneyler ürüne ait performans saplamalarını indirmek için kullanılır (Canıyılmaz, 2001).

Bu metotta faktör seviyelerinin tespit edilmesinde; gözlem yöntemi, sıralama yöntemi, sütun farkları yöntemi, varyans analizi yöntemi ve faktör etkilerinin grafiksel gösterimi yöntemlerinden birisi uygulanmaktadır (Ross, 1989).

Taguchi, deney tasarımında analiz değişkeni ya da verimlilik kriteri olarak kullanılması sebebi ile, “sinyal/gürültü oranı (S/N)” denilen bir kriter oluşturulmuştur (Taylan, 2009; Şirvancı, 1997). Elde edilen S/N oranları herhangi bir analiz yöntemine tabi tutularak optimal değerler bulunur (Işık, 2000).

Ölçülmek istenen gerçek değere sinyal, ölçülen değer içindeki istenmeyen kısım ise gürültü değeri denmektedir. Ayrıca, gürültü faktörleri, ürünün belirlenen hedeften sapmasına neden olan değişkenler olarak da bilinmektedir. Bu sebepten dolayı, gürültünün sistem üzerindeki etkisinin mümkün olduğunca azaltılması gerekmektedir (Kasman, 2009).

Taguchi yönteminde üç farklı farklı amaca uygun kalite fonksiyonu bulunmaktadır. Bu fonksiyonlar sırasıyla;

- En küçük en iyi
- En büyük en iyi
- Hedef değer en iyi

olmak üzere 3' e ayrılmaktadır. Her üç durumda da hedef, S/N oranının maksimum seviyede olmasını sağlamaktır. S/N oranının yüksek olması sinyal seviyesinin gürültü faktörlerinin oluşturduğu etkiye oranla fazla olduğunu göstermektedir. Taguchi'ye göre, S/N oranlarının maksimize edilmesi, bir yandan sinyali arttırırken, diğer yandan da varyasyonu azaltmaktadır (Fowlkes ve Creveling, 1995; Canıyılmaz, 2001). Herhangi bir ürünün tasarımında sinyal/gürültü oranı yüksek ise sonuç daima optimum kaliteyi ve minimum değişimi verir. Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiş olan güçlü tasarım kavramı ile tasarım faaliyetlerine odaklanarak, düşük maliyetle, ürün ve süreç performanslarının artması hedeflenir. Temel felsefesi, kalitenin tasarım aşamasında ürün veya prosese kazandırılmasıdır (Aydın, 1994). Yukarıda bahsedilen kalite fonksiyonları aşağıda detaylandırılmıştır.

En Küçük En İyi;

Böyle durumlarda, kalite değişkeni “y” için hedeflenen değer sıfırdır ve negatif yönde bir sapma göstermez. Daima alt sınırın olması istenir. Tolerans azaldıkça durumda iyileşme artar. Bu duruma örnek olarak yüzey pürüzlülük değeri verilebilir. Yüzey pürüzlülüğü ne kadar

küçük ise hedefe o kadar yaklaşmış olur. Bu tür durumlarda S/N oranı şöyle tanımlanmaktadır;

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

En Büyük En İyi;

Böyle durumlarda kalite değişkeni “y” için hedeflenen değer sonsuzdur yani değişkenin bir üst sınırı yoktur ve dolayısıyla hedef değer de yoktur. Ölçü büyüdüğü zaman verimlilik artacaktır. Buna örnek olarak malzemelerin dayanıklılık değerleri verilebilir. Malzeme dayanıklılık değeri ne kadar büyük olursa istenilen sonuç değere o denli yaklaşmış olur. Bu durum için S/N oranı aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1/y_i^2 \right) \quad (2)$$

Hedef değer en iyi;

Bu durumda “y” için belirlenen bir hedef değer vardır ve sapmalar çift taraflı olarak değişebilir. Dolayısıyla iki taraflı tolerans söz konusudur. Buna bir örnek olarak boyut kriterleri verilebilir. Nominal değer etrafındaki toleranslar saptanırken Taguchi'nin kayıp fonksiyonundan faydalanılır. Çünkü tolerans tasarımı ekonomik analizler sonucunda kalite kayıplarını ölçmektedir (Canıyılmaz, 2001). Bu durum için sinyal/gürültü oranı aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (4)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (5)$$

Eşitliklerde; y_i : Performans yanıtının i . gözlem değerini, n : Bir denemedeki test sayısını, \bar{y} : Gözlem değerlerinin ortalamasını, s^2 : Gözlem değerlerinin varyansını ifade etmektedir (Aydın, 1994).

3.1. Taguchi Deney Tasarımı Aşamaları

Taguchi metodunun uygulama işlemleri sırasıyla aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

- a) Problemin tespiti ve hedeflerin tanımlanması
- b) Kaliteye etki eden faktörlerin ve etkileşimlerin belirlenmesi
- c) Uygun ortogonal dizinin seçimi
- d) Deneylerin yapılması ve sonuçların kaydedilmesi
- e) Veri analizi ve kontrol edilebilen değişkenlerin en iyi değerlerinin belirlenmesi
- f) Doğrulama deneyinin yapılması

3.2. Problemin Tespiti ve Hedeflerin Tanımlanması

Yapılması planlanan çalışmaların en önemli basamağı, ileriki süreçlerde karşılaşılabilecek sorunların veya şikâyetlerin tespiti belirlenerek tasarım aşamasında bu problemlerin önüne geçecek önlemler alınmasıdır. Aksi takdirde hatanın telafisi zaman ve maddi kayıplara sebep olur. Problemlerin tespiti ve giderilmesinde müşteri fikirleri ve geçmiş deneyimlerden faydalanılarak oluşabilecek

problemlerin de önüne geçilmesi gerekmektedir. Yapılan görüşmeler sayesinde problem daha belirgin şekilde anlaşılacağı gibi son kullanıcı üzerinde hata kaynaklı itibar kaybının da önüne geçilmiş olunur.

Yapılacak bu ön çalışmaların amacı işletme taraflı düşünülecek olunursa, verimi arttırmak, müşteri memnuniyetini istenilen düzeyde tutmak ve ürünü en kısa süreçte bedeline dönüştürmektir. Bu hedefleri yakalamanın temeli ise kalite anlayışı ile gerçekleşmektedir. Kalite seviyesini yukarıda tutmak ve oluşabilecek istenmeyen durum çeşitliliğini en aza indirmek işletmelerin ön göremediği sorunları ortadan kaldıracaktır. Taguchi tasarımı hem kalite arttırılmak amaçlanır hem de kalitesizliğe sebep olacak etkilerin tespiti yapılarak gerekli optimizasyonlara kalite seviyesi arttırılmış olunur.

3.3. Kaliteye Etki Eden Faktörlerin ve Etkileşimlerin Belirlenmesi

Kalite seviyesinin tespiti için ölçüm teknikleri önem arz etmektedir. Kullanılan ölçüm metodlarının doğru seçilmesi ve uygulanması ile ürünün kalite seviyesi tespit edilir. Hedeflenen kalite seviyesini etkileyen faktörler tespit edilmelidir. Bu faktörler tespit edilirken tecrübe ve alanında uzman kişiler ile beyin fırtınası yapılmalıdır. Fikir alış verişi ve sebep-sonuç ilişkilerinin doğru kurgulanması ile beraber kaliteyi etkileyen faktörlerde iyileştirme yapılarak kalite hedeflenir. Bu faktörlerde kendi içinde iki kısımda incelenmelidir. Birincisi kontrol edilebilen faktörler, ikincisi ise kontrol edilemeyen faktörlerdir. Taguchi robust tasarımında da kontrol edilebilir faktörlerin sistem üzerindeki etkisi arttırılarak kontrol edilemeyen

faktörler kontrol altına alınmaya çalışılır. Böylece hataya sebep olacak varyasyon sayısı azalmış olur. Taguchi tasarımı sisteme doğrudan etki eden faktörler üzerine çalışmaktadır. Ancak sistemde birbirini etkileyen faktörler yer almaktadır. Örneğin kesici ucun aşınması ile tezgâhın kesme işleminde zorlanma ve sonucunda takım tutucuya zarar vermesi gibi sebeplere yol açabilir. Bu sebepten dolayı etkileşimlerin tespiti de önem arz eder.

3.4. Uygun Ortogonal Dizinin Seçimi

3.4.1. Ortogonal diziler

Ortogonal diziler hangi deneyde faktörün kaçınıcı seviyesinin tasarlandığı dizidir. İlk olarak Jacques Hadamard tarafından ortaya çıkarılmıştır. Ortogonal dizinin önemi belirlenen faktör ve seviye sayısının artması ile artan deney sayısını faktörleri beraber değiştirerek düşürmesi ile aynı sonuçları elde etmesidir. 2^k değişkenlerde deneysel kurgulanacak olursa tam faktöriyel oluşumu gereği 2^k tür deneyi yapılması gerekir. Burda dizinde yer alan satırlarda bir faktörü değiştirip diğer faktörleri sabit tutulacaktır. Taguchi' nin yaptığı çalışmalar sonucunda yaptığı deneme yöntemleri ile daha az sayıda deney ile aynı sonuçları elde edeceğini belirtmiştir. Örneğin yedi faktörün tespit edildiği bir tasarım için $2^7 = 128$ adet deney yapılmalıdır. Fakat Taguchi ye göre aynı sonucu elde etmek için 8 deneyin yeterli olacağını belirtmiştir.

Tablo 2'de 2 deney planı yer almaktadır. “1” ilk seviyeyi, “2” ise ikinci seviyeyi göstermektedir. 2^k dizaynında da gösterildiği gibi

birinci satırda altı değişken sabit tutulurken yedinci faktörde değişiklik yapılmıştır. Bu mantıkla tüm satırlarda değişkenler sıra ile denenerek toplamda 128 deney gerekir. Taguchi dizaynında ise ikinci aşamada birden çok faktör değiştirilmiştir. Böylece deney sayısı düşürülerek daha az deney sayısı ile aynı sonuçlara ulaşılmıştır. Bu yöntem ile hem maliyetten hem zamandan tasarruf edilmiştir.

Tablo 2. 2^k ve Taguchi dizaynı deney planları

Deneme No	Faktör No						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	2
3	1	1	1	1	1	2	1
4	1	1	1	1	1	2	2
5	1	1	1	1	2	1	1
6	1	1	1	1	2	1	2
:	:	:	:	:	:	:	:
128	2	2	2	2	2	2	2

2^k Dizaynı

Deneme No	Faktör No						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Taguchi Dizaynı

3.4.2. Ortogonal dizi seçimi

Ortogonal dizi seçimi seviye sayısı ve serbestlik dereceleri belirlenerek yapılır. Dizinin toplam serbestlik derecesi her bir faktörün serbestlik dereceleri toplanarak bulunur. Serbestlik derecelerinin hesaplama yöntemi aşağıdaki gibidir;

V_A : A faktörünün serbestlik derecesi

V_{A*B} : A ve B etkileşiminin serbestlik derecesi

k_A : A faktörü seviye sayısı

Faktör grubunun serbestlik derecesi ise toplam deney sayısından bir çıkarmakla bulunur.

V_T : Dizinin toplam serbestlik derecesi

N : Dizideki toplam deney sayısı

$$V_T = N - 1 \quad (6)$$

3.4.3. Deneylerin yapılması ve sonuçların kaydedilmesi

Ortogonal dizinin sütunlarına değişenler yerleştirildikten deney düzeneği kurulmuş olur ve testler gerçekleştirilmek için şartlar yerine gelmiş olur ve deneylerin sırası belirlenir.

3.4.4. Deneylerin yapılış sırası

Rassallaştırma yöntemi deneylerin yapılış sırasında en çok tercih edilen yöntemdir. Bu yöntemde deneyler belirli bir sıra ile yapılmaz çünkü rastgele sıra seçilerek olumsuz sonuçlanabilecek ihtimallerin önüne geçilmiş olunur.

Rassallaştırma farklı biçimde yapılabilir.

En çok kullanılan yöntemler;

- 1- Tamamen rassallaştırma,
- 2- Bloklar içinde tamamen rassallaştırmadır.
- 3- Basit tekrar (Canıyılmaz, 2001)

3.4.5. Deneylerin tekrarlanma sayısı

Deneyler en az bir kez yapılmalıdır. Eğer maliyet yüksek değilse deneyler tekrarlanarak ortalamalarda alınabilir böylece doğrulamalarda yapılmış olur. Fakat deney maliyeti yüksek ise test bir kez yapılabilir. Test sonuçları bilgisayar ortamında düzenlenmesi ve kaydedilmesi daha sağlıklı olmaktadır.

3.4.6. Veri analizi ve kontrol edilebilen değişkenlerin en iyi değerlerinin belirlenmesi

Optimum faktör seviyelerinin tespit edilmesi beş yöntemle kontrol edilir. Bunlar;

- 1- Sıralama metodu
- 2- Gözlem metodu
- 3- Varyans analizi metodu
- 4- Sütun farkları metodu
- 5- Faktör etkilerinin grafiksel gösterimi (FEGG) metodudur (Canıyılmaz, 2001).

3.4.7. Doğrulama deneyinin yapılması

Son aşamada en iyi koşullarda deneyler tekrarlanır. Bu deneyler sonucunda elde edilen veriler istenilen güven aralığında ise faktör-seviye kombinasyonu in iyi performansı veren kombinasyondur ve amaca ulaşmıştır. Fakat güven aralığında değilse deney tasarımındaki hatalar ayıklanır ve deneyler tekrar edilir.

Yapılan bu çalışmada varyans analizi kullanıldığından bu metot kısaca açıklamıştır.

3.5. Varyans Analizi

Nihai ürünün veya üretim süreçlerindeki yapılan geliştirmelerle performansın artması amaçlanmıştır. Deneylerin amacı da yapılan değişiklikleri denetlemek ve kaliteye etki eden parametrelerin tespitini yapmaktır. Deney sonuçlarının yorumlanmasında ve sonuçlara bağlı olarak performans artırma amaçlı kararların alınmasında varyans analizi (ANOVA) istatistiksel metotları kullanılmaktadır. ANOVA test sonuçlarının ortalama performansları arasındaki farkı ortaya çıkaran bir istatistiksel bir programdır. ANOVA toplam varyasyonu alt bileşenlerine ayıran bir matematiksel yöntemdir ve serbestlik derecesi, karelerin toplamı, ortalama kareler (varyans) vb. gibi değerlerin hesaplanmasında bu analiz paketinden faydalanılmaktadır. ANOVA analizi sistemde kontrol edilemeyen faktörlerin analizini yapmaktadır. Bu yöntem F testi adıyla da literatürde geçmektedir, F testi adı geliştiricisi Fisher'ın adının baş harfinden gelmektedir (Ross, 1988; Durmaz, 2008).

Faktör etkilerinin tespitinde ihtiyaç duyulan varyans analizi hesaplamalarında kullanılan kısaltmalar aşağıda gösterilmiştir.

SS_T : Tüm değerlerin kareleri toplamı

SS_A : A faktörü için kareler toplamı

SS_0 : Hata kareleri toplamı

V_T : Toplam serbestlik derecesi

V_A : A'nın serbestlik derecesi

V_{AXB} : A ve B interaksiyonunu serbestlik derecesi

V_0 : Hata varyansı

N : Elde edilen toplam veri sayısı

n_A : A faktörü için veri sayısı

T : Mevcut tüm verilerin aritmetik ortalaması

y_i : Gözlenmiş değer

k_A : A faktörünün kademe sayısı

3.5.1. Kareler toplamı

Toplam varyansta üç farklı varyasyonla karşılaşılır.

1. Performans karakteristiğini etkileyen faktörlere göre (A, B, C ...) varyasyon.
2. Bu faktörlerin etkileşimlerine göre varyasyon,
3. Hataya göre varyasyondur.

Eğer A ve B gibi iki faktör ve bu faktörler arasında bir etkileşim varsa toplam varyasyon aşağıdaki gibi yazılır.

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AXB} + SS_0 \quad (7)$$

$A \times B$, A ve B faktörleri arasındaki etkileşimi temsil etmektedir.

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^N y_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (8)$$

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (9)$$

Hata varyasyonu hesaplanırken, toplam kareler toplamından tüm faktörler ve etkileşimlerin kareler toplamını çıkarılmalıdır.

$$SS_0 = SS_T - SS_A - SS_B + SS_{AXB} \quad (10)$$

Ortogonal düzende sütunların toplam kareler toplamı SS_T 'yi vermektedir.

$$SS_T = \Sigma SS \text{ SÜTUN} \quad (11)$$

3.5.2. Serbestlik derecesi

Bir tanımlamada sonuca ulaşabilmek için yapılan bağımsız karşılaştırmaların sayısı serbestlik derecesinin sayısını vermektedir. ANOVA analizi için serbestlik dereceleri hesaplanmalıdır. İstatistiksel olarak serbestlik derecesi, verilerden elde edilen her bir parça bilgi ile ilişkilendirilmektedir (Ross, 1988). Kareler toplamında olduğu gibi serbestlik derecelerinin toplamı da toplam serbestlik derecesini verir (Durmaz, 2008).

İki faktör ve aralarındaki etkileşimler değerlendirilir ise:

$V_T =$ Toplam Serbestlik derecesi

$$V_T = V_A + V_B + V_{AXB} + V_0 \quad (12)$$

Toplam serbestlik derecesi deneme sayısının bir eksiğine eşittir.

$$V_T = N - 1 \quad (13)$$

Bir faktör ya da sütunun serbestlik derecesi de seviye sayısının bir eksiğidir.

$$V_A = k_A - 1 \quad (14)$$

$$V_B = k_B - 1 \quad (15)$$

Etkileşimin serbestlik derecesi ise etkileşen faktörlerin serbestlik derecelerinin çarpımına eşittir.

$$V_{AxB} = (V_A) * (V_B) \quad (16)$$

Hata serbestlik derecesi de; toplam serbestlik derecesinden tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik dereceleri çıkartılarak bulunur.

$$V_0 = V_T - V_A - V_B - V_{AxB} \quad (17)$$

Denemelerin tekrarları söz konusu olduğunda ise toplam serbestlik derecesi

$$V_T = \text{Deneme sayısı} \times \text{Tekrar sayısı} - 1 \quad (18)$$

3.5.3. Varyans

ANOVA analizinden çıkarılabilen bir değer tanımlayıcı istatistikte varyanstır. Hata varyansı, sıklıkla varyans olarak da belirtilir ve hata kareleri toplamının hata serbestlik derecesi ile bölümünden elde edilen değerdir.

V_e = Hata varyansı

$$V_T = \frac{SS_0}{V_0} \quad (19)$$

Hata varyansı, hata (kontrol edilemeyen) faktörlerden kaynaklanan değişimin ölçüsüdür ve deneylerdeki ölçüm hatalarını da içine almaktadır. Faktörler ve etkileşimlerinin varyanslarında aynı şekilde hesaplanmaktadır.

A faktörü için varyans:

$$V_A = \frac{SS_A}{V_A} \quad (20)$$

B faktörü için varyans:

$$V_B = \frac{SS_B}{V_B} \quad (21)$$

şeklinde bulunur.

Hata kareler toplamı ortogonal dizide değer yerleştirilmemiş sütunların toplam kareler toplamı olarak ifade edilir (Ross, 1988). Deneyler tasarlanırken sonucu etkileyeceğini düşünülen faktörün gerçekte bir etkisi olmadığı tespit edilebilir. Bu faktörlerin olduğu sütunların varyansları küçük değerde olduğu için daha önemli faktörler belirlenir fakat küçük değer veren varyanslar hata varyanslarının kestiriminde kullanılır. Hata varyansı için sütun tespitinde F-testi de yapılabilir. Önemli bir F oranı bulmak için etkili olan sütunu takip eden sütunlara F testi uygulanır. Uygulanan F testleri belirli bir oranı yakalayana kadar bu sütunlar birleştirilerek testlere devam edilir (Durmaz, 2008).

3.5.4. F testi

Testlerden sonra elde edilen veriler ve varyansların etkilerinin tespiti için F-testi uygulanır. Genellikle F-testi gerçekleştirilirken hataların bağımsız olduğu ve hataların eşit miktarda sapmalarla dağıldığı kabul edilir. F-testi uygulanırken analizden çıkan F değeri ile F tablo daki güvenli seviye oranları kıyaslanır ve Tablo daki orandan büyük ise F değeri performans üzerinde etkili olduğu bulunmuş olur.

F değeri faktör ve ya etkileşim varyansının hata varyansına oranıdır.

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} \quad (22)$$

3.5.5. % Dağılımın bulunması

Kareler toplamına göre yüzde dağılım yapılarak bulunur. $SS_T = \%100$ 'dür. Diğer faktör ve etkileşimlerin % dağılımları da kendi kareler toplamındaki orana göre değişmektedir. Hatanın % dağılımı da yine aynı şekilde bulunur (Küçük, 2017).

$$\%SS_A = \frac{100 \cdot SS_A}{SS_T} \quad (23)$$

5. DENEYSEL TASARIM

Bu tez çalışmasında frezelemedeki dinamik kesme şartları altında farklı kesici ağız yerleşimine sahip takımaların geometrisine bağlı olarak meydana gelen takım titreşimlerinin kesme performansına üzerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Bu maksatla deneyler için Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği

atölyesinde bulunan Sunmill JHV-550 CNC dik işleme tezgâhı (Şekil 3) kullanılmıştır. Kullanılan tezgâhla ilgili teknik veriler Tablo 3' de verilmiştir.

Tablo 3. Deneylerde kullanılan tezgâha ait teknik özellikler

Özellik	Açıklamalar
Tabla Ebadı	650 mm x 410 mm
Eksen Hareketleri	X eksen 550 mm, Y eksen 400 mm, Z eksen 460 mm
İş Mili Devri	1-15000 rpm
Spindle Motor	5,5/7,5 kW
İlerleme hızı	1-15.000 mm/min



Şekil 3. Sunmill JHV-550 CNC dik işleme tezgâhı

Fiziksel deneyler 100x100x25 mm (enxboyxyyükseklik) ebatlarındaki iş parçası yan yüzeyinden keme şeklinde gerçekleştirilmiştir. Deney için GGG50 küresel grafitli dökme demir (100x100x25 mm) ve SAE 4140 ıslah çeliği (100x100x25 mm) kullanılmıştır. Deneylerin benzer şartlar altında olması açısından her numunedeki işlenen yüzey üzerinden başlangıçta 1 mm derinliğinde talaş kaldırılmıştır.

Deneyde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşenleri aşağıda belirtilmiştir.

GGG50 dökme demir deney numunesinin kimyasal bileşimi (<http://www.matweb.com>)

%C	%Fe	%Si	%Mn	%S	%Mg	%P	Diğ.
3,7	94,2	3	0,30	0,02	0,07	0,08	

SAE 4140 ıslah çeliği deney numunesinin kimyasal bileşimi (<http://www.matweb.com>)

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Fe
0,43	1	0,30	0,03	0,04	1,1	0,25	0,40	97,8

Takım tucu olarak NIKKEN BT40-SK16-90 ve buna uygun NIKKEN SK16-10 pens kullanılmıştır. Takım tutucu ve pens görselleri Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir.



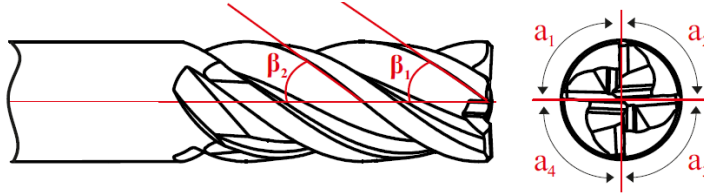
Şekil 4. NIKKEN BT40-SK16-90 takım tutucusu



Şekil 5. NIKKEN SK16-10 pens

Deneyler çapı 10 mm olan dört ağızlı ve farklı helis açlarına sahip üç farklı parmak freze kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan takım kodları Iscar EC-H4M 10-20W10CF-E72 900, Nachi AquaREVO MILL RWM4100G-2,5D ve YG SEME71100 10x10x25x75 4G MILL 4FL MULTIPLE HELIX END MILL olup takımlar sırasıyla Iscar, Nachi ve YG ticari satıcılardan tedarik edilmiştir.

Titreşim sönümleyici olarak tanımlanan bu takımların geometrik detayları (taban ağız yerleşimleri ve helis açlarındaki değişimler) Şekil 6 ve Tablo 4 ile verilmiştir.

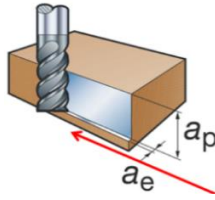


Şekil 6. Kullanılan parmak frezelerin genel görünüşü

Tablo 4. Kesici takım ağız ve helis yerleşim açı değerleri

Takım Adı	Helis Açıları (°)		Uç Açıları (°)			
	β_1	β_2	a_1	a_2	a_3	a_4
YG	35	38	78,5	101,5	78,5	101,5
Iscar	35	37	82	98	82	98
Nachi	30	33	80	100	80	100

Tezgâh Z eksenine doğrultusunda 10 mm derinliği ($a_p=10$ mm) sabit tutularak yana doğru ($a_e=0.15/0.20/0.25$) üç farklı seviyede olacak şekilde toplamda 18 fiziksel kesme operasyonu gerçekleştirilmiştir. Kullanılan talaş derinliği Şekil 7 ile verilmiştir.



Şekil 7. Talaş derinliği doğrultuları

Yapılacak deneysel frezeleme işlemleri öncesinde gerçekleştirilen literatür araştırması ve uzman kişilerden alınan tecrübi tavsiyeleri bağlı olarak parmatre ve seviyelerinin seçimi gerçekleştirilmiştir. Buna göre deneydeki herbir kesme operasyonu sırasında takım titreşim sinyalleri ve buna bağlı olduğu düşünülen yüzey pürüzlülük değerlerinin oluşmasında en etkili olan giriş parametre ve seviyeleri Tablo 5 ile verilmiştir.

Tablo 5. Deneysel kesme parametreleri ve seviyeleri

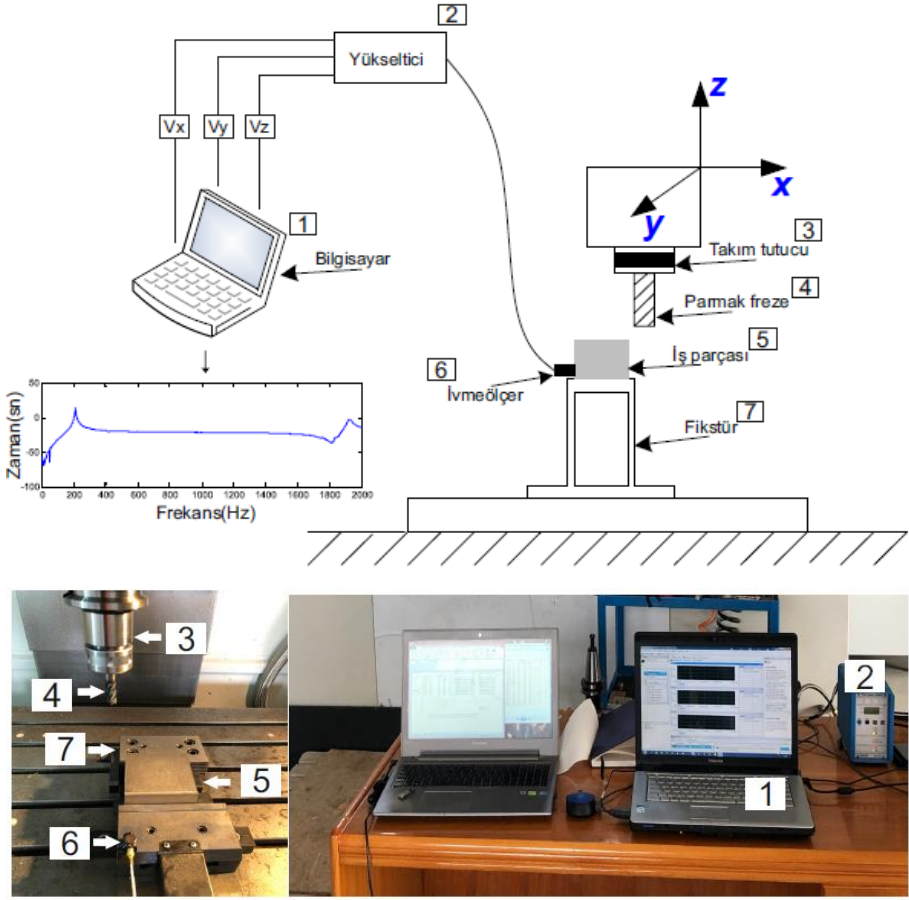
Sembol	Faktör	Birim	Seviye		
			1	2	3
M	Malzeme	-	GGG50	4140	-
T	Kesici takım	-	YG	Iscar	Nachi
F	İlerleme hızı	mm/dk	600	650	700
V	Kesme hızı	dev/dk	3800	4200	4600
a	Kesme Derinliği	mm	0,15	0,20	0,25

Deneyler, üç seviyeli dört adet ve iki seviyeli bir faktör olmak üzere toplamda beş faktör kullanılarak L18 ortogonal dizine göre oluşturulan 18 farklı kombinasyona göre gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kombinasyon tablosu Tablo 6 ile verilmiştir.

Tablo 6. L₁₈ ortogonal dizi kombinasyonu

Deney No	<i>M</i>	<i>T</i>	<i>f</i>	<i>v</i>	<i>a</i>
1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2
3	1	1	3	3	3
4	1	2	1	1	2
5	1	2	2	2	3
6	1	2	3	3	1
7	1	3	1	2	1
8	1	3	2	3	2
9	1	3	3	1	3
10	2	1	1	3	3
11	2	1	2	1	1
12	2	1	3	2	2
13	2	2	1	2	3
14	2	2	2	3	1
15	2	2	3	1	2
16	2	3	1	3	2
17	2	3	2	1	3
18	2	3	3	2	1

Yukarda verilen bilgiler ışığında oluşturulan fiziksel deney ortamının şematik gösterimi Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Fiziksel deney ortamının şematik gösterimi

5. TAGUCHI YÖNTEMİ İLE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

L_{18} Taguchi standart ortogonal dizisi kullanılarak yapılan çalışmaların deneysel sonuçları yani çıkış parametrelerine ait değerler Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Deneysel çıkış parametre sonuçları

Dene y No	<i>M</i>	<i>T</i>	<i>f</i>	<i>v</i>	<i>a</i>	Vx (Hz)
1	1	1	1	1	1	137,996
2	1	1	2	2	2	123,729
3	1	1	3	3	3	102,705
4	1	2	1	1	2	106,475
5	1	2	2	2	3	83,862
6	1	2	3	3	1	50,029
7	1	3	1	2	1	162,414
8	1	3	2	3	2	135,132
9	1	3	3	1	3	143,678
10	2	1	1	3	3	189,351
11	2	1	2	1	1	161,808
12	2	1	3	2	2	223,238
13	2	2	1	2	3	205,377
14	2	2	2	3	1	240,193
15	2	2	3	1	2	220,688
16	2	3	1	3	2	282,265
17	2	3	2	1	3	248,913
18	2	3	3	2	1	226,898

Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün minimum olması gerektiğinden, En küçük en iyi kalite karakteristiği kullanılmış ve S/N oranları Denklem (24) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} (y_1^2 + y_2^2 \dots y_n^2) \right] \quad (24)$$

$(y_1^2 + y_2^2 \dots y_n^2)$ defa tekrarlanan bir deneme koşulu için işleme karakteristiğinin yanıtlarıdır. Denklem'deki negatif işaret en küçük en iyi kalite özelliğini göstermek içindir. Performans özelliklerinin kategorisi ne olursa olsun, S/N oranının yüksek değeri daha iyi bir performansa karşılık gelir. Bu nedenle proses parametrelerinin optimal seviyesi, en büyük S/N oranına sahip olan seviyelerdir. Buna göre 18 denemenin her biri için hesaplanan değerler Tablo 8' de gösterilmiştir.

Tablo 8. Deneysel sonuçlar

Deney No	Ra	Rz	V _x _SNRA3 (dB)	V _y _SNRA4 (dB)	V _z _SNRA5 (dB)
	ort_SNRA1 (dB)	ort_SNRA2 (dB)			
1	11,497	-9,292	-42,797	-37,284	-43,276
2	10,020	-9,066	-41,849	-33,838	-42,475
3	13,500	-4,659	-40,232	-33,978	-39,338
4	5,880	-10,317	-40,545	-34,033	-40,126
5	6,939	-6,471	-38,471	-35,387	-39,630
6	7,134	-1,188	-33,984	-33,981	-38,063
7	12,740	-4,046	-44,212	-44,363	-43,251
8	10,285	-0,214	-42,615	-34,016	-38,623
9	10,140	-2,040	-43,148	-36,324	-38,020
10	19,645	-6,128	-45,545	-48,574	-42,384
11	13,958	-3,127	-44,180	-46,8485	-45,184
12	19,729	-6,135	-46,975	-47,235	-46,079
13	10,126	-4,028	-46,251	-46,712	-44,656
14	14,886	1,226	-47,611	-47,832	-45,644
15	12,969	-1,189	-46,875	-46,776	-45,819
16	15,589	2,557	-49,013	-48,398	-44,115
17	15,106	2,214	-47,921	-48,216	-45,682
18	19,238	0,630	-47,117	-47,842	-46,677

5.1. Titreşim Değerleri için S/N Tepki Analizi

Daha önce detayları verilen dik işleme tezgâhında yapılan deneysel çalışmada alınan üç eksendeki ivmelenme (V_x-titreşim) verilerine uygulanan S/N analizi ile ulaşılan sonuçların parametre ve seviyelerine bağlı anlaşılır ifadelerle değerlendirilmesi maksatlı oluşturulan S/N tepki tablosu Tablo 9 ile verilmiştir.

Tablo 9’da V_x titreşim değeri ele alınmış ve ortalama S/N tepki tablosu oluşturulmuştur. V_x için en yüksek etkiye sahip parametre kesici takım daha sonra malzeme ve sıra ile kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği gelmektedir. Etkili olduğu tespit edilen giriş

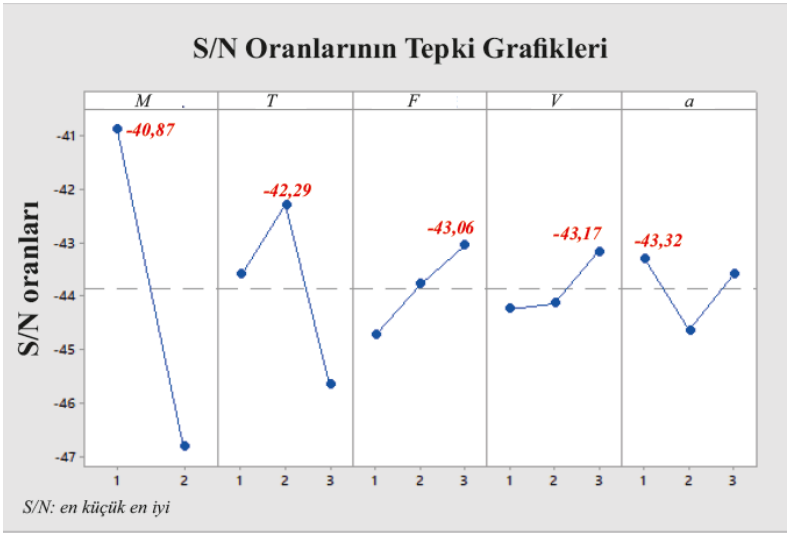
parametrelerinin seviye dizilimleri ise sembolik olarak M1T2f3v3a1 olarak gösterilebilir.

Tablo 9. V_x için ortalama S/N tepki tablosu (en küçük en iyi) (dB)

Seviye	M	T	f	v	a
1	-40,87*	-43,60	-44,73	-44,24	-43,32*
2	-46,83	-42,29*	-43,77	-44,15	-44,65
3		-45,67	-43,06*	-43,17*	-43,59
Delta	5,96	3,38	1,67	1,08	1,33
Rank	1	2	3	5	4

* Koyu renkli rakamlar ideal parametre seviyelerine işaret etmektedir.

Her kontrol faktörünün etkisi, S/N tepki tablolarının grafikleştirilmiş halleriyle daha açık bir şekilde gösterilebilir (Şekil 9).



Şekil 9. V_x için S/N oranlarının tepki grafikleri

Şekil 9’de verilen V_x titreşim karakteristiğine ait S/N oranı tepki grafiklerinde görüldüğü gibi özellikle malzeme seçiminin ve kesici takım cinsinin titreşim değeri üzerinde sürekli ve güçlü bir etkiye

sahip olduğu ifade edilebilir. Yine ilgili grafikten, herbir seviyesi arasındaki bağlama çizgilerine ait eğimlerin göreceli olarak daha az olmasından, kesme hızı parametresinin V_x üzerinde en az etkiye sahip olduğu tespiti yapılabilir. Netice olarak; GGG50 kalitesindeki dökme demir üzerinde Iscar markalı takım ile 4600 devir/dk dönme hızında, 700 mm/dk ilerleme oranı ve 0,15 mm talaş derinliği değerleri kullanılarak yapılan kesme işleminde en ideal V_x titreşim değerine ulaşılabileceği sonucuna varılır.

Yukarı da ki tablo ve S/N tepki grafiği incelendiğinde titreşim değerlerine en çok etki eden parametrenin malzeme cinsi olduğu en az etki eden parametrenin ise kesme hızı olduğu V_x tablosundan görülmektedir.

Kesici takımlar kendi aralarında kıyaslandığında ise V_x tablosunda en iyi performansa sahip takımın sırası ile Iscar, YG ve Nachi markalı takımların olduğu görülmektedir.

5.2. S/N oranları için Varyans analizi (ANOVA)

Varyans analizi, deneylerde belirlenen girdi parametrelerinin sonuçlar üzerindeki etkinlik seviyelerini tespit etmek için yapılmaktadır. ANOVA analizinde girdi parametrelerinin tepki üzerindeki etkisi, P (önem/olasılık) değerine bakılarak yapılır. %95 güven aralığı dikkate alınarak $P < 0.05$ (%5 önem değeri) olduğunda parametrenin tepki üzerinde etkili olduğu kabul edilir. Eğer parametreler için hesaplanan P tablo değerleri virgülden sonra tamamen benzerlik gösterirse, F testi olarak kabul edilen ilgili sütundaki değerle arasında varolan farklara

göre bağımsız parametrelerin bağımlı parametre üzerindeki etkinliği tespit edilebilir. Bu durumda F değerinin yüksek olması daha etkin bir parametre olduğunu ifade eder. Faktörlerin yüzelik olarak toplam varyasyon içerisindeki etki değeri, tablonun sağ tarafındaki ‘PC’ sütununda gösterilmiştir. Bu oranlar her bir parametre için Seq SS değerinin toplam Seq SS değerine bölünmesiyle elde edilir.

Yapılan deneysel çalışmada elde edilen varyans analizinde parametrelerin etkileşimlerinin ihmal edilebilecek seviyelerde olmasından dolayı tablolarda parametre etkileşimlerine yer verilmemiştir.

5.3. Vx Titreşim Değeri için Varyans Analizi (ANOVA)

Vx S/N oranları için yapılan varyans analizi Tablo 10’da verilmiştir. Oluşturulan P değerlerinden yola çıkarak sıfıra en yakın olduğu görülen malzeme parametresinin %63,10 oranıyla Vx değeri üzerinde en etkili parametre olduğu kabul edilir. İkinci en etkili parametre %13,78 oranı ile kesici takım, üçüncü en etkili parametre %3,33 ile ilerleme hızı ve dördüncü en etkili parametre ise %2,33 ile kesme derinliği olarak sıralanabilir. En az seviyede etkili denebilecek faktör ise %1,68 oranı ile kesme hızı olarak ifade edilebilir. Yine aynı tablodan Vx için yapılan ANOVA analizinin geçerliliğinin istatistiki olarak anlamlı sayılabilecek seviyede olduğu ($R^2=0,8422$) gözlemlenebilir.

Tablo 10. Vx S/N oranları için ANOVA sonuçları

Parametre	DF	Seq SS	Adj MS	F	P	PC (%)	R ² (%)
<i>M</i>	1	159,814	159,814	32,00	0,000	63,10	
<i>T</i>	2	34,888	17,444	3,49	0,081	13,78	
<i>F</i>	2	8,442	4,221	0,85	0,465	3,33	
<i>V</i>	2	4,259	2,130	0,43	0,667	1,68	84,22
<i>a</i>	2	5,893	2,947	0,59	0,577	2,33	
Kalıntı hata	8	39,954	4,994				
Toplam	17	253,252					

DF:Serbestlik derecesi, SS:Kareler toplamı, F:F-testi değeri, P:Hataların varyansı, PC:Yüzde katkı, R²:Hataların karesi

SONUÇLAR

Gerçekleştirilen çalışmada Taguchi metodu ve Varyans analizi (ANOVA) kullanılarak talaşlı imalat esnasında titreşim sönmüleyici olarakta adlandırılan değişken adım ve helisli takımların farklı malzemeler üzerindeki yüzey pürüzlülüğü ve titreşim verileri çıkış verileri üzerinden performans karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan çalışmada da giriş verileri olarak ilerleme hızı, kesme hızı ve kesme derinliği olmak üzere 3 adet kesme parametresinin belirlenen 3 seviyesi kullanılmıştır. Deneysel çalışma neticesinde ortaya çıkan sonuçlar aşağıda sıra belirtilmiştir:

1. Yapılan çalışma da üç seviyeli dört adet ve iki seviyeli bir faktör olmak üzere toplamda beş faktör kullanılarak oluşturulan L₁₈ (2x(3¹³)) Taguchi ortogonal dizinine bağlı 18 deney yapılmıştır. Uygulanan Taguchi metodu ile oldukça zahmetli olan bir dizi deney yerine daha az deney gerçekleştirilmiş ve zaman ile

maliyetten tasarruf edilerek daha kaliteli imalat yapılabileceği istatistiki veriler ışığında çalışmada gösterilmiştir.

2. En küçük en iyi ifadesi ile denklem 8.1 eşitliği kullanılarak elde edilen grafiklerin yorumlanması ile beraber;
 - Optimum V_x değeri için faktörler; GGG50 malzeme, Iscar marka kesici takım, 4600 mm/dev ilerleme hızı, 700 m/dk ve 0,15 mm kesme derinliği parametrelerinin seçilmesi tespit edilmiştir.
3. Titreşim değeri (V_x) üzerine etki eden parametrelerinin yüzdelik etkisini görmek için ANOVA analizi uygulanmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre;
 - V_x ; S/N oranları için en etkili parametrenin %63,10 oranında malzeme olduğunu ve sıra ile %13,78 oranı ile kesici takım, %3,33 oranı ile ilerleme hızı, %2,33 oranı ile kesme derinliği ve %1,68 oranı ile kesme hızı etki etmektedir.

Deney sonuçları yüzey pürüzlülüğü açısından incelendiğinde aynı kesme koşullarında 4140 kalitedeki çelikten elde edilen pürüzlülük değerleri GGG50 dökme demire göre daha düşüktür. Bunun nedeni malzemelerin kimyasal bileşenleri incelendiğinde silisyum (Si) ve karbon (C) elementlerinin malzemenin sünekliğini artırması ile ilişkilendirilebilir.

Burdan yola çıkarak Nachi marka kesici takımın kesici ağız yerleşim açılarının(80° - 100° - 80° - 100°) ve helis açılarının(30° - 33°) anlık frekans değişimlerini diğer takımlara oranla daha iyi sönümlenmeye

yardımcı olduğu bu nedenle Rz pürüzlülük değeri üzerinde en olumlu etkiyi gösterdiği deney sonuçlarında görülmüştür.

Her üç eksendeki titreşim verilerinin analizi yapıldığında kesme prosesi üzerinde en etkili parametrenin malzeme olduğu açıkça görülmektedir. Malzemenin kesilmesi sırasında takımın boşluk yüzeyinin malzemeye dalması (indentation) yani süreç sönümlenme etkisinin daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülebilir. Bu durumda titreşim için en performanslı takım Iscar marka kesici takımın olduğu dikkate alınırsa süreç sönümlenmesinden kaynaklı titreşim sönümlenme özelliğinin özellikle döküm malzemeler için çok daha fazla olduğu çıkarımı yapılabilir.

4. Yanal frezeleme operasyonları sonucu ortaya çıkan V_x _ort, çıktı verilerinin analizi ve optimizasyonları için Taguchi yönteminin hem zaman-maliyet anlamında hem de işletmelerde uygulanabilirlik anlamında kullanımı yönünden verimli bir yöntem olduğu anlaşılmıştır.
5. Değişken adımlı ve helisli parmak frezelerinin yüzey pürüzlülüğü ve titreşim değerleri için ideal aralıkları yakalamak için kullanılabileceği ve ayrıca adım ve helis açılarında yapılacak uygun seçimlerle imalatta kalitenin arttırılmasında önemli bir faktör olacağı gösterilmiştir.
6. Farklı tedarikçilerden temin edilen kesici takımların yüzey pürüzlülüğü ve titreşim üzerindeki performans karşılaştırmaları incelendiğinde, V_x değeri için en iyi sonuç Iscar marka kesici takım ile elde edilmiştir.

7. Son olarak, belirli koşullar altında değişken adımlı ve helisli takımların kesme parametrelerine kıyasla yüzey pürüzlülüğü ve titreşim gibi kaliteye etki eden çıktı verileri üzerinde daha fazla etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

ALINTI

Bu eser “*Farklı Kesici Ağız Yerleşimi ve Helis Açıklarına Sahip Freze Takımlarının Performans Analizi*” adlı Yüksek Lisans Tez çalışmasından yararlanılarak oluşturulmuştur.

REFERANSLAR

- Abuelnaga, A.M. and El-Dardiry, M.A., 1984, Optimization methods for metal cutting, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1984, 24(1), 11-18.
- Aggarwal, A. and Singh, H., 2005, Optimization of machining technique-a retrospective and literature review, *Sadhand*, 2005, 30(6), 699-711.
- Altintas, Y. and Chan, P.K., 1992, In-process detection and suppression of chatter in milling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1992, 32(3), 329-347.
- Altintas, Y., Engin, S. and Budak, E., 1999, Analytical stability prediction and design of variable pitch cutters, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 1999, 121(2), 173-178.
- Ariffin M K A, S.N.D., Worden K., 2004, Genetic optimisation of machine tool paths, 6 th International Conference on Adaptive Computing In Design And Manufacture In 'Adaptive Computing in Design and Manufacture VI, Bristol., 2004. pp. 125-136.
- Asiltürk İ., Akkuş H., Demirci T., 2012, Regresyonla titreşim, akustik emisyon ve kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğünün modellenmesi, *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, cilt 53, sayı 632, s. 55-62.
- Aydın, M.E., 1994, Taguchi deneysel tasarım metodu ve segman sanayide bir uygulama, *Standard*, sf. 102 - 109.
- Balaji, M., Murthy, B. S. N. and Rao, N. M., 2016, Optimization of cutting parameters in drilling of aisi 304 stainless steel using taguchi and anova, *Procedia Technol.*, vol. 25, no. Raerest, pp. 1106–1113.
- Binali Rüstem,Ulaş Hasan Basri,Demir Halil (2018). Toolox 44 Malzemesinde Talaş Kaldırma Miktarının Yüzey Pürüzlülüğü ve Takım Aşınması Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Technological Applied Sciences*, 13(1), 19-28. (Yayın No: 4418698)
- Binali Rüstem, Demir Halil, Neşeli Süleyman, Yıldız Süleyman (2020). An Investigation of Factors Affecting Machinability of Milling Toolox 44 Hot

- Work Tool Steel by Taguchi Method . International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'20), 317- 321. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:6864833)
- Binalı Rüstem, Yıldız Süleyman, Neşeli Süleyman (2021). Optimization of Machinability Parameters of S960QL Structural Steel by Finite Elements and Taguchi Method. International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'21) (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:7301857)
- Binalı, R., Yıldız, S. & Neşeli, S. (2021). S960QL Yapı Çeliğinin İşlenebilirliğinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (31)
- Budak, E., 2003, An analytical design method for milling cutters with non-constant pitch to increase stability, part 1: Theory and part 2: Application, Journal of Manufacturing Science and Engineering 2003, 125, 29-38.
- Canıyılmaz, E., 2001, Kalite geliştirmede taguchi metodu ve bir örnek uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; Ankara.
- Cheung, C.F., Lee, W.B., 2000, A theoretical and experimental investigation of surface roughness formation in ultra-precision diamond turning, International Journal of Machine Tools & Manufacture, C: 40, s: 979-1002.
- Chiou, C.H., Hong, M.S. and Ehmann, K.F., 2003, The feasibility of eigenstructure assignment for machining chatter control, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(15), 1603-1620.
- Çakır, M., 1999, Modern Talaşlı İmalatın Esasları, Vipaş Yayınları, Bursa.
- Çiçek A., Kıvak T. and Ekici E., 2015, Optimization of drilling parameters using Taguchi technique and response surface methodology (RSM) in drilling of AISI 304 steel with cryogenically treated HSS drills, Journal of Intelligent Manufacturing, 26: 295-305.
- Delio, T., Tlustý, J. and Smith, S., 1992, Use of audio signals for chatter detection and control, J Eng Ind Trans ASME, 1992, 114, 146-157.
- Den Hartog, 1947, Mechanical Vibrations.

- Dhanapal, P., Mohamed S.S., 2010, Parameter optimization of carbidic austempered ductile iron using taguchi method, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(8), pp. 3473-3482.
- Dohner, J.L., Lauffer, J.P., Hinnerichs, T.D., Shankar, N., Regelbrugge, M., Kwan, C.-M., Xu, R., Winterbauer, B. and Bridger, K., 2004, Mitigation of chatter instabilities in milling by active structural control, *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 269(1-2), 197-211.
- Doolan, P., Phadke, M. S., Wu, S. M., 1975, Computer design of a vibration-free facemilling cutter, *Journal of Engineering for Industry*.
- Durmaz, S.; 2008, Taguchi metodunun kauçuğun vulkanizasyonu prosesine uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Dutta, S., Narala, S.K.R., 2021, Optimizing turning parameters in the machining of AM alloy using Taguchi methodology, *Measurement*, Volume 169, February 2021, 108340.
- Elbestawi, M.A., Ismail, F., Du, R. and Ullagaddi, B.C., 1994, Modelling machining dynamics including damping in the tool-workpiece interface, *Transaction ASME Journal of Engineering Industry*, 1994, 116(4), 435-439.
- Fowlkes, W.Y., Creveling, C.M., 1995, *Engineering methods for robust product design: using taguchi methods in technology and product development*, Addison-Wesley Publishing Company USA, pp. 90-91.
- Ganguli, A., Deraemaeker, A. and Preumont, A., 2007, Regenerative chatter reduction by active damping control, *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 300(3-5), 847-862.
- Genichi, T. and Clausing, D., 1990, Robust Quality, *Harvard Business Review*, 65-76.
- Glaser, D.J. and Nachtigal, C.L., 1979, Development of a hydraulic chambered, actively controlled boring bar, *J Eng Ind Trans ASME*, 1979, 101, 362-368.
- Göloğlu C. and Arslan Y., 2009, Zig zag machining surface roughness modelling using evolutionary approach, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20: 203-210.

- Hahn, R.S., 1953, Metal cutting chatter and its elimination, Trans. ASME.
- Hashimoto, M., Marui, E. and Kato, S., 1996, Experimental research on cutting force variation during regenerative chatter vibration in a plain milling operation, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996, 36(10), 1073-1092.
- Huang, P., Li, J. F., Sun, J., and Zhou, J., 2014, Study on performance in dry milling aeronautical titanium alloy thin-wall components with two types of tools, *J. Clean. Prod.*, vol. 67, pp. 258–264.
- Huang, P., Li, J., Sun J. and Ge, M., 2012, Milling force vibration analysis in high-speed-milling titanium alloy using variable pitch angle mill, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, volume 58, pages153–160.
- Huang, P., Li, J., Sun, J. and Zhou, J., 2013, Study on vibration reduction mechanism of variable pitch end mill and cutting performance in milling titanium alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, volume 67, 1385–1391.
- Huyanan, S. and Sims, N.D., 2008, Active vibration absorbers for chatter mitigation during milling, *Ninth International Conference on Vibrations in Rotating Machinery 2008*. Exeter, 2008. pp. 125-140.
- Inspurger, T., Mann, B.P., Stepan, G., Bayly, P.V., 2003, Stability of upmilling and down-milling, part 1; alternative analytical methods, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (1), 25–34.
- Inspurger, T., Stepan, G., 2002, Semi-discretization method for delayed systems, *International Journal of Numerical Methods in Engineering* 2002; 55:503–518 (DOI:10.1002/nme.505).
- Inspurger, T., Stepan, G., Bayly, P.V., Mann, B.P., 2003, Multiple chatter frequencies in milling processes, *Journal of Sound and Vibration*, 262(2):333-345.
- Inspurger, T., Mann, B.P., Surman, T., Stepan, G., 2008, On the chatter frequencies of milling process with run-out, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48:1081-1089.

- Işık, F., 2000, Taguchi metodu ve bir uygulama, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Kasman, Ş., 2009, Lazer mikro işleme parametrelerinin yüzey kalitesine etkisinin deney tasarım yöntemiyle belirlenmesi, 5. Uluslar. İleri Tek. Sem. (IATS'09), Karabük, Türkiye.
- Kilickap, E., 2010, Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite, *Expert Sys. with Appl.* 37 (2010) 6116–6122.
- Kurdi, M.H., Schmitz, T.L., Haftka, R.T. and Mann, B.P., 2004, Simultaneous optimization of material removal rate and part accuracy in high speed milling, ASME International mechanical engineering congress and exposition (IMECE), Anaheim.
- Liao, Y.S. and Young, Y.C., 1996, A new on-line spindle speed regulation strategy for chatter control, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(5), 651-660.
- Liu, C.R. and Liu, T.M., 1985, Automated chatter suppression by tool geometry control, *J Eng Ind Trans ASME*, 107, 95-98.
- Li, H., Zheng, H., Tang, L., 2010, Theoretical and experimental investigation of the effects of an irregular-pitch cutter on vibration in face-milling, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Volume 24, 2169–2174.
- Liu, K.J. and Rouch, K.E., 1991, Optimal passive vibration control of cutting process stability in milling, *Journal of Materials Processing Technology*, 28(1-2), 285-294.
- Lin, S.C., DeVor, R.E. and Kapoor, S.G., 1990, The effects of variable speed cutting on vibration control in face milling, *J Eng Ind Trans ASME*, 112, 1-11.
- Maeda, O., Cao, Y. and Altintas, Y., 2005, Expert spindle design system, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(4-5), 537-548.
- Mei, Z., Yang, S., Shi, H., Chang, S. and Ehmann, K.F., 1994, Active chatter suppression by on-line variation of the rake and clearance angles in turning principles and experimental investigations, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 34(7), 981-990.

- Merritt H. E, 1965, Theory of self-excited machine-tool chatter: contribution to machine-tool chatter research-1, *Journal of Engineering for Industry*, 87(4), 447.
- Montgomery, D. C., 2001, Design and analysis of experiments, 5th Edition, John Wiley, Wiley & Sons, New York, 1-19.
- Mukherjee, I. and Ray, P.K., 2006, A review of optimization techniques in metal cutting processes, *Computers & Industrial Engineering*, 2006, 50(1), 15-34.
- Neşeli, S., 2013, Tırlama titreşimleri üzerine süreç sönmüleme etkisinin analitik olarak araştırılması ve tornalamada kararlı kesme derinliği ile süreç sönmüleme değerlerine bağlı parametre optimizasyonu, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Neşeli, S., Yıldız, S., 2007, Tornalamada yaklaşma açısı ve talaş açısına bağlı tırlama titreşimlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri, *Politeknik Dergisi* Cilt:10 Sayı:4 s.383-389.
- Neşeli S.,Yalçın G.,Terzioğlu H.,Ağaçayak A.C. (2019). Nano Yüzey Kalitesi Oluşturmak İçin Lepleme Makinesi Tasarımı. V Science Technology and Innovation Congress, 374-380. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5601104)
- Olgac, N. and Sipahi, R., 2005, A unique methodology for chatter stability mapping in simultaneous machining, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 127(4), 791-800.
- Nigm, M.M., 1981, A method for the analysis of machine tool chatter, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 21(3-4), 251-261.
- Niu, J., Ding, Y., Zhu, L. M., and Ding, H., 2017, Mechanics and multi-regenerative stability of variable pitch and variable helix milling tools considering runout, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 123, no. February 2018, pp. 129–145.
- Olgac, N. and Sipahi, R., 2007, Dynamic and stability of variable pitch milling, *Journal of Vibration and Control*, 2007, 13(7), 1031-1043.
- Opitz, H., Dregger, E.U. And Rose, H., 1966, Improvement of the dynamics stability of the milling process by irregular tooth pitch, *Advances In Machine Tool Design And Research, Proc. Of MTDR Conference 1966*, 7, 213-227.

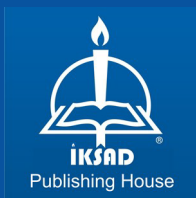
- Oral O., Çolak O., Bayhan M., 2020, Tİ6AL4V malzemesinin frezelemesinde takım titreşiminin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8 (2020) 381-390.
- Otto, A., Rauh, S., Ihlenfeldt, S., and Radons, G., 2017, Stability of milling with non-uniform pitch and variable helix Tools, Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 89, no. 9–12, pp. 2613–2625.
- Özel T., Karpat Y., Figueira L., and Paulo D. J., 2007, Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts, Journal of Materials Processing Technology, 189: 192-198.
- Patel, B.R., Mann, B.P. and Young, K.A., 2008, Uncharted islands of chatter instability in milling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(1), 124-134.
- Pratt, J.R. and Nayfeh, A.H., 2001, Chatter control and stability analysis of a cantilever boring bar under regenerative cutting conditions, Philosophical Trans. of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2001,359(1781), 759-792.
- Ross P.J., 1988, Taguchi Techniques for Quality Engineering, McGraw Hill, p.1-278,Newyork.
- Ross, P.J., 1989, Taguchi Techniques for Quality Engineering, McGraw-Hill, Singapore.
- Saravanan, R., Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006, Manufacturing optimization through intelligent techniques.
- Segalman, D.J. and Butcher, 2000, E.A. Suppression of regenerative chatter via impedance modulation, Journal of Vibration and Control, 6(2), 243-256.
- Semercigil, S.E. and Chen, L.A., 2002, Preliminary computations for chatter control in end milling, Journal of Sound and Vibration, 249(3), 622-633.
- Shirase, K., Altıntaş, Y., 1996, Cutting force and dimensional surface error generation in peripheral milling with variable pitch helical end mills, International Journal of Machine Tools and Manufacture, volume 36, pages 567-584.

- Sim, W., Dewes, R. and Aspinwall, D., 2002, An integrated approach to the highspeed machining of moulds and dies involving both a knowledge-based system and a chatter detection and control system, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 216(12), 1635-1646.
- Sims, N.D., 2007, Vibration absorbers for chatter suppression: A new analytical tuning methodology, Journal of Sound and Vibration, 301(3-5), 592-607.
- Sivasakthivel P. S., Sudhakaran, R. and Rajeswari, S., 2013, Optimization of machining parameters to minimize vibration amplitude while machining Al 6063 using gray-based Taguchi method, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf., vol. 227, no. 12, pp. 1788–1799.
- Slavicek, J., 1965, The effect of irregular tooth pitch on stability of milling, in: Proceedings of the Sixth MTDR Conference, Pergamon Press, London, pp. 15–22.
- Smith, S. and Dvorak, D., 1998, Tool path strategies for high speed milling aluminum workpieces with thin webs. Mechatronics, 1998, 8(4), 291-300.
- Song, Q., Ai, X., Zhao, J., 2011, Design for variable pitch end mills with high milling stability, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, volume 55, 891–903.
- Sridhar, S., Shiv, G.K., Richard, E.D. and Geir, E.D., 2001, Chatter stability analysis of the variable speed face-milling process, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123(4), 753-756.
- Stone, B.J., 1970, The effect on the chatter behaviour of cutters with different helix angles on adjacent teeth, Advances in Machine Tool Design and Research, Proc. of 11th International MTDR Conference University of Birmingham, A,169-180.
- Şahinoğlu A., Güllü A., Dönertaş M., 2017, GGG50 malzemenin torna tezgâhında işlenmesinde kesme parametrelerinin titreşim, ses şiddeti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisinin araştırılması, Sinop Uni J Nat Sci 2(1): 67 - 79.
- Şirvancı, M., 1997, Kalite için deney tasarımı, Literatür yayınları, İstanbul, 110s.

- Tarnag, Y.S. and Lee, E.C., 1997, A critical investigation of the phase shift between the inner and outer modulation for the control of machine tool chatter, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(12), 1661-1672.
- Tarnag, Y.S., Kao, J.Y. and Lee, E.C., 2000, Chatter suppression in turning operations with a tuned vibration absorber, *Journal of Materials Processing Technology*, 105(1-2), 55-60.
- Taylan, D., 2009, Taguchi deney tasarımı uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Tekeli, A. and Budak, E., 2007, Maximization of chatter free material removal rate in end milling using analytical methods, *Machining Science and Technology*, 9(2), 147-167.
- Tewani, S.G., Rouch, K.E. and Walcott, B.L., 1995, A study of cutting process stability of a boring bar with active dynamic absorber, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35(1), 91-108.
- Tlusty J., 1986, Dynamics of High-Speed Milling, *J. Eng. Ind.* May 1986, 108(2): 59-67, <https://doi.org/10.1115/1.3187052>.
- Tlusty, 1999, *Manufacturing Processes and Equipment*, Prentice Hall.
- Tlusty, J., 2000, *Manufacturing process and equipment* (Prentice Hall, New Jersey, 2000).
- Tlusty, J., and Polacek, M., 1963, The Stability of Machine Tool Against Self-Excited vibration in Machining, *Prod. Eng. Research Conf.*, Pittsburgh, No.51. asme Permagon Press.
- Tlusty, J., Ismail, F., Zaton, W., 1983, Use of special milling cutters against chatter, NAMRC 11, University of Wisconsin, SME, pp. 408–415.
- Tobias, S.A., 1965, *Machine Tool Vibration*, Willey, New York.
- Tobias, S.A., 1961, Machine tool vibration research, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1(1-2), 1-14.
- Tobias, S.A., and Fishwick, W., 1958, *Theory of Regenerative Machine Tool Chatter*, London.

- Tsao, T.C., McCarthy, M.W. and Kapoor, S.G., 1993, A new approach to stability analysis of variable speed machining systems, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 33(6), 791-808.
- Turner, S., Merdol, D., Altintas, Y. and Ridgway, K., 2007, Modelling of the stability of variable helix end mills, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(9), 1410-1416.
- Vanherck, P., 1967, Proceedings of the 6th MTDR Conference, Vol. 9, pp. 947-960.
- Varterasian, J.H., 1971, White noise: Tools to reduce chatter, *Manufacturing Engineering and Management*, 1971, 67(4), 26-28.
- Wang, J.H. and Lee, K.N., 1996, Suppression of chatter vibration of a cnc machine centre-an example, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1996, 10(5), 551-560.
- Wang, M. and Fei, R., 2001, On-line chatter detection and control in boring based on an electrorheological fluid, *Mechatronics*, 2001, 11(7), 779-792.
- Weck, M., Altintas, Y. and Beer, C., 1994, Cad assisted chatter-free nc tool path generation in milling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 34(6), 879-891.
- Xiao, M., Wang, Q.M., Sato, K., Karube, S., Soutome, T. and Xu, H., 2006, The effect of tool geometry on regenerative instability in ultrasonic vibration cutting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(5), 492-499.
- Yalçın G., Neşeli S., Terzioğlu H., Ağaçayak A.C. (2018). Fatigue Tester Design and Frame Analysis for Estimation of Fatigue Life of Helical Compression Springs. *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'18)*, 563-566. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4509752)
- Yalçın G., Neşeli S., Terzioğlu H., Ağaçayak A.C. (2019). Design and Construction of Compact CNC Router. *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'19)*, 1(3), 474-478. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5642081)
- Yalçın G., Sağlam H., Terzioğlu H. (2016). Designing of Hydraulic Actuated and PLC Controlled Thread Fatigue and Tensile Testing Machine. 2nd

- International Conference On Science, Ecology and Technology (ICONSETE'xx2016) (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3147353)
- Yalçın G., Neşeli S., (2020), "Pnömatik Sistemlere Giriş, Enerji Araştırmaları, Kitap, Bölüm 2, Sayfa 29-52, ISBN: 978-625-7897-46-4
- Yang W. H., Tarng Y. S., 1998, Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method, Journal of Materials Processing Technology, 84, 122- 129.
- Yardımeden A., Turan A., 2018, Farklı kesme parametreleriyle AISI 1040 çeliğin tormalanmasında oluşan titreşimlerin ve yüzey pürüzlülüğün incelenmesi, DÜMF Mühendislik Dergisi 9:1 (2018), 269-278.
- Yusoff, A., 2010, Optimisation of variable helix end milling tools,. Doktora Tezi, The University of Sheffield, Department of Mechanical Engineering, İngiltere/ Sheffield.
- Zatarain, M., Munoa, J., Peigne, G. and Insuperger, T., 2006, Analysis of the influence of mill helix angle on chatter stability, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 55(1), 365-368.
- Zhang, Y. and Sims, N.D., 2005, Milling workpiece chatter avoidance using piezoelectric active damping: A feasibility study, Smart Materials and Structures, 14, 65-70.



ISBN: 978-625-8423-15-0