



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

CNC İşleme Merkezlerinde Hataların İş Esaslı Yaklaşımla Düzeltilmesi

 Gökhan ÖNER^a,  Tanfer YANDAYAN^a,  Sıtkı AKINCIOĞLU^{b,*}

^a TUBİTAK UME, Gebze, Kocaeli, TÜRKİYE

^b Makine Resim ve Konstrüksiyon Bölümü, Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: sitkiakincioglu@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.842244

ÖZET

Bu çalışmada, endüstri 4.0 uygulamalarında öne çıkan sıfır hata konseptine göre işparçasının işlenmesi sırasında düşük maliyetli kompanzasyon (telafi) metodu geliştirilmiştir. Yeni yöntem sayesinde, delik delme esnasında oluşan eksen hataları tespit edilmiş ve referans master blokları yardımıyla doğrulama faktörü bulunmuştur. Bu faktör kullanılarak, hata miktarı oranında nümerik kontrol (NC) kodları güncellenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, makine üzerine takılı ölçme probu yardımıyla doğru ve izlenebilir ölçüm yapılabildiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu yöntemin düşük bir maliyet ile hassas parça imalatında kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Delik mesafesi 500 mm için 55 µm olan tezgâhtan kaynaklanan eksen hatasının, yeni yöntemle ± 10 µm tolerans aralığında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kompanzasyon yöntemi yardımıyla eksen sapma değerleri %81 oranında iyileştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hassas üretim, Tezgâh hataları, Kompanzasyon, Sıfır hata

Correction of Errors in CNC Machining Centers with a Work Based Approach

ABSTRACT

In this study, according to the zero defect concept that stands out in industry 4.0 applications, low cost compensation (compensation) method has been developed during the processing of the workpiece. Thanks to the new method, the axis errors that occurred during drilling were detected and the verification factor was found by using reference gauge blocks. By using this factor, numerical control (NC) codes have been updated at the rate of error. According to the results, it was concluded that accurate and traceable measurement can be made with the help of the measuring probe attached to the machine. It was concluded that this method can be used in precision parts manufacturing at a low cost. It has been determined that the axis error originating from the bench, whose hole distance is 55 µm for 500 mm, is realized in the tolerance range of ± 10 µm with the new method. With the help of compensation method, axis deviation values are improved by 81%.

Keywords: Precise machining, Machine errors, Compensation, Zero error

I. GİRİŞ

Tüm dünyada imalat sanayisi büyük önem arz etmektedir. Talaşlı imalat sanayisinde de üniversal tip takım tezgâhları ve bilgisayarlı sayısal kontrol makineler (CNC) bulunmaktadır. Gelişen teknoloji ve istenilen kalitedeki ürünler sebebiyle, talepleri yeteri kadar karşılayamayan üniversal tip takım tezgâhları sanayideki yerlerini CNC işleme merkezine devretmeye başlamışlardır. CNC işleme merkezi ile birlikte hızlı, hassas ve kaliteli ürünlerin ortaya çıkması hem de işletmeler ve ürünlerin alıcıları için zaman verimliliği de sağlamıştır [1]. CNC işleme merkezi bazıları pozisyonlama bilgilerini vidalı millerden gelen verilerden alırken, bazı CNC işleme merkezi pozisyon kontrollerini optik cam cetvel ile sağlayarak vidalı millerden kaynaklı oluşabilecek hataları kompanze etmektedirler. Talaşlı imalat süreçlerinde tezgâhlarda kinematik hatalar, termal hatalar, kesme kuvveti kaynaklı hatalar, servo motor hataları ve takım aşınması gibi işleme hassasiyetini etkileyen faktörler mevcuttur [2]. Bu sebeple; bazı takım tezgâhı üreticileri Aerostatik/Hidrostatik mil ve kızaklar gibi sürtünmesiz hareketler sağlamaya çalışarak ya da İnvar çeliği gibi düşük ısıl genleşmeli malzemeler kullanarak ısı kaynaklı hataları azaltmaya çalışmışlardır. Birçok takım tezgâhı çalışma esnasında ısınmaktadır. Çalışma süresine bağlı olarak ısının etkisi ile tezgâhın hareketini sağlayan vidalı millerde genleşme olmaktadır. Bu genleşme, pozisyonlamalarını vidalı millerden alan CNC işleme merkezi için işleme esnasında hatalara sebebiyet vermektedir [3]. Sıcaklık etkisinden oluşabilecek hataları önlemek amacı ile farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu hataların en aza indirilmesi için bazı çalışmalar yapılmıştır.

Katageri ve arkadaşları [1] çalışmalarında CNC işleme merkezinde meydana gelen yalnızca ısı hata telafisi yaklaşımını ele almıştır. Takım tezgâhındaki ısıl hassas bölgenin tanımlanması, ısı hata telafisinin en zorlu görevidir. Isıl görüntüleme, şu anda takım tezgâhında termal hassas bölgeyi tanımlamak için kullanılan deneysel bir yöntemdir. Ancak bu yöntem daha fazla zaman, insan çabası ve yüksek maliyetle ilişkilidir. Bu nedenle, çalışmalarında, ısı duyarlı bölgeyi belirlemek için ısı hataya duyarlı yöntem ve ısı modal analiz yöntemi gibi iki sayısal yöntem kullandılar. Her iki yöntem kullanılarak türetilen matematiksel modeller, sonlu elemanlar metodu (FEA) sonuçlarıyla karşılaştırıldığında % 85-95 doğrulukla termal deformasyonu öngördüler. Böylelikle, daha fazla zaman, daha fazla insan çabası ve yüksek maliyetle ilişkilendirilen ısıl görüntüleme tekniği yerine, bu iki sayısal yöntem gelecekte takım tezgâhındaki ısıl noktaların seçimi için kullanılabilirliğini vurguladılar. Kono ve arkadaşları [4] geometrik hataları modellemek ve takım tezgâhı hatalarını Z eksen üzerinde ince hareket mekanizması ile telafi etmek için bir matematik yöntemi kullanarak frekans alanından hata analizi tanımladılar. Zhao ve arkadaşları [5] genetik algoritmaya dayalı geri yayılım yapay sinir ağı kullanan beş kritik sıcaklık noktasına dayalı bir model önerdi. Emann ve arkadaşları [6] çok eksenli bir makinenin geliştirilmiş bir hata modelini oluşturmak için bir yöntem sunmuştur. Bu yöntem katı cisim hareketleri varsayımına dayanır ve homojen dönüşüm matrislerini kullanır. Geliştirilen hata modeli, makinenin yapısal elemanlarının geometrisindeki ve karşılıklı ilişkilerindeki yanlışlıklardan ve bu elemanlar arasındaki göreceli hareketten kaynaklanan hataları hesaba katar. Model, özellikle makinenin çalışma hacmi içindeki genel hatanın sebeplerini belirlemek için kullanışlı olduğu sonucuna ulaştılar. Lee ve arkadaşları [7] termal hata modellemesi için bulanık mantık kullanan bir strateji tasarladı. Geliştirilen modelleme tekniği, iyi doğruluk ve sağlamlık için hata modeli parametreleri hesaplanarak CNC işleme merkezine uyguladılar. Blaser ve arkadaşları [8] uzun vadeli termal hata telafisi için model bazlı kompanzasyon değerlerini hesaplamak için diferansiyel denklem sistemi kullandılar. Uzun vadeli ölçümler ile termal hatalarda ve yönelim hatalarında önemli bir azalma olduğunu gösteren deney yaptılar. Mayr ve arkadaşları [9] çalışmalarında, beş eksenli bir takım tezgâhının döner ve döner eksen birimini hareket ettirmenin yanı sıra ana iş milini çalıştırmanın neden olduğu termal hataları telafi etmeye çalıştılar. Telafi yaklaşımı, bir diferansiyel denklem sisteminden oluşan dinamik bir gri kutu modeline dayanmaktadır. Üretilen ısı ile ilgili girdi parametreleri araştırdılar. Ortaya çıkan termal konum hataları ile model giriş parametresi arasındaki en iyi ilişki, takım tezgâhı eksenlerinin ve ana iş milinin soğutma gücünün ayarlanması için tespit ettiler. Ölçümlere dayanarak, tüm baskın termal konum hatalarının önemli ölçüde azaltılabileceği gösterdiler. Reddy ve arkadaşları [10] CNC tornalama tezgâhında daha iyi doğrulukla hassas bileşenler üretmeye yönelik çalışmışlardır. Hassas takım tezgâhları için gerçek zamanlı bir termal hata modeli kullanmışlardır. İleri beslemeli geri yayılım sinir ağı kullanarak termal hata telafisi modelinin geliştirilmesi ve ayrıca regresyon analizi

tekniki kullanarak basitleştirilmiş model ortaya çıkarmışlardır. Koordinat ölçme merkezi (Coordinate Measuring Machine – CMM) ölçüm desteği olmadan termal hata telafi modülü kullanarak 50 bileşen için 1 µm' den daha düşük doğrulukta yarıçap ölçümünde tekrarlanabilirlik ile üretim gerçekleştirmişlerdir. Huang ve arkadaşları [11] karmaşık haldeki termal hata modellerini basitleştirmek için yeni bir hata modeli sunmuştur. Bu hata modelinde yapay sinir ağı sistemini ve köpek balığı kokusu optimizasyonu algoritmasını kullanarak sistemi geliştirmiştir. Test sonuçlarında işleme hatasında % 32'lik bir azalmanın telafi sonrasında elde edildiğini göstermişlerdir. Mares ve arkadaşları [12] takım tezgâhında oluşabilecek termal hatalar için Python programlama dili kullanılarak gerçek zamanlı termal hataları telafi etmek için transfer fonksiyonlarını kullanan bir matematiksel model doğrudan bir CNC işleme merkezi kontrol sistemine uyguladılar. Yue ve arkadaşları [13] takım tezgâhı iş mili sisteminin termal hatasını değerlendirmek için 3 eksenli CNC işleme merkezinde deneyler yapmışlardır. Bulanık kümeleme ve gri korelasyon algoritmaları deneylerinde kullanmışlardır. Uyarlanabilir partikül sürüsü optimizasyon algoritmasına dayanarak, iş mili sistemi için eksenel ve radyal yönlerde termal hata modellerini oluşturduklar ve kompanzasyon etkilerini iş parçası işleme doğruluğu ile değerlendirmişlerdir. Liu ve arkadaşları [13] takım tezgâhlarındaki işleme sırasında oluşacak sıcaklık artışı ve termal hata arasındaki ilişkiyi inceleyebilecek matematiksel model oluşturmuşlardır.

Termal hatalar genellikle işlem aralarında belli periyotlarda gerçekleştirilir. Böylece hatalar oluşma aşamasındayken kontrol edilebilir. İşlem sırasında ölçüm ve kontrol sayesinde parça işleme planında modifikasyon yapılabilmektedir. Üretim sırasında kontrol üç farklı yolla yapılabilir. Bunlar parçanın tezgâh dışına alınıp ölçme cihazı ile ölçümü, parçanın tezgâh üzerinde ölçümü ve tezgâhta oluşabilecek hataların modelleme ile tahmini ve düzeltilmesidir. Bu şekilde yapılan işlemler sonucu uygulanan imalat yöntemine, kapalı çevrim imalatı adı verilir. Kapalı çevrim imalatı, (Closed Loop Manufacturing- CLM) firmaların ürün tasarımı, ürün planlaması, üretim yürütmesi, otomasyon ve sahadaki tüketici kullanımından gelen geri bildirimler ile üretimi senkronize etmesini ve optimize etmesini sağlayan endüstri 4.0 için üretimin önemli kavramlarından. İşbirliğine dayalı, bağlantılı bir bilgi döngüsü yaratan CLM, ürünlerin optimum kalitede imalatını sonlandırmak için, üretim sürecinin maliyetini, süresini ve kalitesini sürekli olarak iyileştiren metroloji entegrasyonu tabanlı çok fonksiyonlu bir bütündür [14]. Parçanın tezgâh üzerinde son pasodan önce ölçümü en verimli yöntemdir [15]. Çünkü kötü giden bir durum olduğunda müdahale ederek düzeltmek söz konusudur. Bunu gerçekleştirebilmek için, tezgâh hatalarından bağımsız ölçüm yapabilen ve tezgâh içinde çalışan bir ölçüm cihazına ihtiyaç vardır. Hala bu özellikleri taşıyan, arzu edilen doğrulukta çalışan uygun cihazlar tam anlamıyla geliştirilmemiştir. Daha ziyade, tezgâha entegreli prob ölçme sistemleri vardır ve kullanımı çok geniştir. Örneğin Renishaw ölçme problemleri. Bu problemlerin kullanımındaki en büyük sorun tezgâh eksenlerinde oluşan hataların, bu prob ile yapılan ölçümlerde de etkili olması ve tezgâhın mevcut performans durumuna göre hatalı ölçüm sonuçları vermesidir. Bu durum endüstriyel uygulamalarda çoğu zaman bilinmez ve bu problemler ile yapılan ölçümlerin hatasız olduğu düşünülür. Ölçüm verilerini tezgâh eksenlerinden gelen verilere göre oluşturan ölçme problemleri ile yapılan ölçümlerin doğruluğunu arttırarak işlem sırasında ölçüm yapmak mümkündür. Bu amaçla işlem sırasında prob sistemini kullanarak bir izlenebilir referans standart ölçümü yapıp, sistemin eksenlerinden ve prob sisteminden gelen hataları tespit edilebilir. Bu hataları analiz edip gerekli düzeltme faktörleri çıkarılırsa daha sağlıklı ve doğruluğu yüksek ölçüm yapmak mümkün olur. Yine aynı faktörü kullanarak, tezgâh kompanzasyon dosyasında düzeltme yapmak yerine, bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design – CAD) dosyasında bulunan ölçüler faktör ile işleme sokulup yeni ölçü değerleri bulunabilir. Bu ölçü değerleri ile parça işlendiği zaman mevcut hataları minimize etmek mümkündür. Fakat bu konuda yapılan fazla bir çalışma bulunmamaktadır. Bu yöntemin kullanılabilirliğinin saptanması bu nedenle önemlidir.

Bu çalışmada endüstri 4.0 uygulamalarında öne çıkan sıfır hata konseptine göre CNC işleme merkezi ile düşük maliyetli hassas parça imalatın için termal hataları en aza indiren yeni bir yöntem sunulmuştur. Tezgâh hataları imalat esnasında referans bir standardın ölçümü yapılarak tespit edilmiş ve gerekli düzeltmenin yapılabilmesi için hata faktörü hesaplanmıştır. Kompanzasyon dosyasına ulaşmak yerine, müdahalesi daha kolay olan CAD dosyası üzerindeki ölçüler değiştirilmiştir. İşleme aralarında iş parçası tezgâhtan sökülüp CMM ölçümleri gerçekleştirilerek hata miktarları değerlendirilmiştir.

II. MATERYAL METOT

A. İŞ PARÇASI

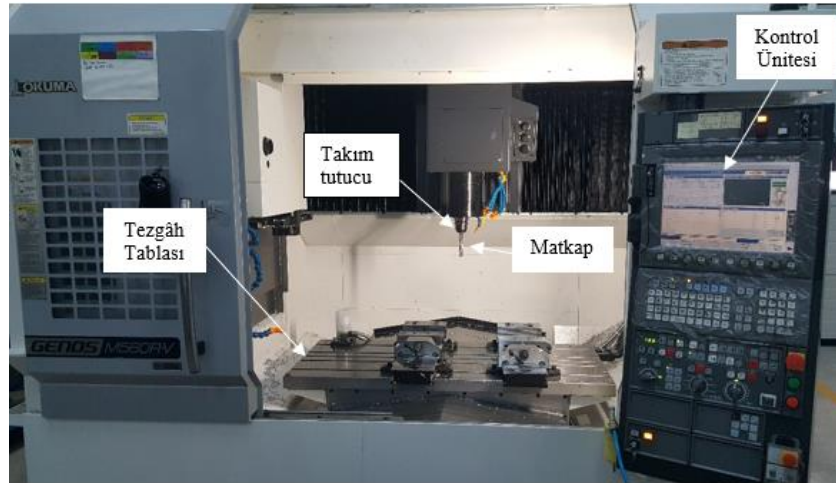
Ck45 çeliğinden üretilen test parçası Bessel noktalarından takım tezgâhının tablasına bağlanan diğer bir Ck45 çeliğine bağlanmıştır. İş parçası 580 x 250 x 20 mm olacak şekilde frezelemiştir ve her iki yüzeyi taşlanmıştır. Deneyi yapılacak parçanın ve diğer tüm aparatların Ck45 çeliğinden imal edilmesinin temel sebebi, termal uzamalardan ötürü tezgâh tablası ile yakın uzama göstermesidir. Ck45 çeliğinin sertifikasında yer alan kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Ck 45 çeliğinin Kimyasal Kompozisyonu (% ağırlık)

Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
Diğer	0,47	0,29	0,71	0,18	0,03	0,02	0,04

B. DELİK DELME

Delme işlemleri TÜBİTAK-UME kurum bünyesinde bulunan Japonya Menşei OKUMA marka Genos Seri M560R-V 3 eksen dik işleme merkezinde yapılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Deneylerde kullanılan CNC işleme merkezi

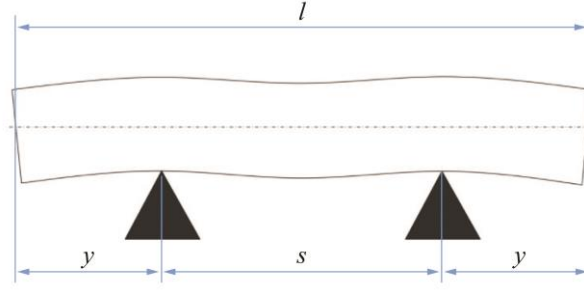
Deneyleri gerçekleştirilen Ck45 çeliği tasarlanırken deney esnasında çeliğin merkez hattından maksimum sapma alanını en aza indirmek için destek noktaları olarak Bessel noktaları kullanılmıştır. Bessel noktaları hesaplanırken Eşitlik 1 kullanılır.

$$y = 0,2203xl \quad (1)$$

l , kiriş boyu olarak kabul edildiğinde, Bessel noktaları (y) her bir uçtan olacak şekilde mesafeleri bulunur [16]. Ya da iki destek noktasının merkezden birbirlerine olan uzaklıkları (s) bulunmak istenirse, Eşitlik 2 kullanılabilir.

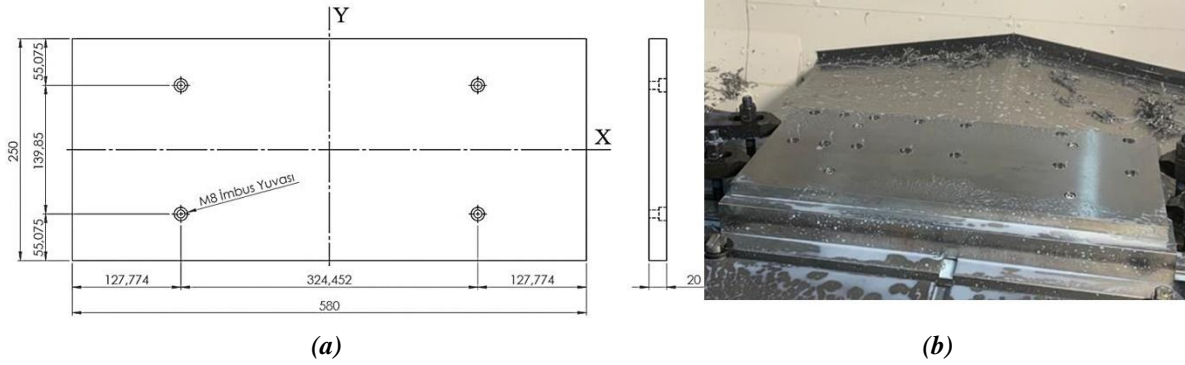
$$s = l - (2x(0,2203xl)) \quad (2)$$

Bessel Noktalarından Desteklenen Kirişin Deformasyonu Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Bessel noktalarından desteklenen kirişin gösterimi

Şekil 3'te iş parçası Ck45 gösterilmiştir. Alt ve üst yüzeyleri taşlanmış ve Bessel noktalarından montajı yapılmıştır. Bu plakayı destek noktalarından bağlamak için Bessel eşitliği kullanılarak X yönündeki s mesafesi 324,452 mm ve Y yönündeki s mesafesi 139,85 mm bulunmuş olup bu değerler doğrultusunda bağlama delikleri açılmıştır (Şekil 3).

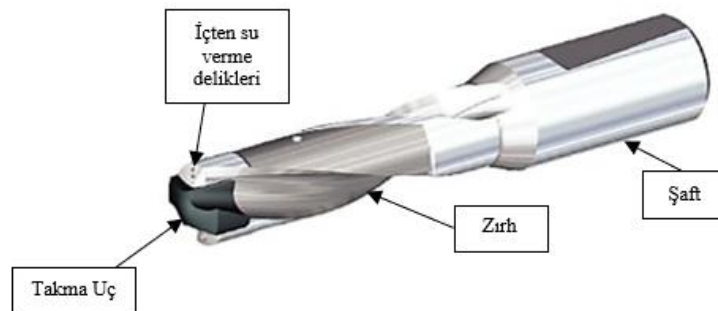


Şekil 3. İş parçasının bağlantısı için belirlenen Bessel noktalarının (a) ölçüleri ve (b) iş parçası

C. DENEYLERDE KULLANILAN MATKAP ve PARAMETRELER

Bu deneyde tezgâh hatalarının bulunması ve kompanze edilmesi için 580 mm boyunca $\varnothing 17$ mm matkap ile sırasıyla 50 mm, 100 mm, 175 mm, 250 mm, 400 mm ve 500 mm aralıklarla delikler delinmiştir. Delme deneyleri Y eksenini yönünde 3 kez tekrarlanmıştır. Bu araştırmada delme işlemi esnasında $\varnothing 17$ mm takma uçlu 3 boyutlu delik delebilecek içten su vermeli 140° kesme açısı olan modüler takma uçlu matkap kullanılmıştır (

Şekil 4). Deneylerde Kennametal marka KSEM170R5WN20M kodlu modüler kaplamasız karbür takma uçlu matkap kullanılmıştır. Derin delik ve hassas yüzeylerin çıkması istendiğinde kullanılan bir matkap türüdür. CMM ile delik çaplarının ölçümü esnasında daha iyi sonuç vermesi açısından delici matkabın çapı büyük seçilmiştir.



Şekil 4. Deneylerde kullanılan modüler takma uçlu karbür matkap

Talaş kaldırma öncesi bilgisayar destekli üretim (Computer Aided Manufacturing – CAM) programı hazırlanırken kesici takım üreticisinin devir ve ilerleme kataloğundan Ck45 çeliğine göre kesme parametreleri seçilip veriler CAM programına girilmiştir. Bu parametreler Tablo 2’ de verilmiştir.

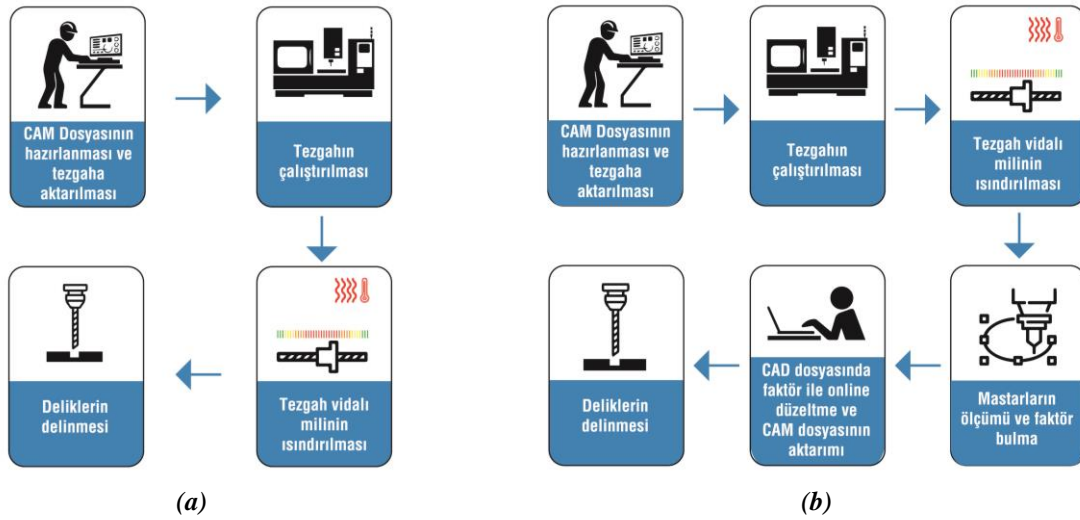
Tablo 2. Deneylerde kullanılan parametreler

Faktörler	Birimler	Değer
Devir sayısı	n	1400 dev/dak
Kesme hızı	Vc	75 m/dak
Tabla ilerlemesi	Vf	245 mm/dak
Devir başına ilerleme	fn	0,175 mm/dev

Delme işleminde takım ve iş parçasını soğutma amaçlı Houghton marka Sitala E 403 modeli bor yağı kullanılmıştır. Soğutma suyu % 5 bor yağı ve %95 su karışımı ile hazırlanmıştır.

D. YÖNTEM

CK45 çeliğinden hassas parça üretimi için CNC işleme merkezlerinde delinmesinde oluşabilecek hatalar ve hataları önleme yöntemleri üzerinde çalışılmıştır. Delme esnasında tezgâhın ısınmasından dolayı deliklerin merkezlerinde kaymalar meydana gelmektedir. Tezgâh soğukken delik eksenleri tolerans değerleri arasında delinirken, bu durum tezgâh ısındığında değişmektedir. Tezgâhın ısınmasından kaynaklı eksen kaçma hatalarının CNC işleme merkezi kontrol sistemindeki kompanzasyon dosyasına müdahale etmeden düzeltilmesi esas alınmıştır. Kompanzasyon faktörünün belirlenebilmesi ve hataların giderilmesi için iki tür prosedür kullanılmıştır. Bu prosedürler Prosedür A ve Prosedür B olarak adlandırılmıştır. Prosedür A ve B akış şeması Şekil 5’de verilmiştir.



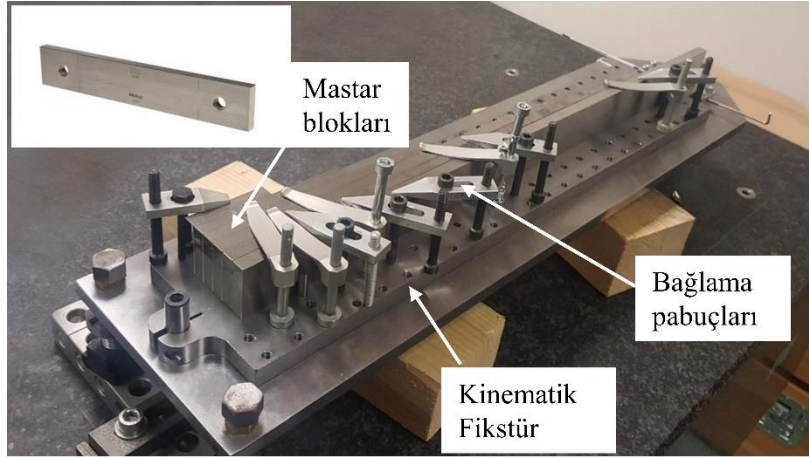
Şekil 5. Deneylerde uygulanan (a) Prosedür A ve (b) Prosedür B'ye ait akış şeması

Prosedür A'ya göre; Tezgâh millerinin ısıtılması, CAM dosyasını yükleme, Delik delme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Prosedür B'ye göre ise Tezgâh millerinin ısındırılması, Master ölçümü, Faktör bulma, CAD dosyasında faktör ile eş zamanlı düzeltme, CAM dosyasını yükleme, Delik delme işlemleri sırasıyla gerçekleştirilmiştir. Yani Prosedür A'da tezgâh ısıdıktan sonra delme işlemleri yapılmıştır. Ölçülen hata değerlerine göre Prosedür B'de NC kodlarında düzeltmeler yapılmıştır. Eksenden kaçma miktarı kadar NC kodları değiştirilmiştir.

Deneyisel çalışmada da tezgâhın bir eksenini aşırı harekete tabi tutulup, vidalı milin ısınması sonucu, yarım metrelik bir mesafe için 55 µm bir pozisyon hatası oluşturulmuştur. Daha sonra, CK45 Çelik parça üzerine geliştirilen kompanzasyon metodu kullanılarak ve kullanılmadan delikler açılmıştır. Sonuçlar parçanın tezgâhtan sökülüp CMM ile ölçümleri gerçekleştirilerek değerlendirilmiştir.

E. MASTAR BLOKLARI ve KİNEMATİK FİKSTÜR

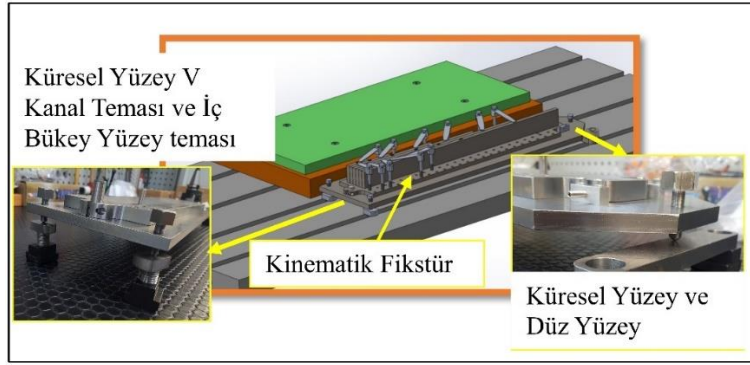
Düzeltilme faktörünü belirlemek için 1µm hassasiyete sahip master blokları, kinematik prensiplere göre tasarlanmış özel aparatlarla bağlanarak kullanılmıştır. Ölçümler için boyut ölçü değerleri $\pm 0,0003$ mm hassasiyetinde 50 mm, 100 mm, 175 mm, 250 mm, 400 mm ve 500 mm nominal boylara sahip master blokları kullanılmıştır. Kinematik fikstür ile kullanılan master blokları Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Tezgâh hatalarının ölçümünde kullanılan kinematik fikstür ile birlikte kullanılan master blokları

Master bloklarını yerleştirebilmek için Ck45 çeliğinden özel bir aparat üretilmiştir. Bu aparatlar kinematik prensip üzerine tasarlanıp üretilmiştir. Bu kinematik prensipte ideal olarak bir bileşeni diğerine göre konumlandırmak için bilinen altı temas noktasını kullanılmıştır. Kinematik prensipli fikstürün esas amacı ise, her kullanımda, yerinden alındıktan sonra, hassas ayar yapılmasına gerek duyulmamasıdır. Yerinden kaldırılıp tekrar koyulduğunda küre cıvatalar önceden açılmış V, Küre ve düz yüzeylere oturduğu için montaj kolaylığı sağlamanın yanında, master blokları ilk ayarlandığı konuma (tezgâh eksenlerine paralel konum) çok düşük bir hata ile yerleştirilmektedir. Aparatın bu performansı, testler sırasında doğrulanmıştır.

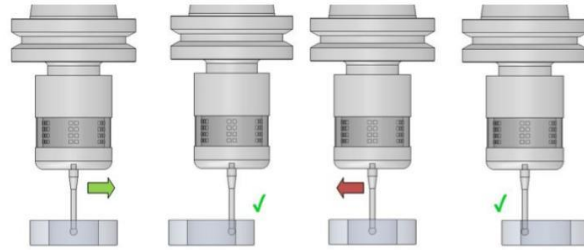
Bir kinematik bağlantı tekrarlanabilirliği ve hassasiyeti, kesin kısıtlama tasarımı fikrinden gelir. Kesin kısıtlama tasarımının ilkesi, kısıtlama noktalarının sayısının, sınırlandırılacak serbestlik derecesi sayısına eşit olmasıdır. Mekanik bir sistemde altı potansiyel serbestlik derecesi vardır. Üç doğrusal serbestlik derecesi vardır: X, Y ve Z eksenini ile her eksen etrafında genellikle pitch, roll ve yaw olarak adlandırılan üç dönme serbestlik derecesi vardır. Bir sistem kısıtlanmışsa, iki parça serbestlik derecelerinden birinde hareket etmekte serbesttir. Sistem aşırı kısıtlanmışsa, sistemin deformasyon altında bozulmasına neden olabilir, aşırı kısıtlı bir sistem tasarlarlarken ekstra özen gösterilmesi gerekir. Kinematik bağlantı tasarımları, yalnızca sınırlandırılacak olan ve bu nedenle öngörülebilir olan serbestlik derecesi sayısına eşit noktaların sayısı ile temas kurar [17]. Ayrıca Şekil 7'de görüldüğü gibi temas noktasındaki cıvataların ön taraflarına Ø 4 bilye gömülerek diğer parça ile temas sağlanmış olup cıvatalar döndürüldükleri takdirde kinematik fikstür 3 ayaktan teraziye getirilebilir vaziyette imal edilmiştir. Aparat yerçekimi yönünde açılabilir hareket (teraziye alma) işlemi yapabilirken, yatay ekseninde de açılabilir hareket yapabilmektedir. Bu sayede, tezgâha yerleşim yapıldığında, master blokları tezgâh eksenlerine hassas bir şekilde paralel olarak ayarlanabilmektedir. Ayar sonrası cıvatalar somun ile kilitlenip, mevcut konumu güvenli olarak bırakılabilmektedir.



Şekil 7. İşparçasının ve kinematik fikstürün bağlantı düzeneği

F. HALKA MASTARLAR

CNC işleme merkezinde yapacağımız deneyler için Renishaw probunun çapını bulmak amacıyla ayar mastarları, kullanılmıştır. Şekil 8’ de bu prob çapının bulunması için halka yüzeylerine temas etme durumu gösterilmiştir.



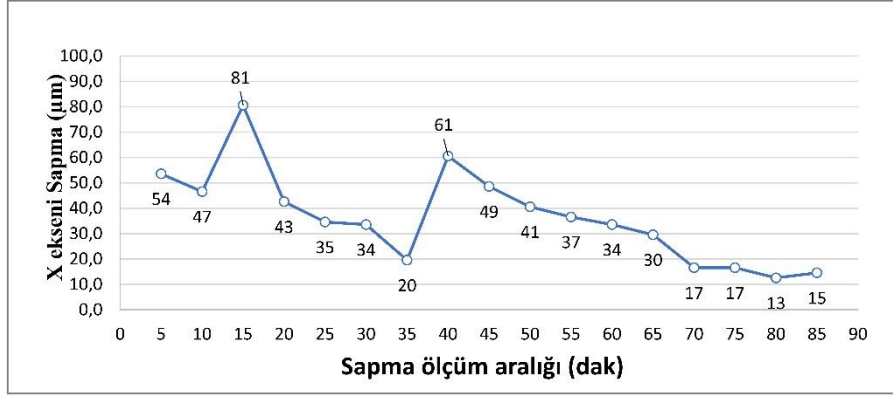
Şekil 8. Prob çapı bulunması için probun halka mastar üzerinde hareketi

Tezgâh ile entegre çalışan bu ölçüm probu halka mastara X ve Y yönünde ikişer kez olmak kaydıyla temas ederek otomatik olarak ölçüm sonuçlarını tezgâhın işletim sistemine aktarır ve prob çapını tespit eder. Tezgâh üzerinde ölçüleri bilinen mastar ile ölçüm probunun çapının tayini gösterilmektedir. Prob çapının tayini sonrasında bilinen sertifikalı halka mastar çapı tezgâha girilmiştir. Sonrasında bir başka ölçü değerleri bilinen kalibrasyonu yapılmış halka mastar ölçülerek problama kabiliyeti ölçülmüştür.

III. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

A. SAPMA DEĞERLERİ DEĞİŞİMİ

Isıtma sonrası soğumaya bağlı olarak sapma değerlerinin değişim sonuçları değerlendirilmiştir. Elde edilen hata miktarına göre NC kodlarında düzenleme yapılmıştır. Talaş kaldırma işlemi öncesi yapılacak bir düzeltme (hataların kompanze edilmesi) ısınma ve bekleme süresine göre değişecektir. Bunu incelemek amacı ile tezgâh deneylere başlamadan önce çalıştırılarak ısıtılmıştır. En belirgin sapma sonucunu verecek olan 500 mm boyundaki mastar blok ölçülmüş ve incelenmiştir. Isıtma/ölçüm alma, bekleme/ölçüm alma şeklinde yapılan çalışma sonucunda 500 mm mesafe için elde edilen sapma değerleri ve göreceli olarak boya bağlı kullanılması mümkün olan kompanzasyon değerlerinin grafiği Şekil 9’ da verilmiştir.



(a)



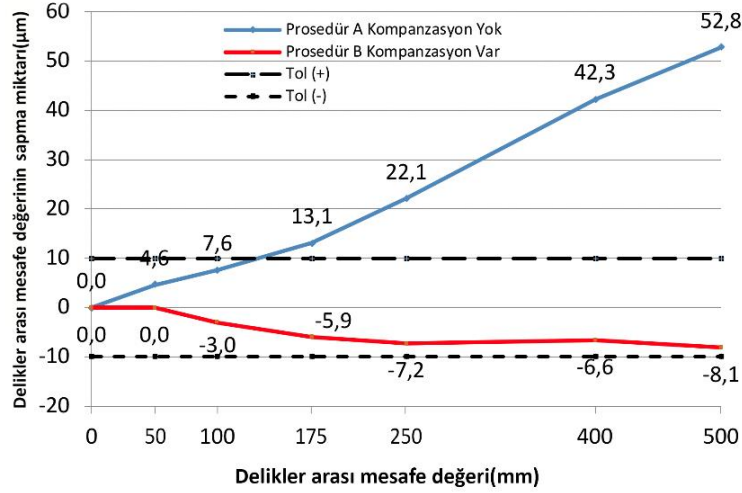
(b)

Şekil 9. CNC işleme merkezinde meydana gelen hataların belirlenmesi ve kompanzasyon faktörünün belirlenmesi, (a) CNC işleme Merkezinin ısınmasına bağlı olarak X ekseninde meydana gelen sapma ve (b) Kompanzasyon faktörü değerleri

Şekil 9-a ya göre tezgâh ısıtıldıktan sonra masterlar yardımıyla ölçülen sapma değerleri yer almaktadır. Master sapma ölçümleri master boyunca 5 dakika arayla 17 defa prob vasıtası ile alınmıştır. Tezgâh ısıtıldıktan sonra prob ile 500 mm boyundaki master yardımıyla ölçülmüştür. Bu grafikte (Şekil 9-a) edilen hata değerlerinin herhangi bir şekilde kompanse edilmeden tezgâhta imalata başlandığında oluşacak pozisyon sapmalarını göstermektedir. 1. noktada probun vidalı millerden aldığı termal uzama hatası ile yaklaşık $-50 \mu\text{m}$ sapma yaptığı görülmüştür. Hemen sonrasında ölçüm tekrarlanmıştır ve geçen zaman süresince tezgâh soğuma yaptığından dolayı hata değeri iyileşme göstererek 2. noktada yaklaşık $-45 \mu\text{m}$ sapma olarak tespit edilmiştir. Sonrasında tezgâh tekrar ısıtılarak ölçüm alınmış ve sapma 3. noktada hata oranı artarak yaklaşık $-80 \mu\text{m}$ olarak saptanmıştır. 4, 5, 6 ve 7. noktalardaki ölçümde tezgâh ısıtılmadan master ölçümü gerçekleştirilmiş olup her bir ölçümde hata değerlerinin soğumaya bağlı olarak iyileştiği görülmüştür. Sonrasında 8. ölçüm noktası tezgâh ısıtılarak alınmıştır. Alınan 8 ölçümde görülmüştür ki, tezgâh ısıtıldıkça zamana bağlı olarak değişen pozisyon hatası $-80 \mu\text{m}$ ' ye kadar çıkmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda tezgâhın uzun süreli çalışması sonucunda hataların arttığı görülmüştür. Bunun temel sebebi tezgâh çalışmadan bekledikçe vidalı milde olan sıcaklığın düşmesidir. Beklemeden sonra ölçümlerde hataların azaldığı anlaşılmaktadır. Yapılan hata ölçümleri sonucunda sapma miktarlarına göre yeniden düzenlenen eksenler arası mesafeler kullanılarak kompanzasyon faktörü elde edilmiştir. Ölçümler sonucunda elde edilen Kompanzasyon faktörü Şekil 9-b'de verilmiştir. Bu faktör kullanılarak tezgâh NC kodlarında düzenleme yapılmıştır.

B. DENEYSEL ÖLÇÜM SONUÇLARI

Delik pozisyonlarının kompanzasyonlu ve kompanzasyonsuz olarak mesafeye bağlı sapmaları Şekil 10'de verilmiştir.



Şekil 10. Delik pozisyonlarının kompanzasyonlu ve kompanzasyonsuz olarak mesafeye bağlı sapmaları

Delik pozisyonlarının kompanzasyonlu ve kompanzasyonsuz olarak mesafeye bağlı sapmaları Şekil 10'da incelenmiştir. Grafikte Prosedür A kompanzasyon yok (Mavi), delinen deliklerin, CMM cihazı ile kontrolü sonrası istenilen delikler arası mesafenin dışına çıkmış sapmalardır. Prosedür B Kompanzasyon var (Kırmızı) ise faktör değeri ile kompanze edilip delinmiş delikler arası mesafenin sapma değerleridir. CMM cihazı ile delik ölçümü yapılan iş parçasının kompanzasyonsuz delinen deliklerin pozisyonu ve kompanzasyonlu delinen deliklerin pozisyonu karşılaştırıldığında, kompanzasyon yöntemi ile pozisyon hatalarının 10 µm tolerans değerleri içerisinde olduğu grafikte gösterilmiştir. Ayrıca tezgâh pozisyon hatasının mesafeye bağlı olarak lineer bir şekilde arttığı da gözlemlenmiştir. Bu çalışmamızda pratik ve anlık olarak 500 mm'lik kalibreli bir mastar ile ölçüm probunun doğruluğu ve imalat esnasında tek eksenle delinen deliklerin pozisyonlarının 10 µm'nin altında delindiği sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan çalışmalarda da tezgâhın çalışmasına bağlı olarak artan ısı miktarı sonucu meydana gelen hata miktarları da artmaktadır [10] [11]. Eskandari ve arkadaşları [18] Emco VMC600 dik işlem freze tezgâhının X eksen ve Y eksenin sıcaklığa bağlı hatalarını 50 ölçüm ile incelemişlerdir. Tezgâh çalışmasına bağlı olarak termal hataların 120 dakika sonrasında 55 µm olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda hataların ortalama % 41'inde iyileşme olduğunu bildirmişlerdir. Farklı bir çalışmada ise Liang ve arkadaşları [19] CNC işleme merkezinin işleme hassasiyetini iyileştirmek için işleme sırasında oluşan ısılarından kaynaklanan makine elemanlarının deformasyonlarının doğru bir şekilde tahmin etmek için veri tabanlı modeller yapmışlardır. Modellerlerini sonucunda işleme doğrulukları % 46,53 arttığını tespit ettiler.

V. SONUÇ

CK45 çeliğinden hassas parça üretimi için CNC işleme merkezinde delinmesinde oluşabilecek hatalar ve hataları önleme yöntemleri üzerine yapmış olduğumuz çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Geliştirilen kompanzasyon yöntemi tezgâh hatlarının azaltılmasında başarılı olmuştur.
- Bu işlemlerin yapılabilmesi için CNC işleme merkezi detaylı bir şekilde incelenmiş ve hataları analiz edilmiştir. Bu amaçla lazer interferometre mesafe optikleri ile pozisyon hataları, lazer açı optikleri ile açısal rotasyon hataları tespit edilmiş, normal kullanım şartları için tezgâh performansı bulunmuştur.
- Tezgâh ekseninin fazla çalışması sırasında (15 dakika aynı eksenin çalışması) termal uzama kaynaklı hataların her bir metre mesafe için 110 µm değerine çıktığı (110 µm/m), beklendiği zaman termal uzamanın azalması sonucu hatanın azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Bu hataların geliştirilen yöntem ile 10 µm altında bir belirsizlikle tespit edilebildiği ve hataların düzeltilmesi için düzeltme faktörünün çıkarılabildiği anlaşılmıştır.

- Tespit edilen düzeltme faktörü ile CAD dosyalarındaki ölçülerin düzeltilebildiği belirlenmiştir.
- Düzeltme yapmadan delinen deliklerdeki hatanın 500 mm mesafe için (15 dakika eksenin çalışması sonucu) 55 µm ye kadar çıktığı, düzeltme yapıldığında ± 10 µm tolerans içi aralığa çekildiği tespit edilmiştir. Deneylein sonuncunda sapma değlerleri % 81 oranında iyileştirilmiştir.
- İleride ısınmadan kaynaklanan tezgâh hatalarının belirlenmesi için tüm eksenlerdeki sapmalar dikkate alınabilir.

TEŞEKKÜR: Çalışmamızın yapılmasına sunduğu katkılardan dolayı TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsüne (TÜBİTAK-UME) teşekkür ederiz.

V. KAYNAKLAR

- [1] P. Katageri, B. S. Suresh, and A. Pasha Taj, "An approach to identify and select optimal temperature-sensitive measuring points for thermal error compensation modeling in CNC machines: A case study using cantilever beam," *Materials Today: Proceedings*, pp. 1-10, 2020.
- [2] R. Ramesh, M. A. Mannan, and A. N. Poo, "Error compensation in machine tools - a review part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors," *Int J Mach Tool Manu*, vol. 40, no. 9, pp. 1235-1256, 2000.
- [3] A. C. Okafor and Y. M. Ertekin, "Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics," *Int J Mach Tool Manu*, vol. 40, no. 8, pp. 1199-1213, 2000.
- [4] D. Kono, A. Matsubara, I. Yamaji, and T. Fujita, "High-precision machining by measurement and compensation of motion error," *Int J Mach Tool Manu*, vol. 48, no. 10, pp. 1103-1110, 2008.
- [5] C. Ma, L. Zhao, X. S. Mei, H. Shi, and J. Yang, "Thermal error compensation of high-speed spindle system based on a modified BP neural network," *Int J Adv Manuf Tech*, vol. 89, no. 9-12, pp. 3071-3085, 2017.
- [6] K. F. Emann, B. T. Wu, and M. F. Devries, "A generalized geometric error model for multi-axis machines," *CIRP Annals*, vol. 36, no. 1, pp. 253-256, 1987.
- [7] Jin-Hyeon Lee, Jae-Ha Lee, and S.-H. Yang, "Thermal error modeling of a horizontal machining center using fuzzy logic strategy," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 3, no. 2, pp. 120-127, 2001.
- [8] P. Blaser, F. Pavlicek, K. Mori, J. Mayr, S. Weikert, and K. Wegener, "Adaptive learning control for thermal error compensation of 5-axis machine tools," *J Manuf Syst*, vol. 44, pp. 302-309, 2017.
- [9] J. Mayr, M. Egeter, S. Weikert, and K. Wegener, "Thermal error compensation of rotary axes and main spindles using cooling power as input parameter," *J Manuf Syst*, vol. 37, pp. 542-549, 2015.
- [10] T. N. Reddy, V. Shanmugaraj, P. Vinod, and S. G. Krishna, "Real-time thermal error compensation strategy for precision machine tools," *Mater Today-Proc*, vol. 22, pp. 2386-2396, 2020.
- [11] Z. Huang, Y. C. Liu, L. Du, and H. Yang, "Thermal error analysis, modeling and compensation of five-axis machine tools," *J Mech Sci Technol*, vol. 34, no. 10, pp. 4295-4305, 2020.
- [12] Martin Mareš, Otakar Horejš, and Lukáš Havlík, "Thermal error compensation of a 5-axis machine tool using indigenous temperature sensors and CNC integrated Python code validated with a machined test piece," *Precision Engineering*, vol. 66, pp. 21-30, 2020.

- [13] H. T. Yue, C. G. Guo, Q. Li, L. J. Zhao, and G. B. Hao, "Thermal error modeling of CNC milling machining spindle based on an adaptive chaos particle swarm optimization algorithm," *J Braz Soc Mech Sci*, vol. 42, no. 8, 2020.
- [14] C. Danjoua, J. L. Duigoua, and B. Eynarda, "Closed-loop manufacturing, a STEP-NC process for data feedback: a case study " in *48th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Italy, 2016, pp. 852-857.
- [15] T. Yandayan, R. Karadayı, ve İ. Teke, "İmalat işleminde ölçüm ve ölçüm verilerinin imalat için kullanımı," *8.Ulusal Ölçümbilim Kongresi*, Kocaeli, 2013, pp. 1-10.
- [16] G. L. P. Nijse, "Linear motion systems; a modular approach for improved straightness performance," Ph.D. dissertation, Department of Machine Engineering, Delft University of Technology, Netherlands, 2001.
- [17] A. Slocum, "Kinematic couplings: A review of design principles and applications," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, no. 4, pp. 310-327, 2010.
- [18] Sina Eskandari, Behrooz Arezoo, and A. Abdullah, "Positional, geometrical, and thermal errors compensation by tool path modification using three methods of regression, neural networks, and fuzzy logic," *Int J Adv Manuf Tech*, vol. 65, no. 9-12, pp. 1635-1649, 2012.
- [19] Y.C. Liang, W.D. Li, P. Lou, and J. M. Hu, "Thermal error prediction for heavy-duty CNC machines enabled by long short-term memory networks and fog-cloud architecture," *J Manuf Syst*, pp. 1-8 2020.