

PAPER DETAILS

TITLE: Talas Kaldırma İşlemlerinde Takim Durumunun İzlemesi İçin Son Gelişmelerin İncelenmesi

AUTHORS: Aydın SALIMIASL, Mohammad RAFIGHI

PAGES: 314-337

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/280483>



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makalesi

Talaş Kaldırma İşlemlerinde Takım Durumunun İzlemesi İçin Son Gelişmelerin İncelenmesi

Aydin SALİMİASL^{a,*}, Mohammad RAFİGHİ^b

^aDepartment of Mechanical Engineering, Payame Noor University, I.R. of Iran

^bManufacturing Engineering Department, Faculty of Technology, University of Gazi, Ankara, Turkey

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: aydin952@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, takım durumunun izlemesi için son yıllarda yapılan çalışmalar incelenmiş ve talaş kaldırma işlemlerinin izlenmesinde etki sağlayan parametreler tartışılmıştır. Son yıllardaki çalışmalar göz önüne alınarak, takım durumunun izlenmesi için etkili değişkenler, sinyal işleme metotları, veri seçilmesi ve izleme sınırlıkları tartışılarak tüm avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Ayrıca bu makalede takım izleme modelinin genelliğinin geliştirilmesi için kullanılan ve en çok tanınan deney tasarım metotlarından bahsedilmiştir. Son olarak, takım durumunun tahmini için kullanılan tüm karar destek sistemleri bahsedilerek gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Buna ek olarak, en güvenilir karar destek sistemleri açık bir şekilde anlatılmış ve farklı deney tasarımı prosedürüne uygun olan yöntemler bahsedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Talaş kaldırma işlemi, Takım durumu, Bulanık mantık, Yapay sinir ağları

Investigation of Recent Developments in Tool Condition Monitoring during Machining Operations

ABSTRACT

Recent studies for tool condition monitoring were evaluated and the effective parameters on monitoring of machining operations were discussed in this study. The effective variables on tool condition monitoring, signal processing methods, feature selection, monitoring limitations and all of the advantages and disadvantages were analyzed by considering the recent studies. Also in this paper the most common and most known experimental design methods were discussed for developing the generality of the tool condition monitoring models. Finally, all of the common used decision support systems in tool condition monitoring were considered and the necessary comparisons were made with others. Furthermore, the most reliable decision support systems were clearly explained and suitable methods were mentioned for any different experimental design procedure.

Keywords: Machining process, Tool condition, Fuzzy logic, Artificial neural network

I. GİRİŞ

İMALAT işlemleri; genel olarak talaşlı ve talaşsız üretim olmak üzere iki gruba ayrılmakta ve her ikisinin de ürün imalatına yönelik önemli rolleri bulunmaktadır. Talaşlı üretim, yıllarca kullanılmış ve günümüzde de etkisini artarak sürdürülmektedir. Talaş kaldırma işleminde takım ve iş parçasının devamlı temasta olmaları nedeniyle, takım aşınmaya maruz kalmakta ve takımın aşınması iş parçasının boyutlarının sürekli değişmesine yol açmaktadır. Takımın aşınma miktarının boyutu düşük bir miktar olarak görülmesine rağmen hassas talaş kaldırma işlemlerinde etkisinin bir yansıması olarak atık parça sayısının da artmasına sebep olur [1]. CNC takım tezgâhlarında, takım aşınması sonucunda parçaların boyutlarının değişmesi kaçınılmazdır. Ancak bu olumsuzluğun engellenmesi için takımın aşınma miktarının ölçülmesi ve bu ölçülen değerin takımın ofset bilgilerine aktarılması gerekmektedir.

Günümüzde, talaşlı imalat yapan işletmelerde, kullanışlı bir arayüzün arka planında yer alacak güvenilir bir sistemin olmadığından, takım aşınmasının tespit ve izleme işlemleri tamamen operatör sorumluluğunda yapılmaktadır. Buna rağmen takım aşınmasının operatör tarafından anlık olarak ölçülmesi imkânsızdır. CNC takım tezgâhlarında istenilen boyutların elde edilmesi için, bir anlık takım aşınma tahmin sisteminin düzenlenmesi gerekir [2, 3]. Bu sistemden alınan takım aşınma değerleri, x , y ve z boyutlarındadır. Bu değerler takımın kayma bilgilerine aktarılır ve talaş kaldırma süresince takım aşınması telafi edilerek parçanın boyutu istenilen şekle getirilir. Hassas parçaların üretiminde, yüzey pürüzlülüğü önemli konulardan biridir. Takım aşınması parçanın yüzey pürüzlülüğünün bozulmasında en önemli rolü oynamaktadır. Kalite toleranslarını sağlamayan ve pürüzlü bir yüzeye sahip olan parça bozuk bir parça olarak değerlendirilir. Takım aşınması, parça boyutunun tolerans dışına çıkmasına neden olur ve bununla birlikte, geometrik toleransların da bozulmasında önem taşımaktadır. Örneğin, silindirik parçaların talaş kaldırma işleminde, zamana bağlı olarak takım aşınmanın artması ile parçanın işleme başlangıç ve bitiş çaplarının arasında bir fark görülecektir. Dolayısıyla parçanın doğrusalılığı bozulacak ve konik bir parça haline dönüştüğü görülecektir. Diğer taraftan, aşınmanın eşik bir değeri aşmasından sonra takım ucunda oluşan körelme olacak ve buna bağlı kesme kuvvetindeki ani artış sonucunda takım ucu kırılmaya maruz kalacaktır [4].

CNC makinelerin yer aldığı otomasyonda, esnek ve grup üretim hatlarında yaşanan olumsuzluklar için sebep sonuç ilişkisini kurabilme bilgi düzeyine sahip olmayan operatör, daima talaş kaldırma sürecini takip etmek zorunda kalmaktadır. Bu durum otomasyonun amacına ters düşmekte ve otomasyon sistemine sahip bir talaşlı imalat hattında operatör etkileşiminin sistemden kaldırılmasını gerektirmektedir. Bahsedilen tüm bu nedenlerin sonucunda, pahalı CNC makinelerde maliyeti yüksek hasarlar meydana gelebilmektedir.

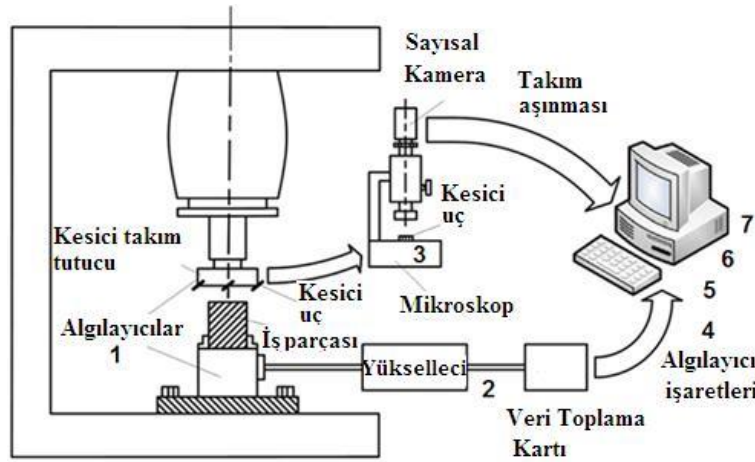
Bu çalışma kapsamında, takım durumunun izlemesi için son yıllarda yapılan çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca, talaş kaldırma işleminin izlenmesinde etki sağlayan tüm parametreler tartışılmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalar göz önüne alınmış, takım durumunun izlenmesi için etkili değişkenler, sinyal işleme metotları, veri seçilmesi ve izleme sınırlıkları tartışılmış, tüm avantajları ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Son olarak takım durumunun tahmini için kullanılan tüm karar destek sistemleri anlatılarak gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır.

II. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Talaş kaldırma sürecinin izlenmesi için, fiziksel algılayıcılar kullanılarak etkin değişkenler ölçülür. Algılayıcılardan alınan sinyallerin üzerine dijital ve analog işlemleri yapıldıktan sonra kesici takım ve talaş kaldırma İşlemine bağlı olan sinyal özellikleri çıkarılır. Çıkarılan sinyal özellikleri, son teşhis için, bilişsel karar destek sistemlerine aktarılır. Bu sistemden alınan sonuçlar bir operatöre veya CNC takım tezgâhına gönderildikten sonra gerekli ve uygun düzeltilme işlemleri yapılır. Bir talaş kaldırma İşleminde izleyici sistemin oluşturulmasında önemli olan yedi husus bulunmaktadır [5]. Bunlar;

- Talaş kaldırma durumunu izleyen algılayıcılar
- Etkin sinyal işleme teknikleri
- İzleme sınırlılıkları
- Modelleme için kullanılan duyuşal özellikler
- İstenen verilerin seçilmesi ve çıkarılması
- Talaş kaldırma işleminin modellemesi için deney tasarımı
- Karar destek sistemleri ve paradigmaları hususlarından oluşmaktadır [5, 6].

Güvenli bir izleyici sistemin kurulması için tüm bu hususların dikkate alınmaları gerekmektedir. Yukarıda sıralanan hususların öncelikleri ve dikkate alınması gereken pozisyonları, Şekil 1’de şematik olarak açıklanmıştır.



Şekil 1. Takım durumu izleme sistemi [7]

A. METODOLOJİK KAPSAM

Güçlü ve güvenilir bir akıllı izleme sistemi geliştirmek için 7 aşamalı metodolojik yaklaşım aşağıda verilmektedir [8]:

- Algılayıcılar: Hangi algılayıcıların kullanılacağı sorgulanır. Kesme süreci, çeşitli fiziksel özelliklere göre karakterize edilir ve bunlara uygun algılayıcılar seçilir. Örneğin dinamometreler, akustik yayım algılayıcıları, ivmeölçerler, akım-güç algılayıcıları gibi donanımlarla, kesme esnasında oluşan fiziksel büyüklükler, bu büyüklüklerle orantılı elektrik sinyallerine dönüştürülmektedir.

- Sinyal işleme: Sinyallerin nasıl alınacağı ve nasıl işleneceği kararlaştırılır. Sinyal işlemenin kapsamında, sinyallerin yükseltilmesi ve filtre edilmesi yer almaktadır.
- İzleme kapsamları: Takip edilecek İşlemin ve olayın nitelikleri tartışılır ve belirginleştirilir.
- Özelliklerin oluşturulması: Sinyali en uygun şekilde ifade eden özellikler sorgulanır ve algılayıcının sinyalleri, açık ve net ifade edilebilir özelliklere dönüştürülür. Bu amaca ulaşmak için, zaman, frekans ve dalgacık alanlarında çeşitli özellikler dikkate alınır.
- Özelliklerin seçilme ve çıkarılması: Özelliklerin en anlamlı olanı sorgulanır. Güçlü ve güvenilir bir modelin geliştirmesi için talaş kaldırma sürecini ifade eden en anlamlı özelliklerin seçilmesi önemli olmaktadır.
- Deney tasarımı: Süreci en doğru şekilde ifade etmek için deney tasarımına karar verilir. Talaş kaldırma sürecinin modellemesinde, deney işlemlerinin yapılması yüksek maliyetli ve zaman alıcı bir süreci karşılamaktadır. Bundan dolayı etkin ve uygulamalı olan bir deney tasarımının yapılması gerekmektedir.
- Karar destek sistemleri: Sürecin modellemesinde yapay zekâ tekniklerinden faydalanıp faydalanılamayacağına karar verilir. İzleme sisteminde, talaş kaldırma sürecinin değişkenleri arasında anlamlı bağlantı kurmak için güvenilir bir modele ihtiyaç duyulmaktadır.

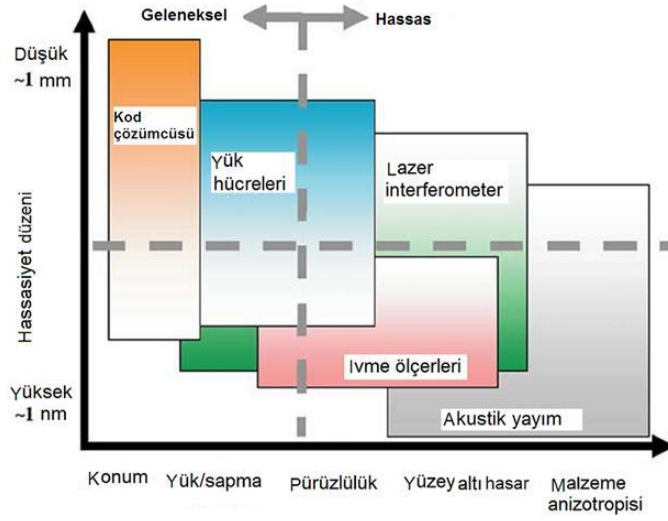
B. ALGILAYICILARIN SEÇİMLERİ

Talaş kaldırma İşlemlerinin izlenmesi için ölçme teknikleri doğrudan ve dolaylı olarak iki guruba ayrılmaktadır. Doğrudan yöntemlerde, değişken miktarı (takım aşınması) dolaysız olarak ölçülmekte ve görsel denetleme için kamera, radyoaktif izotoplar, lazer ışınları ve elektriksel dirençler kullanılabilir. Doğrudan yöntemlerin sadece laboratuvar ortamında yer alabilmesinin nedenleri, talaşlı imalat sürecinde ortaya çıkan problemler, aydınlatma yetersizliği ve kesme sıvısından kaynaklanan uygulamadaki sınırlamalar olmuştur. Bunlara rağmen, doğrudan ölçüm metodunun sahip olduğu yüksek doğruluğu ve güvenilirliği tercih edilme sebepleri arasındadır. Doğrusal metotların tersine, dolaylı ölçme yaklaşımlarıyla esas büyüklük, bu büyüklüğü belirleyen yardımcı değişkenlerin ölçülmesiyle elde edilmektedir. Örneğin ana kesme kuvveti, bileşenlerin ölçülmesi ve sonrasında matematiksel eşitlik üzerinden hesaplanabilmektedir. Dolaylı yöntemler, doğrudan metotlara nazaran düşük doğruluğa, az karmaşıklığa ve uygulamalar için yüksek uygunluğa sahiptir. Diğer taraftan, günümüzdeki algılayıcı teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak, talaşlı imalat kesmeyi anlık olarak izleyebilen ve güvenilir verileri ile en uygun kesme şartlarının kararlaştırılmasına imkân sağlayan ve doğrudan metotlara uygun algılayıcılar üretilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Talaşlı imalat işleminde kullanılan algılayıcı örnekleri [9]

Takım durumunun anlık izlenmesinde algılanabilecek büyüklüklerden olan akım, kuvvet, güç, titreşim ve akustik yayım gibi değişkenlerin farklı hassasiyet seviyelerinde kullanılmasına yönelik grafik, Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Durum izlenilmesi için kullanılan değişkenler ve onların duyarlılıkları [10]

Farklı talaş kaldırma İşlemlerinde takım durumunun izlemesi için uygun olan algılayıcılar çeşitli araştırmacılar tarafından tercih edilmiştir. Bir özet olarak Tablo 1'de literatürde takım durumunun izlemesi için kullanılan çeşitli algılayıcılar gösterilmiştir.

Tablo 1. Literatürde kullanılan algılama yöntemleri

Algılayıcı türü	Kaynaklar
Akustik yayım	Aşınma, Matkapta kırılma [11, 12], Frezede yüzey pürüzlülüğü [13, 14], Tornada aşınma [15, 16], Mikro frezede aşınma [17, 18], Frezede aşınma [19-22].
Dinamometre	Frezede aşınma [12], [19, 20], [22-31], Frezede kırılma [32], Tornada aşınma [9, 33-37], Delmede aşınma [38-40], Aşınma ve kırılma [41], Mikro frezede aşınma [17, 18], Matkapta aşınma [42, 43], Frezede yüzey pürüzlülüğü [13], Tornada yüzey pürüzlülüğü [44], Tornada aşınma ve yüzey pürüzlülüğü[3].
Titreşim	Aşınma [11, 45], Tornada güvenilirlik [46], Frezede aşınma [15, 47], Delmede aşınma [38], Tornada aşınma [33, 48, 49].
Motor akımı	Frezede kırılma [50], Frezede aşınma [15, 22, 25, 51], Delmede kırılma [52], Tornada aşınma [33, 53, 54], Delmede aşınma [55], Delik tornalamada aşınma [56].
Güç	Tornada aşınma [15].
Lazer ışını	Tornada aşınma [57].
Ultrasonik	Tornada aşınma [58].
Dolaylı ölçme	Tornada aşınma [59], Frezede aşınma [60], Delmede aşınma [61].
Sensör füzyon	Takım güvenilirliği [11], Tornada aşınma [22, 62], Frezede aşınma [15, 25].
Ses	Tornada aşınma [53], Frezede aşınma [25], Frezede tezgâh arızası [63].
Görüntü işleme	Tornada aşınma [64, 65], Frezede aşınma [66].
Sıcaklık	Tornada aşınma [67].

C. AKIM ve MOTOR GÜCÜ

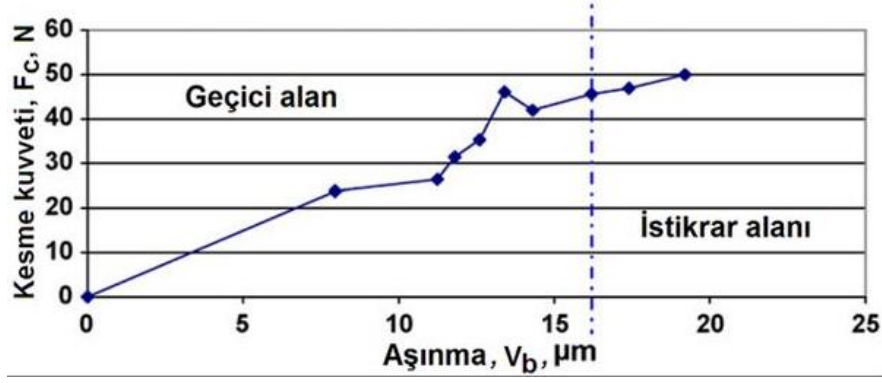
Motor akımı, DC ve AC servo motordan alınan momentle ve kesme kuvvetleri ile orantılı olmakta, dolaylı olarak işlemedeki güç tüketiminin algılanması için kullanılmaktadır [8]. Elektrikli tahrik elemanları, talaş kaldırmak için ihtiyaç duyulan gücü sağlamaktadır. Kesme işleminin izlenmesinde motor ile ilgili parametrelerin kullanılmalarının en önemli olumlu yönü, ölçme cihazlarının işleme sürecine müdahale etmemesinden dolayı, motor sürücü sisteminin güç tüketimi tespiti için uygun olduğunu göstermektedir. İmalat alanında, gücü ölçmek için motorun sürücü kontrol sistemi uygun olarak kullanılabilir [68]. NC kumandalı daha modern açık kontrol sistemleri, akım ve motor gücü gibi iç sinyallerin ölçümüne de izin vermektedir [69]. Pritschow ve Kramer [70], işleme durumunun izlenmesi için sürücü kontrol sisteminden ölçülebilen ve aşağıdaki gibi özellikleri dört gruba ayrılabilen yüksek kaliteli sinyallerle ilgili bir yöntem önermişlerdir.

- Talaş kaldırılma için gereken güç, mevcut motor gücü ile karşılaştırıldığında oldukça düşük kalmaktadır.
- Motor milindeki güç değişimi, kesme kuvveti ve aşınma parametrelerinin değerleri ile orantılı kalmaktadır.
- Elektrik motorundan yükselen sıcaklık, güç tüketiminde normal bir etki oluşturmaktadır,
- Motor sürücü devrelerindeki enerji tüketimi hareketli eksenlerinin yağlı olup olmamasından doğrudan etkilenmektedir [71].

Çeşitli araştırmacılar, mil ve sürücü sistemleri için sinyal özelliklerinin daha iyi anlaşılmasına yönelik çalışmışlar yapmışlardır. Stein ve Wang [72], mil ve ilerleme motor sürücü sistemlerinden çekilen akım hassasiyetinin kesici kuvvetlere bağlı olduğunu ispat etmişlerdir.

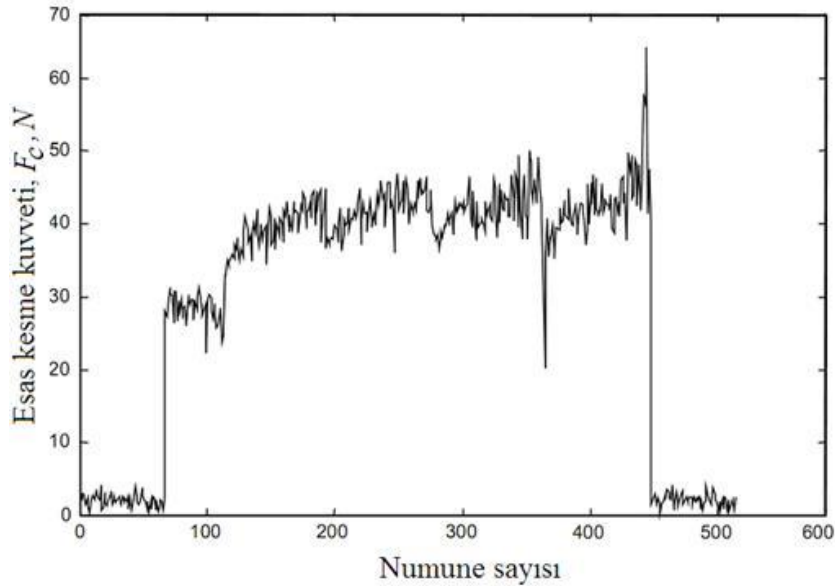
D. KUVVET ve MOMENT

Talaşlı imalat işlemlerinde, kesici üzerinde oluşan kuvvet, kesme işlemini en iyi şekilde açıklayan bir değişken olarak kabul edilmiştir [73, 74]. Kesme kuvvetinin değişim bilgileri, iş parçasının yüzey kalitesinin, takım aşınmasının izlenilmesi ve geometrik görünüşünün değerlendirilmesi için kullanılmaktadır [75]. Bu nedenle, kesme kuvveti, takım durumunun izlenmesinde [76-78] ve iş parçası boyutunun doğruluğunun incelenmesinde, güçlü bir teşhis veya tahmin aracı olarak tercih edilmektedir [79-82]. Tüm kesme İşlemlerinde, malzeme üzerinden talaş kaldırıldığında kesme kuvvetinin oluşması kaçınılmazdır. Analitik modellerin ispatı için, kesme kuvvetlerinin talaş kaldırma boyunca izlenmesi ve takım kırılmasının belirlenmesine yönelik modeller araştırmacılar tarafından yaygın olarak verilmiştir [83]. Moment algılayıcıları, kuvvet de olduğu gibi mekaniksel bir yapının deformasyona verdiği tepkiden oluşmaktadır, fakat moment algılayıcılarında uygulanan yük burulma şeklinde gerçekleştirilir. Her iki algılayıcı için kuvvet ölçüm teknolojisi aynıdır, ancak moment algılayıcılarının uygulaması ve döner takım tutucularından çıkan sinyal aktarma yöntemleri farklı olabilir. Takım aşınmasıyla moment ve kesme kuvveti arasında anlamlı bir ilişki olduğu için, takım aşınma izlenmesinde kesme kuvveti ve momentin ölçülmesi araştırmacılar tarafından önerilmiştir. Şekil 4'te kuvvet ve aşınma ilişkileri görülmektedir.



Şekil 4. Kesici kuvvet ve takım aşınma ilişkileri [84]

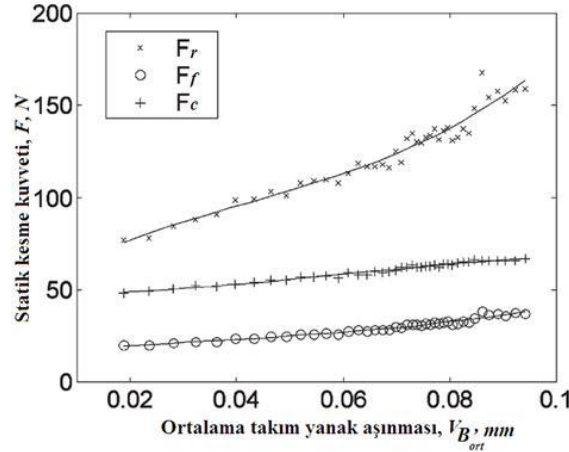
Cakir ve diğerleri [34], tarafından yapılan bir çalışmada, kesme kuvvetleri dikkate alınarak takım kırılma durumu incelenmiş, SAE 1050 malzemesi ve kaplamasız tungsten karbür (DNMG 150608) kesici ucu kullanılarak kesme işlemi yapılmıştır. Çalışmada 90-2500 rev/min, aralığında kesme hızı, 0,03-0,25 mm/rev aralığında ilerleme ve 0,5-2 mm aralığında talaş derinliği, kesme parametre değerleri olarak göz önüne alınmıştır. Kuru kesme şartlarında, kesme kuvvetlerinin sinyalleri bir dinamometre aracılığıyla alınmış ve 65 mm uzunlukta kesme işlemi yapıldığında, takım yanak aşınması ölçülmüştür. Takım aşınması değişimine karşılık kesme kuvvetinin değişmesi incelenmiş ve zaman-aşınma, kesme kuvveti-aşınma grafikleri çıkarılmıştır. Çalışmanın sonucuna göre; kesme kuvveti ölçülerek takım aşınmasının izlenmesinin daha uygun olduğu görülmüş ve takım kırılmasının izlenmesi için kesme kuvvetlerinin dikkate alınmasının başarılı olacağı tespit edilmiştir (Şekil 5). Alınan sonuçlar verilen malzeme ve kesici uç için geçerli kabul edilmiş, farklı malzeme ve uçlar için kesme kuvvetinin ölçülmesi önerilmiştir.



Şekil 5. Takım yanak aşınması ve kesme kuvveti ilişkisi [34]

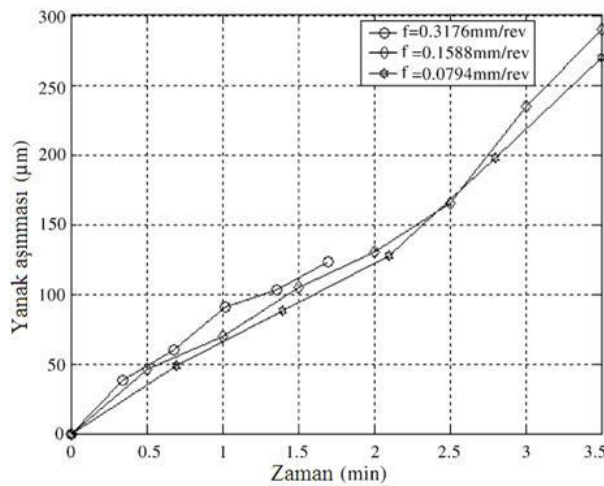
Scheffer ve diğerleri [33], tornalama işlemlerinde takım aşınma durumunun izlenilmesini dikkate almıştır. Sekiz grup deneyin, aynı deney düzeneği üzerinde yapıldığı bu çalışmada, üç seviyede

ilerleme ((0,04), (0,08), (0,16) mm/rev), iki seviyede kesme hızı ((140), (160) m/min) ve sabit talaş derinliği (0,1 mm) kullanılmıştır. İki malzeme tipi (100Cr6 ve 54CrV4) seçilmiş, deneyler CNC takım tezgâhı üzerinde yapılmış ve kesme kuvveti, titreşim ve AY algılayıcıları takım aşınmasının izlenmesi için dikkate alınmıştır. Çalışmanın sonucunda, takım aşınmasının izlenmesinde en güvenilir değişken olarak kesme kuvvetlerinin dikkate alınmasının uygun olacağı tespit edilmiştir (Şekil 6).



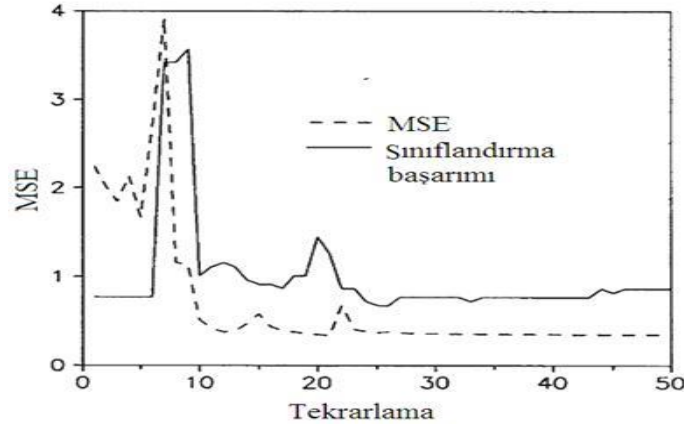
Şekil 6. Kesme kuvveti bileşenleri ve yanak aşınmasının ilişkileri [33]

Luo ve diğerleri [36], takım aşınmasının modellenmesi için analitik ve deneysel modelleri bir araya getirerek yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Tornalama işlemleri üzerine yapılan bu çalışmada takım aşınmasının modellenmesinde kesme kuvvetleri dikkate alınmıştır. Modelin geliştirilmesi için deney tasarımı işlemi yapılmamış ve 5 farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme ve sabit talaş derinliği kullanılarak sadece 11 deney yapılmıştır. Deneylerde düşük alaşımlı bir malzeme (180 Hb) ve kaplamalı bir kesici uç (talaş açısı: 10°; boşluk açısı: 7°) dikkate alınmıştır. Kesme mekaniğinin benzetimi ve bir deneysel fonksiyonu göz önüne alınarak takım yanak aşınmasının tahmini elde edilmiştir. Modelin sabitlerinin türetilmesi için yapılan testler modele uygulanmış ve modelin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar; farklı kesme parametrelerinde, yanak aşınmasının grafiklerine dayanarak, yanak aşınmasının gelişmesinde kesme hızının ilerlemeye göre daha yüksek etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Şekil 7). Kurgulanan benzetim modelinin tahmin ettiği sonuçlar ve ölçülen sonuçlar karşılaştırıldığında, benzetim modelinin güvenilir olduğu ortaya konulmuştur.



Şekil 7. Farklı kesme parametrelerine göre ($V= 111,47$ m/min) zamana bağlı yanak aşınmasının grafiği [36]

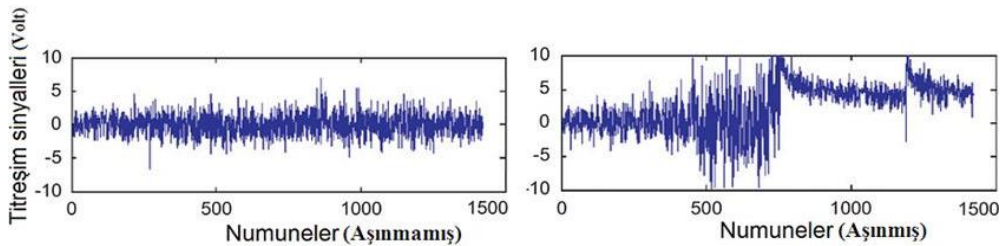
Purushothaman ve diğerleri [37], takım aşınmasının izlenmesini tornalamada dikkate almış, Sifero dökme demir malzemesi ile yapılan bu çalışmada, farklı kesme parametreleri kullanılmış, farklı takım yanak aşınması aralıklarında toplam 113 deney gerçekleştirilmiştir. Takım aşınmasının izlenmesinde, kesme kuvvetleri üç boyutta ölçülmüş ve sonuçlar, değerlendirmek için YSA modelleme yapısına aktarılmıştır. YSA modelinin tahmininde altı farklı girdi (kesme hızı, ilerleme, talaş derinliği, esas kesme kuvveti, ilerleme kuvveti ve radyal kuvvet) göz önüne alınmıştır. YSA modeli ve kesme kuvvetlerinin ölçümü kullanılarak takım yanak aşınmasının başarılı olarak izlenmesi, çalışmanın önemli bir sonucu olarak vurgulanmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. YSA modelinin performans grafiği [37]

E. TİTREŞİM

Titreşim sinyalleri takım durumunun izlenmesi (takım aşınması, takım kırılması vb.) ve yüzey pürüzlülüğünün tahmini için kullanılabilir [85, 86]. Yüzey pürüzlülüğü, titreşimin ve kesici takımın yer değiştirmesinden kaynaklanan bir olaydır [87, 88]. Bu gerçek, tornalama uygulamalarında ispat olmuştur [88-91]. Hâlbuki freze İşlemlerinde, kesintili bir İşlem olması nedeniyle, titreşim sinyallerinin yüzey pürüzlülüğüne daha az etkisi vardır [92]. Takım aşınmasının izlenmesi için, kesici takımın titreşim sinyallerinin ölçülmesi araştırmacılar tarafından yapılmıştır. Araştırmacılara göre kesici takım aşındığında titreşim sinyallerinin genliği artar. Dolayısıyla takım aşınmasıyla titreşim sinyallerinin genlikleri arasında bir ilişki kurulabilir [33, 48, 49]. Şekil 9'da kesici takımın aşınmış ve aşınmamış titreşim sinyalleri kaydedilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi aşınmış takımdan alınan sinyallerde genlik oranı artmıştır.



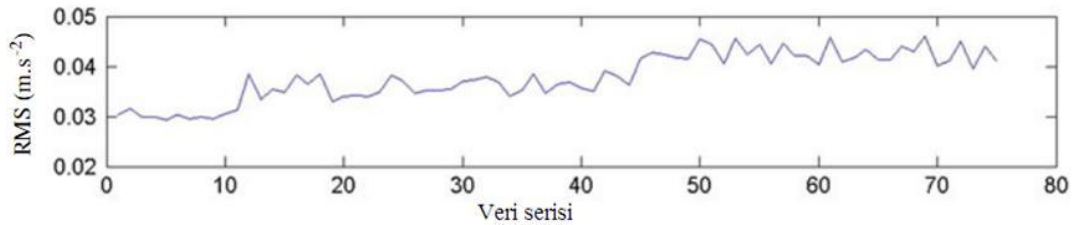
Şekil 9. Yeni ve aşınmış kesici takımdan elde edilen titreşim sinyalleri [93]

Talaş kaldırma işlemlerinde, titreşimin algılanmasında, piezoelektrik dönüştürücüsü [94] yaygın olarak tercih edilmektedir. Metal kesmede oluşan titreşimler, kesme sürecine bağlı ve kesme sürecinden bağımsız olmak üzere iki guruba ayrılmaktadır. Metal kesme İşlemi ile ilişkisiz olan titreşimler; diğer tezgâhlardan ve takımlardan, zeminden gelen titreşimlerden, döner parçaların

salınımlarından, karşılıklı hareket eden parçaların atalet kuvvetlerinden ve ilerleme mekaniğindeki kinematik hatalardan kaynaklanmaktadır. Metal kesme İşlemi ile ilişkili titreşimler; metal kesme esnasında, kesme kuvvetlerinin miktarlarındaki değişmeden, iş parçasının doğrusal olmamasından ve yapısal farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Talaş kaldırma boyunca takımın iş parçasıyla olan temas durumu, titreşim sinyallerinin oluşmasında çok önemli rol oynamaktadır. Titreşim algılayıcıları, talaş kaldırma işlemlerinin izlenmesinde başarılı olarak uygulanmış olsa da, takım durumunun ve iş parçasının doğruluğunun incelenmesi için, titreşim seviyesine bağlı olarak şunlara dikkat edilmesi gerekmektedir [95].

- Sinyal genliği, kesme kenarı ile algılayıcı arasındaki mesafenin artışıyla azalma göstermektedir.
- Algılayıcının kesme kenarına yakın montaj edilmesi halinde, sinyal doğruluğu artmaktadır.
- Oluşan talaş ivmeölçere çarptığında, titreşimin yanlış okunmasına yol açmaktadır.

Feng ve diğerleri [46], talaş kaldırma işleminin güvenilirliğinin artırılması için takım yanak aşınmasını izlemişlerdir. Talaş kaldırma işlemi için bu çalışmada CNMG120408-HM kesici uçlar ve seramik-metal kesici uçları kullanılmıştır. Sabit kesme hızı (200 m/min), sabit ilerleme (0,15 mm/rev) ve sabit talaş derinliği (2 mm) değerlerinde yapılan bu çalışmada, titreşim algılayıcısı takım aşınmasının izlenmesi için göz önüne alınmıştır. Talaş kaldırma esnasında takım aşınmasıyla değişen kesici takım titreşimi genliğinin karekök ortalaması takım durumunu izleyebilen özelliği olarak ölçülmüştür. Bu yöntemin doğrulukla tahmin yapılabilmesi için CNC torna tezgâhında test deneyleri de gerçekleştirilmiş, oransal risk modeli modelleme ve test için elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak tartışılmıştır. Takım aşınması ve titreşim genliği arasında olan ilişkiler zamana bağlı olarak Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi takım aşınmasıyla beraber titreşim genliğinin arttığı tespit edilmiştir. Çalışmaya göre, titreşim genliğini kullanarak takım aşınmasının izlenmesinin başarılı ve etkili yöntem olabileceği önerilmiştir.



Şekil 10. Takım aşınması süresince izlenen kesici takım titreşiminin genliğinin grafiği [46]

F. DİĞER ALGILAYICI TİPLERİ

Talaş kaldırma süreçlerinin izlenmesi için diğer elemanların yanı sıra, sıcaklık algılayıcıları [96], optik algılayıcıları ve ultrason algılayıcıları da kullanılmaktadır. İşlemden uygulanan sıcaklık algılayıcıları; termokopl, termal dirençli elemanlar, yarı iletken elemanlar ve termal elemanların diğer türleri olabilir [6, 8]. Talaş kaldırma sürecinde sıcaklık ölçümü yaygın olarak Davies ve diğerleri [97] tarafından yorumlanmıştır. Takım durumunun izlenmesi için optik sistemlerin uygulanması kapsamlı olarak Kurada ve Bradley'nin [98] çalışmalarında incelenmiştir. Ryabov ve diğerleri [99], freze takımının keskin kenarının incelemesi için lazer ışığını tercih etmiştir. Mannan [100] tarafından, ses ve görüntü incelemeleri ve Shinno ve diğerleri [101] tarafından gerilme ve sıcaklık değişkenleri göz önüne alınmıştır. Ultrasonik yöntemini de Abu-Zahra ve diğerleri [102] ve Nayfeh ve diğerleri [103] taraflarından uygulanmıştır.

G. FÜZYON ALGILAYICI

Sadece bir özellik göz önüne alınarak takım durumunun izlenmesi, yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, İşlem esnasında, algılanan sinyallerin duyarlılığı; gürültülü bir ortam, kesme parametreleri, takım aşınması, makine sertliği, malzeme özellikleri kesme şartları ile değişir. Bu nedenle, değişen koşullar altında algılayıcının bilgilerinin güvenilirliğini arttırmak ve belirsizliğini önlemek amacıyla, tek bir sinyal özelliğinden faydalanmak yerine, çeşitli özelliklerin tercih edilmesi önem taşımaktadır. Algılayıcı füzyon bir şekilde, daha sağlam bir tahmin sağlamak amacıyla, birden fazla özelliğin daha uygun olduğunu ifade eder [8]. Algılayıcı füzyon sisteminin başarısı, sinyallerin türünün izleme sonucu için iyi bir aday olmasına ve sahip olduğu özelliklerine bağlıdır [6]. Örneğin, dinamometre ve akım algılayıcısı kullanımı bir algılayıcı füzyon sistemi olarak kabul edilemez. Zira akım algılayıcısı, dinamometre veren bilgileri ama daha az doğrulukla vermektedir [25]. Genel olarak algılayıcı füzyon; istatistiksel yaklaşımları ve yapay zekâ yaklaşımları olmak üzere iki ana yaklaşıma ayrılır [76]. İstatistiksel yaklaşımı, çok değişkenli regresyon ve istatistiksel bir model kullanarak, algılayıcı bilgileri ve işleme değişkenleri arasında bir bağlantı kurmaktadır. Yapay zekâ yaklaşımları, Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Bayes Ağları (BA) gibi doğrusal olmayan modellerle, algılayıcı bilgilerini ve işleme değişkenlerini birbirlerine bağlar.

H. SİNYAL ÖZELLİKLERİNİN SEÇİLMESİ ve ÇIKARILMASI

Özelliklerin doğru bir şekilde çıkarılması için çeşitli özelliklerin incelenmesi gerekmektedir. Genel olarak, izleme sistemlerinin geliştirilmesi için bir özellik seçme/çıkarma yönteminin uygulanmasının faydaları aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [104].

- Özelliği düşürülmüş bir sinyal, daha az karmaşık öğrenme algoritmaları sayesinde kolay bir süreç modeli oluşturmaktadır.
- Basit modellerin, küçük veri sayısı için daha sağlam sonuç ortaya koyduğu tespit edilmiştir.
- Basit modeller daha az sapmaya neden olarak ve gürültü gibi dış etkilerine bağlı olmayarak daha az değişmektedir.
- Verilerin daha az özelliklerle açıklandıklarında, süreç için daha doğru bilgi alımı sağlanır.
- Veriler, daha az boyutta sergilendiklerinde, bilgi kaybı olmadan, görsel olarak analiz edilebilir.

Bir veya birden fazla sinyalden kaynaklanan özelliklerin sayısı çok büyük olmakla birlikte, bu özelliklerin çoğu süreç şartlarına kayıtsız olabilir. Buna rağmen, seçilen sinyal özelliklerinin süreç ve takım durumuna bağlı ve duyarlı olmaları gerekmektedir. Diğer taraftan, iyi ilişkili bir sinyal özelliği de bazı zamanlarda bozulabilir. Bundan dolayı, sinyal özelliklerinin sayısı tesadüfî sinyal özelliği bozulması dikkate alındığında, yeterli olmalıdır. Bunlarla beraber, yapay sinir ağları gibi bazı değerlendirme sistemlerin eğitiminde, özelliklerin fazla olduğu, daha fazla numune ile öğretiminin yapılması gerekmektedir [105]. Teti ve diğerleri [5], verdiği raporunda, tornalama İşleminde takım aşınma tahmini için bir sinyal özelliği sınıflandırma prosedürü hazırlamıştır. Bu rapora göre, sinyal özelliği seçme prosesi; 138 makalenin %38'inde sebepsiz olarak, %26'sında sinyal özelliği seçimi ölçülmüş sinyallerin analizinden sonra ve %21'inde, en uygun sinyal özellik seçimi bir sonraki takım aşınma modelinin davranışını dikkate almadan yapılmıştır. Sadece %15 çalışmalarda, sinyal özelliklerinin değerlendirilmesi, çeşitli sinyal özelliği seçiminin takım aşınması tahminine yaptığı etkisi analiz yapıldıktan sonra bulunmuştur. Özellik seçme ve çıkarma yöntemleri oldukça çeşitlidir ve izleme kapsamına bağlı olarak değişebilir. Tablo 2'de takım durumunun izlenmesi için literatürde uygulanan bazı özellik seçme ve çıkarma metotları verilmiştir.

Tablo 2. Literatürde kullanılan özellik seçme ve çıkarma metotları

Sinyal İşleme Metodu	Kaynaklar
Zaman serileri	Tornada titreşim [48, 49, 73, 106-108].
Tekil spektrum analizi (SSA)	Kılavuz çekme işleminde titreşim [45], Tornada ses ve motor akımı [53], Tornada titreşim [48, 49].
Hızlı Fourier dönüşümü (FFT)	Tornada Kuvvet [9, 35], Frezede ses [63], Frezede titreşim [47].
Kısa zaman Fourier dönüşümü (STFT)	Frezede moment [31], Frezede AY [21].
Dalgacık dönüşümü (WT)	Tornada çoklu algılayıcı [11], Frezede akım [50, 51], Frezede akım ve AY [19], Frezede kuvvet [24].
Destek vektör makinesi (SVM)	Frezede çoklu algılayıcı [22], Tornada ses ve akım [53].
Kalman Filter	Tornada kuvvet [37].
Teager-Kaiser algoritması (TKA)	Frezede moment [31].

I. İZLEME KAPSAMLARI

Modern imalat sistemlerinin izleme ve kontrol işlemleri için, çeşitli izleme kapsamaları göz önüne alınabilir. Sanayi ortamına ve fabrikaların ihtiyacına bağlı olarak bu izleme alanları tercih edilir. Talaş kaldırma İşlemlerinde, takım durumu, talaş durumu, yüzey pürüzlülüğü ve takım tezgâhı durumu, en sık izleme durumları olarak farklı araştırmacılar tarafından araştırılmıştır [5].

- *Takım durumu:* Talaşlı imalatta, takım durumunun izlenmesi (takım aşınması, takım kırılması vb.) en önemli izleme durumlarından biri olarak yaygın şekilde dikkate alınmıştır. Axinte ve Gindy [109], broşlamada takım durumunun izlenmesi için AY, titreşim, kesici kuvvet ve broşlama tezgâhının hidrolik basıncını dikkate almışlardır. Axinte ve Gindy [71], diğer bir çalışmada, milden alınan güç sinyalinin, freze, delme ve tornalama işlemlerinde takım durumunun izlenmesi için incelemişlerdir. Lee ve diğerleri [110], kesme kuvvet sinyallerini dolaylı olarak AC motor akımından ölçmüş ve ona dayanarak takım kırılmasının anlık izlenmesi için bir izleme sistemi geliştirmiştir. Ryabov ve diğerleri [99], lazer ışığından faydalanan bir takım geometrisi ölçme sistemi gerçekleştirmişlerdir. Ahn ve diğerleri [111], küçük çaplı kılavuz kırılması için bir görüntü sistemi yapmıştır. Kim ve diğerleri [112], delme sistemi esnasında mil gücünü ölçerek bir anlık takım durumu izleme sistemi kurmuşlardır. Takım durumu izlenmesi önemli bir faktör olduğu için son yıllarda birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir.
- *Diğer kapsamalar:* Durum izleme sistemleri sadece takım durumunun izlenmesini değil, aynı zamanda diğer kapsamaları da içermektedir. Bu kapsamlardan; talaş durumu, süreç durumu, yüzey pürüzlülüğü, tezgâh durumu ve zırlı en önemli hususlar olarak dikkate alınmıştır. Govekar ve diğerleri [113], filtre edilmiş AY spektrum elemanlarını, talaş tiplerinin sınıflandırması için kullanmıştır. Kim ve Ahn [114], mil motor gücü özelliğini esas tutarak, kesme bölgesinde talaşın ayrılmasını izlemek için bir metot önermişlerdir. Teti ve diğerleri [115], talaş formunun belirlenmesi için kesici kuvvet sinyallerinin dalgacık paket (WPT) yöntemini tercih etmiştir. Mezentsev ve diğerleri [116], kılavuz çekme işleminde, arıza belirlenmesi için oluşan moment ve radyal kesme kuvvetini ölçmüştür. Axinte ve diğerleri [9], PXI ve Lab VIEW platformlarından yararlanarak, broşlama, tornalama ve uçak motoru parçaları frezelemesinde bir anlık talaş kaldırma izleme sistemi geliştirmişlerdir. Azouzi ve Guillot [81], yüzey kalitesi ve boyutsal sapmaların tahmini için, kesme parametrelerini ve iki kuvvet bileşenlerini izlemişlerdir. Abouelatta ve Madl [91], torna İşleminde, yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmesi için, kesme kuvvetleri ve titreşim sinyallerinin FFT analizini yapmışlardır. Karabatak ve kara [117]

yaptıkları çalışmada, AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin sert tornalanmasında kesme parametrelerinin performanslarını araştırarak, optimum işleme şartlarını tespit etmişlerdir.

J. DENEY TASARIMI

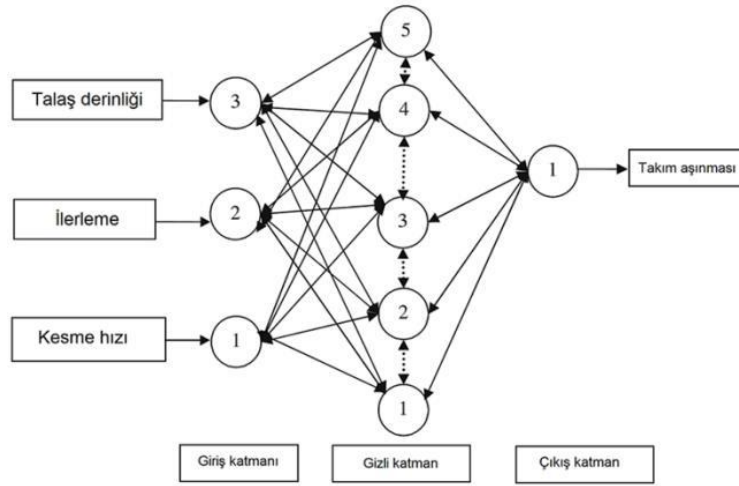
Deney yapma işlemi masraflı ve zaman alıcı olduğu için, talaş kaldırma İşleminde en az deneyden faydalanarak en doğru sonuçların elde edilmesi, önem taşıyan bir husus olarak düşünülmüştür. Geçmişte, çeşitli metotlardan yararlanarak, talaş kaldırma parametrelerinin etkisi (kesme hız, talaş derinliği, ilerleme, vb.) ve süreç değişkenleri (titreşim, takım aşınması, sıcaklık, vb.) değerlerinin belirlenmesi üzerine farklı çalışmalar yapılmıştır. Genellikle, deney tasarımı (DOE); tam faktöriyel tasarımı, kesirli faktöriyel tasarımı, Taguchi dik dizeler ve tepki yüzeyleri ve tasarım yaklaşımları olmak üzere dört metot uygulanmaktadır. Tüm giriş faktörleri göz önüne alınarak gerçekleşen bir deney tasarımına (DOE) tam faktöriyel tasarımı denir. Bir normal tam faktöriyel tasarımı için, tüm girdi faktörlerle ikişer seviyede seçilir ve k boyutunda bir küp tanımlanır. Burada k çalışılan faktörler sayısına denir. Bu iki seviyeli tam faktöriyel tasarımında, $2k$ sayıda deney yapılması gerekir ve bu tür deney yapma, tüm ana etkilerin bilinmesini sağlar. Ancak, faktörlerin sayısı arttıkça, gerekli deneylerin sayısı da hızla büyümekte ve belli bir zaman sonra bunun yapılamaması ortaya çıkmaktadır. Deney yapma sayısını düşürmek için, bir kesirli faktöriyel deneme yapılabilir. Bir kesirli faktöriyel tasarımı, temel tam faktöriyel tasarımı metodunun altkümesinin uygulanması demektir [104].

Taguchi dik dizileri, kesirli faktöriyel tasarımlarına benzerdir, ancak onlar, tolerans ve parametre tasarımına yeni kavramlar uygulamaktadır [104]. Taguchi dizilerinde, faktörler; (1) laboratuvar hem de fiili üretim alanlarında, seviyeleri kontrol edilebilir, kontrol faktörleri ve (2) seviyeleri üretim laboratuvarında kontrol olabilir ve üretim alanlarında kontrol olmayabilir hata faktörleri, olmak üzere iki guruba ayrılmaktadır. Böylece, Taguchi dizileri, bir maliyet fonksiyonuna dayanarak, hangi değişkenlerin daha iyi performans için seçilebileceğini belirlemektedir. Bir tepki yüzeyleri ve tasarımları yaklaşımı, faktörlerin bir deney için etkisini araştıran başka bir deney tasarımı yöntemidir. Aynı zamanda bu yöntem parametrelerin istatistiksel anlamlılığını içeren, birinci ve ikinci dereceden polinom modellerin geliştirilmesine katkı sağlayan bir metottur.

K. KARAR DESTEK SİSTEMLERİ ve PARADİGMALARI

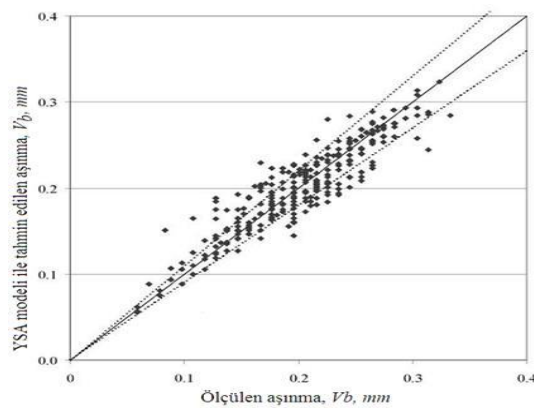
Yapay sinir ağları ya da kısaca YSA; insan beyninin çalışma sisteminin yapay olarak benzetimi çabalarının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. YSA, belirli değerlere dayanarak, girdi alanında olan noktaları çıktı alanında olan eş noktalara belli bir fonksiyonla bağlamaktadır [5]. YSA, bilgileri örneklerden alırken, sürekli ve ayrık verileri işleyebilir ve bir yüksek genelleştirme kabiliyetini yakalar. YSA, bir haritalama cihazı ve model ayırıcısı veya model bütünleştirici gibi bir cihaz demektir.

- *Yapay Sinir Ağları:* Yapay sinir ağları, talaş kaldırma durumunun izlenmesi ve tahmin edilmesi için çeşitli araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir [118-120]. Kesici kuvvetlere dayanarak, broşlamada takım durumunun izlenmesi ve tornalamada takım aşınmasının incelenmesi için bir YSA sistemi geliştirilmiştir [121-124]. Bukkapatnam ve diğerleri [123], yanak aşınmasının tahmini için, özellikleri girdi olarak, YSA sistemine göndermiş ve yanak aşınmasını çıktı olarak sistemden almıştır. Şekil 11’de bir YSA modelinin genel yapısı görülmektedir. Bu sistemde kesme parametreleri girdi olarak sisteme verilmiştir.



Şekil 11. Takım aşınma izlemesi için YSA sisteminin genel yapısı [125]

Lin ve diğerleri [126], tornalama işlemlerinde takım yanak aşınmasının izlenmesi için regresyon analizini ve YSA modellerini önermişlerdir. Talaş kaldırma işleminin gerçekleştirilmesinde sabit kesici tipi (TPG322 COMPAX 1500), üç seviyede kesme hızı ((300), (500), (700) m/min), üç seviyede ilerleme ((0,1), (0,2), (0,4) mm/rev) ve sabit talaş derinliği (0,5 mm) dikkate alınmıştır. Aşınmanın izlenmesi için kesme kuvvetleri ölçülmüş ve YSA sistemine verilerek izleme işlemi geliştirilmiştir. İlerleme ve kesme kuvvetleri, tahmin modeline girdi olarak verilmiş, takım aşınmasının tahmini için ilerleme kuvvetlerinin esas kesme kuvvetlerine göre daha etkili olduğu ortaya konulmuştur. Çalışma sonucunda, kesme parametrelerinin ve kesme kuvvetlerinin, takım aşınması üzerine etkileri tartışılmış ve grafikler halinde verilmiştir. Talaş kaldırma esnasında, takım aşınmasının artmasıyla beraber kesme kuvvetlerinin de arttığı görülmüştür. Ayrıca, kesme kuvvetlerinin dâhil edildiği tahmin modelinde kesme hızının artması, takım aşınmasının artmasına ve ilerlemenin artması takım aşınmasının düşmesine neden olmuştur. Önerilen takım aşınma izleme prosedürüne göre bu çalışmada kesme kuvvetleri kullanılarak aşınma izleme işleminin yapılması başarılı olarak görülmüş ve YSA metoduyla tahmin modelinden alınan ve ölçülen sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 12).

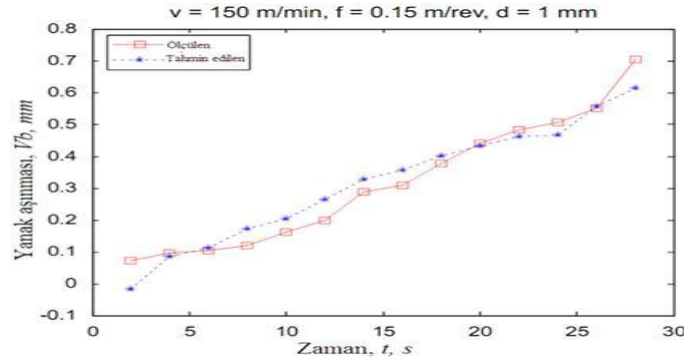


Şekil 12. YSA modelinden tahmin edilen ve ölçülen sonuçların karşılaştırılması [126]

Kara ve diğerleri [127], YSA yöntemi ile dik işleme sisteminde AISI 316L paslanmaz çelik malzemesinin kesme sıcaklığını araştırmışlar. Kara ve arkadaşları [128], diğer bir çalışmada AISI 316L paslanmaz çelik malzemesinin kesme kuvvetinin modellenmesini YSA ve regresyon analiz

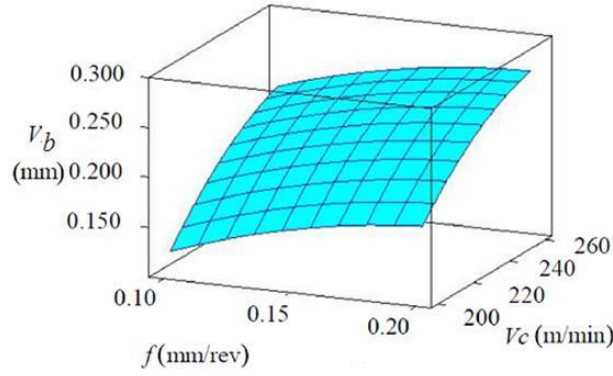
yöntemleri kullanarak dik işleme sisteminde gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen modelde, kesme hızı, ilerleme hızı ve kaplama türüne bağlı olarak kesme kuvvetlerinin tahmini, tam olarak mümkün olmuştur.

İbrahim ve diğerleri [16], YSA yöntemini dikkate alarak takım yanak aşınmasının tahmini için bir model önermiş, beş seviyeli kesme hızı, dört seviyeli ilerleme ve sabit talaş derinliği deneylerde kesme parametreleri olarak kullanılmıştır. Yumuşak çelik malzeme ve kaplamalı kesici uçlar, torna takım tezgâhında kesilen-kesen malzeme çifti olarak dikkate alınmıştır. Kesme kuvvetleri ve AY algılayıcıları takım aşınmasının izlenmesinde göz önüne alınarak deneyler yapılmış, aşınmanın tahmini için kesme parametreleri, kesme kuvveti ve AY girdi olarak YSA modeline verilmiş ve takım yanak aşınma değerleri tahmin edilmiştir. YSA modelinden alınan sonuçlar ölçülen sonuçlarla karşılaştırıldığında modelin doğruluk derecesinin yüksek olduğu gösterilmiştir. Farklı kesme parametrelerinde zamana bağlı olarak gelişen takım yanak aşınmasının grafiği verilmiş ve incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre; YSA yöntemi, takım yanak aşınmasının tahmini için güvenilir metot olarak vurgulanmış ve YSA üzerine anlık izleme sisteminin kurgulanması önerilmiştir (Şekil 13).



Şekil 13. YSA modelinin tahmin ettiği ve ölçülen sonuçlar [16]

Attanasio ve diğerleri [129], tornalama işlemlerinde takım yanak aşınmasının tahmini için bir YSA modeli geliştirmişlerdir. Talaş kaldırma da SAE 1050 malzemesi ve tungsten karbür uç (SPUN120308) dikkate alınarak üç kesme hızı seviyesinde, üç ilerleme seviyesinde ve sabit talaş derinliği seviyesinde yapılmıştır. YSA modelinin kurulmasında ilerleme, kesme hızı ve zaman girdi olarak verilmiş ve aşınma çıktı olarak alınmış ve takım aşınması tahmini yapılmıştır. Ayrıca kesme parametrelerinin takım yanak aşınması üzerine olan etkileri incelenmiş ve grafiklerle gösterilmiştir. Bunlara ilaveten, zamana bağlı olarak takım yanak aşınmasının ilerlemesi tartışılmıştır. Üç boyutlu grafikler verilerek kesme parametrelerinin takım aşınmasıyla beraber değişmesi ortaya konulmuştur. Grafiklere göre zamanın dâhil edildiği YSA modelinde, kesme hızı ve ilerleme arttığında takım yanak aşınması artmaktadır (Şekil 14). Çalışmanın sonucu olarak, YSA yönteminin takım aşınması tahmininde yüksek doğruluğa sahip olabileceği bildirilmiştir.

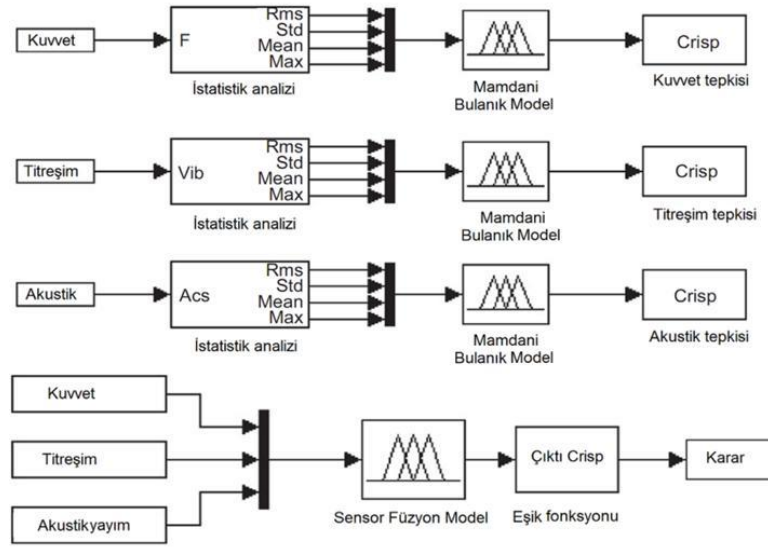


Şekil 14. Yedi dakika talaş kaldırıldıktan sonra tahmin modelinin uç boyutlu grafiği [129]

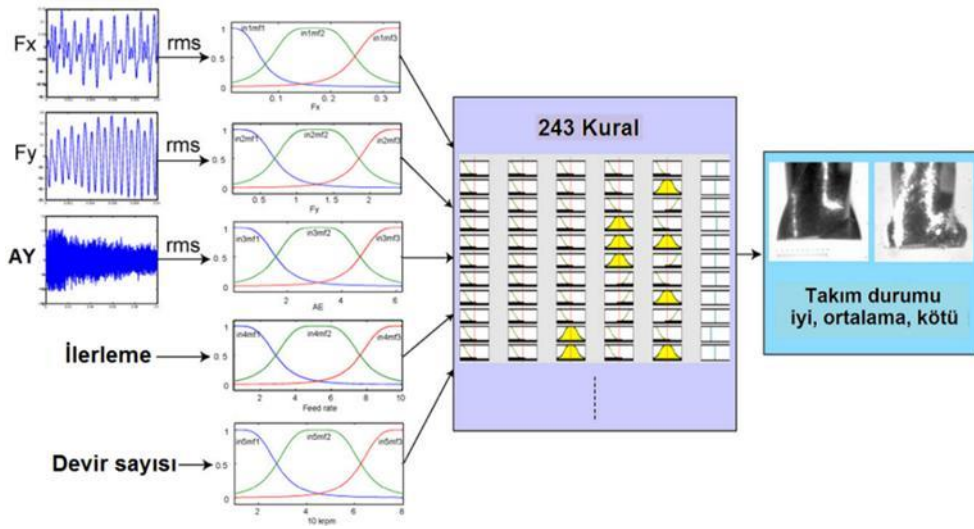
- **Bulanık Mantık:** Bulanık mantığın (BM), iki farklı anlamı vardır. Dar bir anlamda bulanık mantık, bir mantıksal sistem demektir, hâlbuki daha geniş bir anlamda ve günümüzde kullanım üstünlüğü anlamında, bulanık mantık genellikle bulanık küme teorisiyle [5] eş anlamdadır. Bir bulanık küme, keskinsiz bir küme demektir. Bu küme, bir kısmi üyelik derecesine sahip olan elemanları içermektedir. Bir bulanık küme, girdi alanında olan elemanlar ve 0 ile 1 aralıklarında olan değerlerin ilişkisi demektir. Bir üyelik fonksiyonu, bir eğriden oluşmaktadır. Bu eğri, girdi alanında olan her noktanın, 0 ile 1 arasında üyelik miktarına, nasıl bağlanacağını anlatmaktadır. Üyelik fonksiyonu, basitlik, kolaylık, hız ve verimlilik bakımından uygun olarak keyfi bir eğride olabilir. Tipik olarak, kullanılan üyelik fonksiyonları, üçgen, dikdörtgen, trapezoidal, gauss, sigmoidal vb. fonksiyonlardan oluşmaktadır [130].

Bir bulanık mantık, IF-THEN (eğer-şayet) kurallarından oluşmaktadır. Bu kuralda IF kısmı, varsayım ve THEN kısmı ise sonuç olarak belirlenir. Bulanık kurallar, genellikle bulanık operatörlerini kullanan, çeşitli birleşmiş varsayımlardan oluşmaktadır. Genellikle bir kural tek başına, çok iyi sonuçlar veremez. Bu nedenle birbirleriyle çalışan iki veya daha çok kurallara ihtiyaç vardır. Her kuralın çıktısı bir bulanık kümeden oluşmaktadır, ancak tüm kuralların toplam sonucu yalnız bir sayıdan oluşmaktadır. Bu nedenle, önce, her kuralın çıktısı olan kümeler toplanır ve yalnız bir küme oluşur. En çok kullanılan toplama metotları: en büyük, olasılıklı ve SUM yöntemlerinden oluşmaktadır. Sonra elde edilen küme, bir tek sayı elde edilmek için durulanmalıdır. En çok yaygın durulaştırma metotları: En Büyük üyelik yöntemi, Ağırlık merkezi yöntemi, Ağırlıklı ortalama yöntemi, Ortalamaların en büyüğü yöntemi, Toplamların ortalaması, En büyük alanın merkezi, En büyüklerin ortalaması ve İlk en büyük vb. yöntemlerinden oluşmaktadır.

Bulanık mantığı kullanarak girdi ve çıktı arasında bir ilişki kurma prosesine bulanık çıkarım denilir. Bir bulanık mantık yapısı, bir bilgi tabanı, çıkarım motoru ve fonksiyonlardan oluşmaktadır. Bilgi tabanının iki elemanı vardır: dil terimli kuralı ve bulanık kuralı. Dil terimli kural, iki bulanık öncül kısım ve soncul kısma bölünmektedir. Bilgi bir sıra IF-THEN kurallarından oluşur ve girdi ve çıktılar arasında bir ilişki kurar ve bulanık mantık sistemi bu kuralları göz önüne alarak sonuçları tahmin eder. Şekil 15 ve Şekil 16'da bir bulanık mantık ve bulanık çıkarım sistemini görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi kesme parametreleri ve ölçülen değişkenler girdi olarak bulanık mantık sistemine verilir ve bulanık mantık sistemi, takımın durumunu tahmin eder.

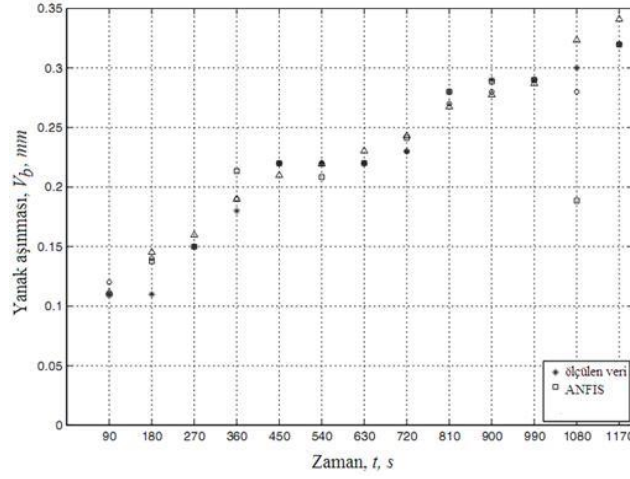


Şekil 15. Takım aşınmasının izlenmesi için Bulanık Mantık sisteminin genel yapısı [93]



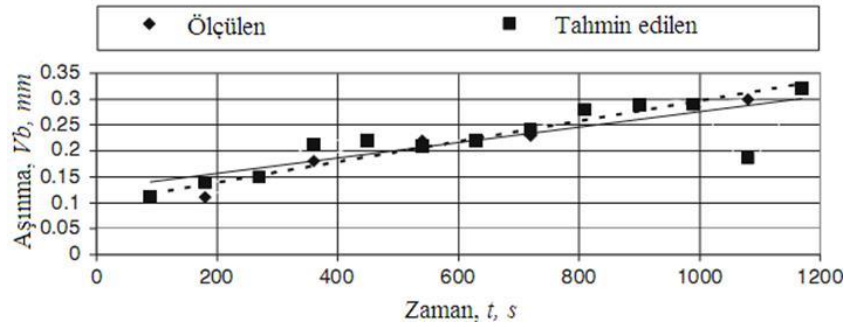
Şekil 16. Çok girdili bir bulanık çıkarım sistemi

Agustin Gajate ve diğerleri [131], takım yanak aşınmasının izlenmesi için ANFIS modeli kullanmışlardır. Talaş kaldırma işlemi iki tip malzeme (gri dökme demir ve alaşımlı çelik) ve kaplamalı bir kesici uç dikkate alınarak yapılmıştır. Üç seviyeli kesme hızı, iki seviyeli ilerleme ve sabit talaş derinliği kesme parametreleri olarak seçilmiştir. Titreşim, kesme kuvvetleri, AY ve zaman, YSA sisteminin kurgulanmasında girdi olarak modele verilmiş ve takım aşınması tahmin edilmiştir. Takım aşınmasının tahmin edilen sonuçları, grafik olarak ve farklı kesme parametreleri dikkate alınarak hazırlanmıştır (Şekil 17). ANFIS esaslı yapılan bu çalışmada, bulanık mantık yaklaşımı ile YSA yaklaşımının bir araya getirilebileceği ön plana çıkarılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda takım aşınma tahmini için yerel (malzemeye, kesiciye, işleme parametrelerine özgün) modellerin genel modellere göre daha güvenilir olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 17. ANFIS modelinin sonuçları ve ölçülen değerlerin karşılaştırılması
($V=94$ m/min, $f=0.08$ mm/rev, $d=0.7$ mm, Malzeme: En 24) [131]

Vishal ve diğerleri [132], takım yanak aşınmasının izlenmesi için bulanık mantık yöntemini kullanmışlardır. İki tip kesici uç (CCMT060204 TTS ve bir kaplamasız uç), iki seviyede kesme hızı, iki seviyede ilerleme ve sabit talaş derinliği dikkate alınmıştır. Takım aşınmasının izlenmesinde kesme kuvvetleri ve titreşim genliği ölçülmüş ve bulanık mantık modeline verilerek izleme işlemi yapılmıştır. Zaman, kuvvet, titreşim ve AY ayrı ayrı girdi olarak bulanık modele verilmiştir. Ayrıca takım yanak aşınmasının tahmin sonuçları grafiksel olarak farklı kesme parametreleri için verilmiştir (Şekil 18). Bu çalışma sonucunda, bulanık mantık yönteminin kullanılabilir olduğu vurgulanmış, tahmin modelinin daha doğru sonuçları vermesi için deneylerin sayısının artırılması önerilmiştir.



Şekil 18. Bulanık mantık modelinin sonuçları ve ölçülen değerlerin karşılaştırılması
($V=94$ m/min, $f=0.06$ mm/rev, $d=0.7$ mm, Malzeme: dökme demir) [132]

Takım durumunun izlenmesi ve tahmini için birçok araştırmacı tarafından, muhtelif karar destek sistemleri kullanılmış ve geliştirilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Literatürde kullanılan karar destek sistemleri

Destek Karar Sistemi	Kaynaklar
Yapay sinir ağları	Kılavuz çekme [29, 45], Tornalama [3, 16, 37, 54, 62] Matkap [38, 39, 42, 55].
Bulanık mantık	Tornalama [30], Frezeleme [22, 63], Delik tornalaması [56].
Üretken algoritma (GA)	Tornalama [54, 133]

Adaptifneuro bulanık çıkarım sistemi (ANFIS)	Tornalama [11, 58, 62], Frezeleme [27].
Bayes Ağlar	Frezeleme [45].
Hiyerarşik algoritması	Mikro frezeleme [18], Tornalama [134, 135].

III. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, takım durumunun izlenmesi için son yıllarda yapılan çalışmalar göz önüne alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. En yeni çalışmalar sonucunda gelişmeler irdelenmiş ve çalışmalarda yapılan araştırmalar yedi farklı grup olarak incelenmiştir. Bir takım durumu izleme sisteminin tüm bu yedi alanların bilimsel olarak tanımlanmasının gerektirdiği için, detaylı olarak bu alanlar tartışılmıştır. Bu alanlar böyledir:

- Talaş kaldırma durumunu izleyen algılayıcılar
- Etkin sinyal işleme teknikleri
- İzleme sınırlılıkları
- Modelleme için kullanılan duyuşal özellikler
- İstenen verilerin seçilmesi ve çıkarılması
- Talaş kaldırma işleminin modellemesi için deney tasarımı
- Karar destek sistemleri ve paradigmaları

Çalışmada, günümüze kadar kullanılan tüm etkili değişkenler ve algılayıcılar tartışılarak, avantajları ve dezavantajları üzerine incelemeler yapılmıştır. Talaş kaldırma işlemi vb. durumlara bağlı olarak izleme sınırlılıkları vurgulanmış ve işleme göre uygun algılayıcıların sınırlılıkları denilmiştir. En güvenilir çalışmalara bakarak en etkin sinyal işleme teknikleri, duyuşal özellikleri dikkate alınarak araştırılmıştır. İstatistiksel teknikleri göz önüne alınarak takımın durumunu açık bir şekilde ifade eden farklı veri seçilme ve çıkarma türleri incelenmiştir. Takım izleme modelinin genelliğinin geliştirilmesi için kullanılan ve en çok tanınan deney tasarımı metotları yapılmıştır. Tahmin işlemini yapan ve gelişmede olan birçok karar destek sistemleri bulunmakta olduğu için, bu çalışmada en güvenilir karar destek sistemleri açık bir şekilde anlatılmış ve farklı deney tasarımına uygun olan yöntemler bahsedilmiştir.

V. KAYNAKLAR

- [1] Cook, N.H. *Journal of Engineering for Industry*, **95(4)** (1973) 931.
- [2] Chen, J.C. and J.C. Chen *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **25(5-6)** (2005) 427.
- [3] Özel, T. and Y. Karpat *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **45(4)** (2005) 467.
- [4] Benardos, P. and G.-C. Vosniakos *International journal of machine tools and manufacture*, **43(8)** (2003) 833.
- [5] Teti, R., et al. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **59(2)** (2010) 717.
- [6] Liang, S.Y., R.L. Hecker, and R.G. Landers, *Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art*, **ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition**, 2002, 599-610.
- [7] Franco-Gasca, L.A., et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **40(7-8)** (2009) 676.
- [8] Guyon, I. and A. Elisseeff *The Journal of Machine Learning Research*, **3**((2003) 1157.
- [9] Shi, D., D. Axinte, and N. Gindy *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **34(1-2)** (2007) 34.
- [10] Lee, D.-E., et al. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46(2)** (2006) 176.
- [11] Chen, B., et al. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **25(7)** (2011) 2526.
- [12] Heinemann, R. and S. Hinduja *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **52(1)** (2012) 69.
- [13] Arul, S., L. Vijayaraghavan, and S. Malhotra *Journal of materials processing technology*, **185(1)** (2007) 184.
- [14] Qin, F., et al. *Wear*, **267(5)** (2009) 991.
- [15] Binsaeid, S., et al. *Journal of Materials Processing Technology*, **209(10)** (2009) 4728.
- [16] Deiab, I., K. Assaleh, and F. Hammad *Mechanical Systems and Signal Processing*, **23(5)** (2009) 1719.
- [17] Jemielniak, K. and P. Arrazola *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, **1(2)** (2008) 97.
- [18] Jemielniak, K., S. Bombiński, and P. Aristimuno *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **57(1)** (2008) 121.
- [19] Cao, H., et al. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **48(2)** (2008) 141.
- [20] Marinescu, I. and D.A. Axinte *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **48(10)** (2008) 1148.
- [21] Marinescu, I. and D. Axinte *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **49(1)** (2009) 53.
- [22] Brezak, D., et al. *Journal of Intelligent Manufacturing*, **23(3)** (2012) 797.
- [23] Li, H., H. Zeng, and X. Chen *Journal of Materials Processing Technology*, **180(1)** (2006) 296.
- [24] Bhattacharyya, P., D. Sengupta, and S. Mukhopadhyay *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21(6)** (2007) 2665.
- [25] Ghosh, N., et al. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21(1)** (2007) 466.
- [26] Huang, S., et al. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **47(3)** (2007) 444.
- [27] Uros, Z., C. Franc, and K. Edi *journal of materials processing technology*, **209(3)** (2009) 1504.
- [28] Zhu, K., Y. San Wong, and G.S. Hong *Mechanical Systems and Signal Processing*, **23(2)** (2009) 547.
- [29] Kaya, B., C. Oysu, and H.M. Ertunc *Advances in Engineering Software*, **42(3)** (2011) 76.

- [30] Ren, Q., et al. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **24(2)** (2011) 260.
- [31] Tansel, I.N., et al. *Journal of Intelligent Manufacturing*, **24(1)** (2013) 147.
- [32] Wang, M. and J. Wang *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **59(5-8)** (2012) 463.
- [33] Scheffer, C., et al. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **43(10)** (2003) 973.
- [34] Cakir, M.C. and Y. Isik *Journal of Materials Processing Technology*, **159(2)** (2005) 191.
- [35] Li, W., et al. *Journal of materials processing technology*, **170(1)** (2005) 374.
- [36] Luo, X., et al. *Wear*, **259(7)** (2005) 1235.
- [37] Purushothaman, S. *Journal of Intelligent Manufacturing*, **21(6)** (2010) 717.
- [38] Panda, S., D. Chakraborty, and S. Pal *Applied Soft Computing*, **8(2)** (2008) 858.
- [39] Sanjay, C., M. Neema, and C. Chin *Journal of Materials Processing Technology*, **170(3)** (2005) 494.
- [40] Kim, D.W., et al. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **49(3)** (2009) 246.
- [41] Rawat, S. and H. Attia *Wear*, **267(5)** (2009) 1022.
- [42] Panda, S., et al. *Journal of Materials Processing Technology*, **172(2)** (2006) 283.
- [43] Tsao, C. and H. Hocheng *International journal of mechanical sciences*, **49(8)** (2007) 983.
- [44] Remadna, M. and J.F. Rigal *Journal of Materials Processing Technology*, **178(1)** (2006) 67.
- [45] Kilundu, B., P. Dehombreux, and X. Chimentin *Mechanical Systems and Signal Processing*, **25(1)** (2011) 400.
- [46] Ding, F. and Z. He *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **57(5-8)** (2011) 565.
- [47] Orhan, S., et al. *NDT & E International*, **40(2)** (2007) 121.
- [48] Alonso, F. and D. Salgado *Mechanical Systems and Signal Processing*, **22(3)** (2008) 735.
- [49] Salgado, D. and F. Alonso *Journal of Materials Processing Technology*, **171(3)** (2006) 451.
- [50] Sevilla-Camacho, P., et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **53(9-12)** (2011) 1141.
- [51] Li, X., G. Ouyang, and Z. Liang *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **48(3)** (2008) 371.
- [52] Choi, Y.J., M.S. Park, and C.N. Chu *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **48(1)** (2008) 29.
- [53] Salgado, D. and F. Alonso *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **47(14)** (2007) 2140.
- [54] Pal, S., et al. *Journal of Intelligent Manufacturing*, **22(4)** (2011) 491.
- [55] Patra, K., S.K. Pal, and K. Bhattacharyya *Applied Soft Computing*, **7(3)** (2007) 929.
- [56] Du, R. and K. Yeung *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **19(2)** (2006) 145.
- [57] Cakan, A. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **52(9-12)** (2011) 897.
- [58] Dinakaran, D., S. Sampathkumar, and N. Sivashanmugam *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **49(15)** (2009) 1234.
- [59] Verl, A., et al. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **58(1)** (2009) 375.
- [60] Rivero, A., L.L. de Lacalle, and M.L. Penalva *Mechatronics*, **18(10)** (2008) 627.
- [61] Franco-Gasca, L.A., et al. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46(3)** (2006) 381.
- [62] Silva, R.G. *Journal of Intelligent Manufacturing*, **21(6)** (2010) 823.
- [63] Boutros, T. and M. Liang *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **47(11)** (2007) 1702.

- [64] Wang, W., Y. Wong, and G. Hong *Wear*, **261(2)** (2006) 164.
- [65] Jurkovic, J., M. Korosec, and J. Kopac *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **45(9)** (2005) 1023.
- [66] Wang, W., Y. Wong, and G.S. Hong *Computers in Industry*, **56(8)** (2005) 816.
- [67] Lüthje, H., et al. *Sensors and Actuators A: Physical*, **116(1)** (2004) 133.
- [68] Byrne, G., et al. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **44(2)** (1995) 541.
- [69] Oliveira, J., et al. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **222(12)** (2008) 1605.
- [70] Pritschow, G. and C. Kramer *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **54(1)** (2005) 375.
- [71] Axinte, D. and N. Gindy *International journal of production research*, **42(13)** (2004) 2679.
- [72] Stein, J. and C.-H. Wang *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, **112(2)** (1990) 239.
- [73] Dong, J., et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **30(9-10)** (2006) 797.
- [74] Ertekin, Y.M., Y. Kwon, and T.-L.B. Tseng *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **43(9)** (2003) 897.
- [75] Fnides, B. and M. Yallese *Mechanics*, **70(2)** (2016) 73.
- [76] Chen, S.-L. and Y. Jen *International journal of machine tools and manufacture*, **40(3)** (2000) 381.
- [77] Altintas, Y. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **28(2)** (1988) 157.
- [78] Liu, Y. and C. Wang *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **15(11)** (1999) 791.
- [79] El Ouafi, A., M. Guillot, and A. Bedrouni *Journal of Intelligent Manufacturing*, **11(6)** (2000) 535.
- [80] Zhang, J.Z. and J.C. Chen *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **31(9-10)** (2007) 877.
- [81] Azouzi, R. and M. Guillot *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **37(9)** (1997) 1201.
- [82] Benardos, P. and G.C. Vosniakos *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **18(5)** (2002) 343.
- [83] Byrne, G., D. Dornfeld, and B. Denkena *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **52(2)** (2003) 483.
- [84] Aknouche, H., et al. *journal of materials processing technology*, **209(6)** (2009) 2918.
- [85] Bhuiyan, M., I. Choudhury, and M. Dahari *Journal of Manufacturing Systems*, **33(4)** (2014) 476.
- [86] Prasad, B.S., M.P. Babu, and Y.R. Reddy *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **230(2)** (2016) 203.
- [87] Chen, J.C., et al. *J Ind Technol*, **15(3)** (1999) 1.
- [88] Jang, D.Y., et al. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **36(4)** (1996) 453.
- [89] Abburi, N. and U. Dixit *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **22(4)** (2006) 363.
- [90] Lee, S.S. and J.C. Chen *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **22(7-8)** (2003) 498.
- [91] Abouelatta, O. and J. Madl *Journal of materials processing technology*, **118(1)** (2001) 269.
- [92] Tsai, Y.-H., J.C. Chen, and S.-J. Lou *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **39(4)** (1999) 583.
- [93] Aliustaoglu, C., H.M. Ertunc, and H. Ocak *Mechanical Systems and Signal Processing*, **23(2)** (2009) 539.
- [94] Porat, Y., Y. Tsaliah, and E. Doron, *Piezoelectric transducer*. 2000, Google Patents.

- [95] Bahr, B., S. Motavalli, and T. Arfi *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **10(5)** (1997) 314.
- [96] Sugita, N., et al. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **64(1)** (2015) 77.
- [97] Davies, M.A., et al. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **56(2)** (2007) 581.
- [98] Kurada, S. and C. Bradley *Computers in industry*, **34(1)** (1997) 55.
- [99] Ryabov, O., et al. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **45(1)** (1996) 97.
- [100] Mannan, M., A.A. Kassim, and M. Jing *Pattern Recognition Letters*, **21(11)** (2000) 969.
- [101] Shinno, H., H. Hashizume, and H. Sato *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **46(1)** (1997) 53.
- [102] Abu-Zahra, N.H. and G. Yu *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **40(11)** (2000) 1619.
- [103] Nayfeh, T.H., O.K. Eyada, and J.C. Duke *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **35(10)** (1995) 1385.
- [104] Abellan-Nebot, J.V. and F.R. Subirón *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **47(1-4)** (2010) 237.
- [105] Hong, G., M. Rahman, and Q. Zhou *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **36(5)** (1996) 551.
- [106] Li, X. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **42(2)** (2002) 157.
- [107] Prickett, P. and C. Johns *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **39(1)** (1999) 105.
- [108] Scheffer, C. and P. Heyns *Mechanical systems and signal processing*, **15(6)** (2001) 1185.
- [109] Axinte, D.A. and N. Gindy *Wear*, **254(3)** (2003) 370.
- [110] Lee, J., et al. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **44(1)** (1995) 59.
- [111] Lee, D.J., S.H. Kim, and J.H. Ahn *KSME International Journal*, **18(7)** (2004) 1055.
- [112] Kim, H., et al. *Journal of Materials Processing Technology*, **124(3)** (2002) 267.
- [113] Govekar, E., J. Gradišek, and I. Grabec *Ultrasonics*, **38(1)** (2000) 598.
- [114] Kim, H.-Y. and J.-H. Ahn *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **42(10)** (2002) 1113.
- [115] Teti, R., et al. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **55(1)** (2006) 75.
- [116] Mezentsev, O.A., et al. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **42(4)** (2002) 479.
- [117] KARABATAK, M. and K. Fuat *Politeknik Dergisi*, **19(3)** (2016)
- [118] Rao, K.V., B. Murthy, and N.M. Rao *Measurement*, **51**((2014) 63.
- [119] Kant, G. and K.S. Sangwan *Procedia CIRP*, **31**((2015) 453.
- [120] D'Addona, D.M., et al. *Procedia CIRP*, **41**((2016) 431.
- [121] Axinte, D.A. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46(12)** (2006) 1445.
- [122] Kamarthi, S., S. Kumara, and P. Cohen *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **122(1)** (2000) 12.
- [123] Bukkapatnam, S.T., S.R. Kumara, and A. Lakhtakia *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, **122(1)** (2000) 89.
- [124] Bukkapatnam, S.T., et al. *Signal Processing*, **82(10)** (2002) 1351.
- [125] Palanisamy, P., I. Rajendran, and S. Shanmugasundaram *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **37(1-2)** (2008) 29.
- [126] Lin, J., D. Bhattacharyya, and V. Kecman *Composites Science and Technology*, **63(3)** (2003) 539.
- [127] Kara, F., K. Aslantaş, and A. Cicek *Applied Soft Computing*, **38**((2016) 64.
- [128] Kara, F., K. Aslantas, and A. Çiçek *Neural Computing and Applications*, **26(1)** (2015) 237.

- [129] Attanasio, A., et al. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **135(5)** (2013) 051012.
- [130] Melin, P. and O. Castillo *Applied soft computing*, **21**((2014) 568.
- [131] Gajate, A., et al. *Journal of Intelligent Manufacturing*, **23(3)** (2012) 869.
- [132] Sharma, V.S., S. Sharma, and A.K. Sharma *Journal of Intelligent Manufacturing*, **19(1)** (2008) 99.
- [133] Achiche, S., et al. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **15(3)** (2002) 303.
- [134] Jemielniak, K. and S. Bombiński *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **220(3)** (2006) 375.
- [135] Kuo, R. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **13(3)** (2000) 249.