

# SANAL ORTAMDA TALAŞLI İMALAT

Yusuf Altıntaş<sup>1</sup>

## 1. GİRİŞ

Sanal ortamda makina tasarımı ve talaşlı imalatın başlangıcı, 1970'lerin başında, CAD (Computer Aided Design) ve CAM (Computer Aided Manufacturing), yani bilgisayarda grafikte tasarım ve takım yollarının (NC programların) çıkartılması teknolojisi ile başlamıştır. Bilgisayar teknolojisinin hızlıca gelişmesi, kapsamlı teorilerin ve hesapların paket programlarla mühendislerin kullanımına açılması, günümüzde dördüncü endüstri devriminin kapısını açmıştır. Artık, bir makina; tasarım, analiz, imalat ve pazarlamasından kullanımına kadar sayısal ortamda takip edilebilmektedir.

Bu yazı kırkbeş yıldır takım tezgahları tasarımı ve talaşlı imalat teknolojisinde yaptığımız çalışmalardan örnekler içermektedir. Yazıda anlatılan mühendislik ilkeleri 2000 ve 2012 yıllarında "Manufacturing Automation" adlı kitapta toplanıp 2018'de Türkçe'ye çevrilmiştir [1]. Laboratuvar, üniversitenin başlangıçta (1987) verdiği \$8.000 ile kurulmaya başlamış olup, şu anda 6 milyon dolarlık donatıma

sahiptir. Asistanların maaşları dahil, laboratuvarın tüm aletleri ve masrafları TÜBİTAK'ın Kanada'da karşılığı olan NSERC ve uluslararası şirketlerden alınan projelerden karşılanmaktadır. Üniversite ayrıca, şirketlerden gelen araştırma fonlarından %40 vergiyi, kaynağında kesmektedir.

## 2. TALAŞLI İMALAT MEKANİĞİ VE DİNAMİĞİ

Takımlar, sanki ince disklerin birleştirilmesiyle tasarlanmış varsayımıyla, her ince diskin üç boyutlu kesme mekaniği modellenir. Şekil 1.a'da talaşın bir kesici element tarafından, malzemeden plastik deformasyonla kesilmesi mekaniği göstermektedir.

Kesme teorileri ile kesme kuvvetleri, takım ağız açısı, talaş açısı, malzemenin kayma gerilmesi ve sürtünme katsayıları kullanılarak hesaplanır. Bu kuvvetler önce takım koordinatlarında toplanır ve operasyonun (örneğin torna, delik delme ve genişletme, frezeleme, dişli azdırma, vb.) kinematiğine göre tezgah koordinatlarına aktarılıp tezgaha, takıma ve parçaya gelen yükler hesaplanır. Ki-

<sup>1</sup> Ph.D., Hon. Dr. Ing (Stuttgart), Dr.Cau.(Budapest), Professor, Fellow of RSC, EC, CAE, SME, ASME, CIRP, ISNM, P&WC, Tokyo Univ., NSERC P&WC – Sandvik Coromant Industrial Research Chair Professor, Distinguished University Scholar

The University of British Columbia Department of Mechanical Engineering Manufacturing Automation Laboratory, Canada - [altintas@mech.ubc.ca](mailto:altintas@mech.ubc.ca)

sacası, oldukça kapsamlı olan aşağıdaki tek denklemlerle, operasyon parametreleri transformasyon matrislerine [1] girilerek herhangi bir talaşlı imalat mekaniği sanal ortamda hesaplanabilir.

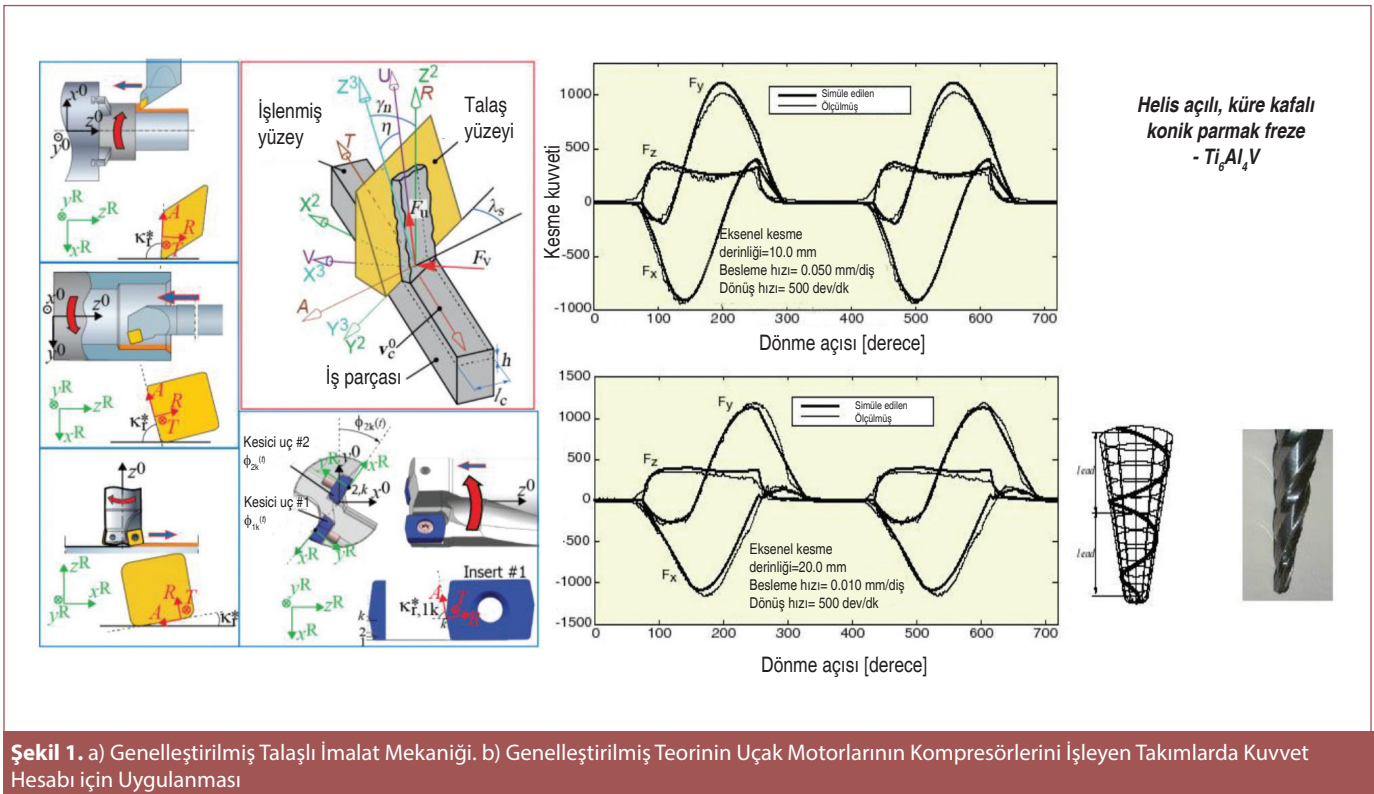
$$\mathbf{F}^c = \begin{Bmatrix} F_x^c \\ F_y^c \\ F_z^c \\ T^c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{0R} \cdot \mathbf{T}_{RI} \\ 0 & R_t & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{F}_{rta}^c = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{0R} \cdot \mathbf{T}_{RI} \\ 0 & R_t & 0 \end{bmatrix} [\mathbf{T}_{IU}] \cdot \mathbf{F}_{uv}^c \quad (1)$$

Örneğin, değişken ağız aralıklı ve helis açılı, küre kafalı konik bir parmak frezinin Titanyum alaşımı işlerken çıkardığı kesme kuvvetlerinin simülasyonu ve makinada ölçüm değerleri, Şekil 1.b'de karşılaştırılmıştır. Bu kuvvetlerden iş mili motorunun güç ve moment gereksinimleri ve parçaya gelen kuvvetlerden toleransı etkileyen elastik çökmeler hesaplanabilir. Keza, takımdaki sıcaklık dağılımı da yine kesme kuvvetleri ve malzemenin özelliklerini kullanarak hesaplanır.

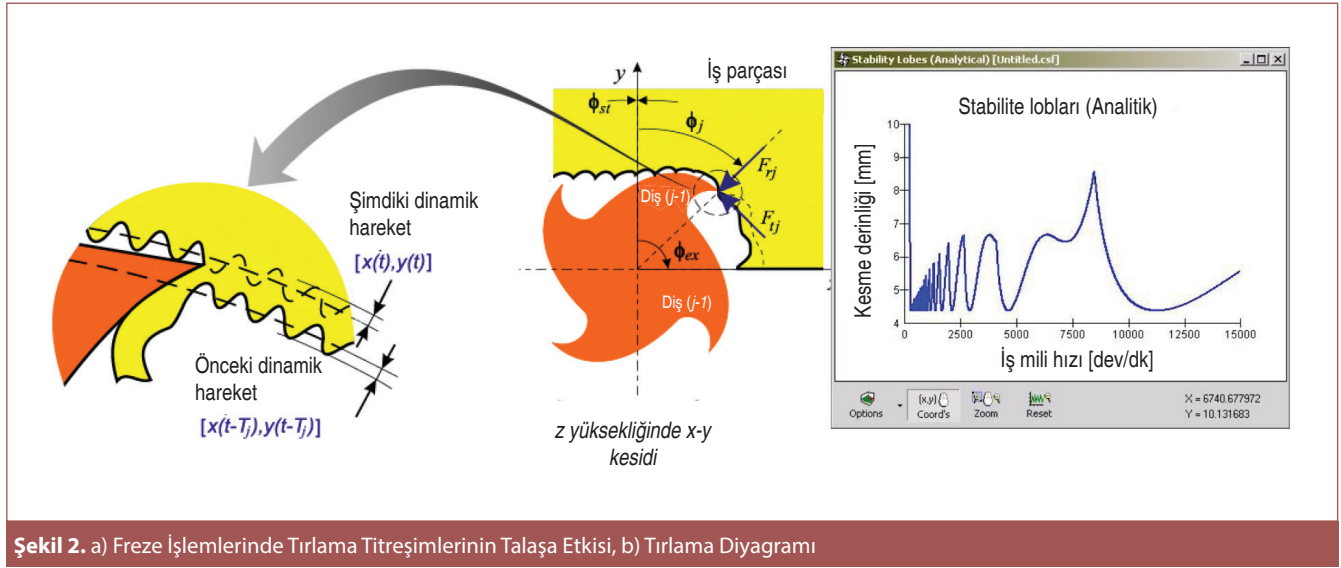
$$\begin{cases} \ddot{x}(t) + 2\zeta_x \omega_{nx} \dot{x}(t) + \omega_{nx}^2 x(t) \\ \ddot{y}(t) + 2\zeta_y \omega_{ny} \dot{y}(t) + \omega_{ny}^2 y(t) \end{cases} = \frac{1}{2} aK_t \begin{bmatrix} a_{xx}(t) & a_{xy}(t) \\ a_{yx}(t) & a_{yy}(t) \end{bmatrix} \begin{cases} x(t) - x(t-T) \\ y(t) - y(t-T) \end{cases} \quad (2)$$

Atölyelerde üretimi etkileyen büyük sorun "tırlama" titreşimleridir. Tırlamanın matematik modeli, talaşın alt ve üst yüzeyindeki titreşim dalgalarının kesme kuvvetlerine yansıtılması ile yapılır. Örneğin, frezelemede talaş, (x, y) yönlerindeki titreşimlerin talaş kalınlığına yansıtılması Şekil 2.a'da gösterilmiştir. Tırlama, mühendislikte "instability", yani titreşimlerin zamanla eksponensiyel olarak artması demektir. Tırlama, çok uçlu, dönen takımlarda, periyodik, iş mili dönme zamanı gecikmeli (T), kendinden tahrikli, yani titreşimlerin (x, y) kuvveti etkilediği, çözümüne zor olan, aşağıda örneklendirilmiş denklemlerle modellenir.

Stabilite denklemleri ile takımın, malzeme ve tezgâhın esnekliğinin modellenip, hangi iş mili hızlarında ve kesme derinliklerinde tezgâhın tırlamadan talaş kesebileceği hesaplanır [1]. NC programları bu diyagramların kılavuzluğunda yazılır. Örneğin 3.000 devir/dakikada sadece 4,5 mm derinliğinde malzemeyi kesebiliyorsa, aynı tezgâh ve takım 8.000 devirde 6 mm derinliğinde tırlamadan kesebilmektedir. Bu da parçanın hem yüzeyi-



Şekil 1. a) Genelleştirilmiş Talaşlı İmalat Mekaniği. b) Genelleştirilmiş Teorinin Uçak Motorlarının Kompresörlerini İşleyen Takımlarda Kuvvet Hesabı için Uygulanması



Şekil 2. a) Freze İşlemlerinde Tırlama Titreşimlerinin Talaşa Etkisi, b) Tırlama Diyagramı

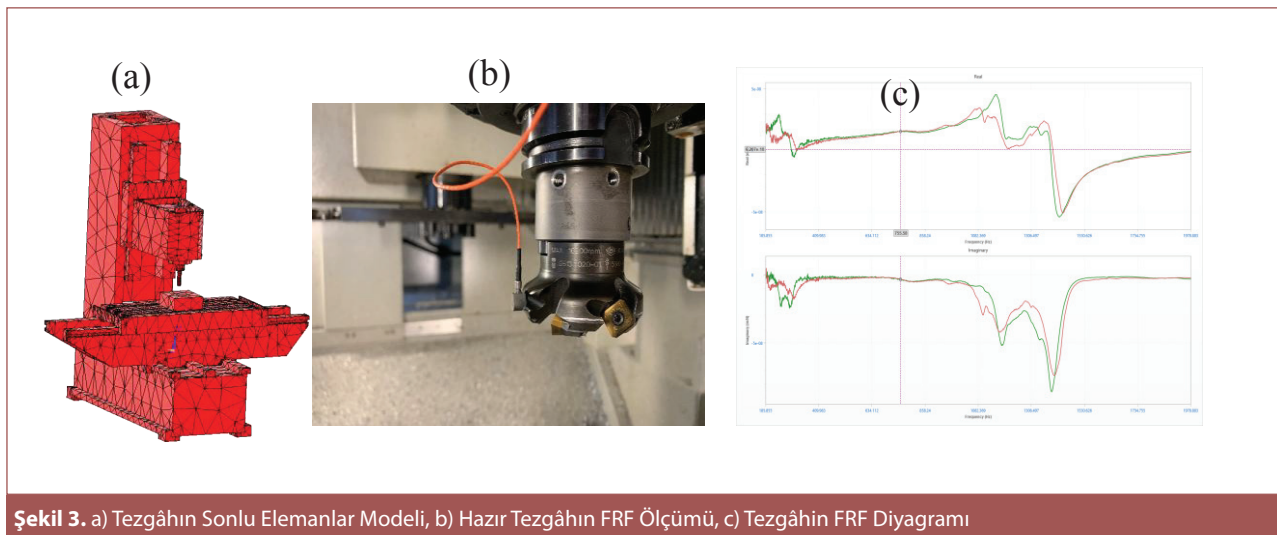
nin pürüzsüz hem de %355 daha verimli üretimini sağlar. Tırlama teorisi hem parçaların kesme planlanmasında, hem de aşağıda örneklendiği gibi tezgâh tasarımında kullanılır. Ölçme ve simülasyon algoritmaları CUTPRO adı altında paketlenip, endüstride 2000 yılından beri kullanılmaktadır [2].

### 3. SANAL ORTAMDA TEZGÂH TASARIMI VE ANALİZİ

Bir tezgâhın parça işlemedeki verimi, gerekli takım geometrisi ile hedeflenen malzemenin tırlamasız, iş mili ve ilerleme motorlarının yeterince güç ve moment verip, gereken hassasiyetle kesebilmesi ile ölçülür. Kesme kuvvetleri ile gereken ilerleme ve iş mili motorları seçilir. Tezgâhın tırlaması ise iş miline takılan takım ve parçanın bağlı olduğu masa arasındaki dinamik esnekliğe, yani "Fre-

kans Response Fonksiyonu"na (FRF), bağlıdır. FRF (Şekil 3.c) tasarım aşamasındaki tezgâhların sonlu elemanlar modelinden hesaplanır (Şekil 3.a). Tezgâh imal edilmişse, FRF kesiciye takılan titreşim sensörü ve kuvvet sensörlü çekiç darbeleri ile ölçülür (Şekil 3.b).

Ölçülen FRF'den takım ile parça arasındaki titreşim modeli, makinanın doğal frekansı, söndürme ve yay katsayıları, modal analiz yöntemleri ile hesaplanır. Kesme kuvvetleri ile birleştirilip tırlama diyagramları, statik çökmeler ve titreşimlerin boyutları hesaplanır. Şekil 3.b'deki en yüksek titreşimler, tepeciklere karşılık gelen doğal frekanslardan kaynaklanır ve tezgâhın verimini düşürür. Bu hesaplarla, mühendis bu doğal frekansların kaynağı olan aksamın tasarımını değiştirip tezgâhın verimini, daha tezgâh imal edilmeden artırır.

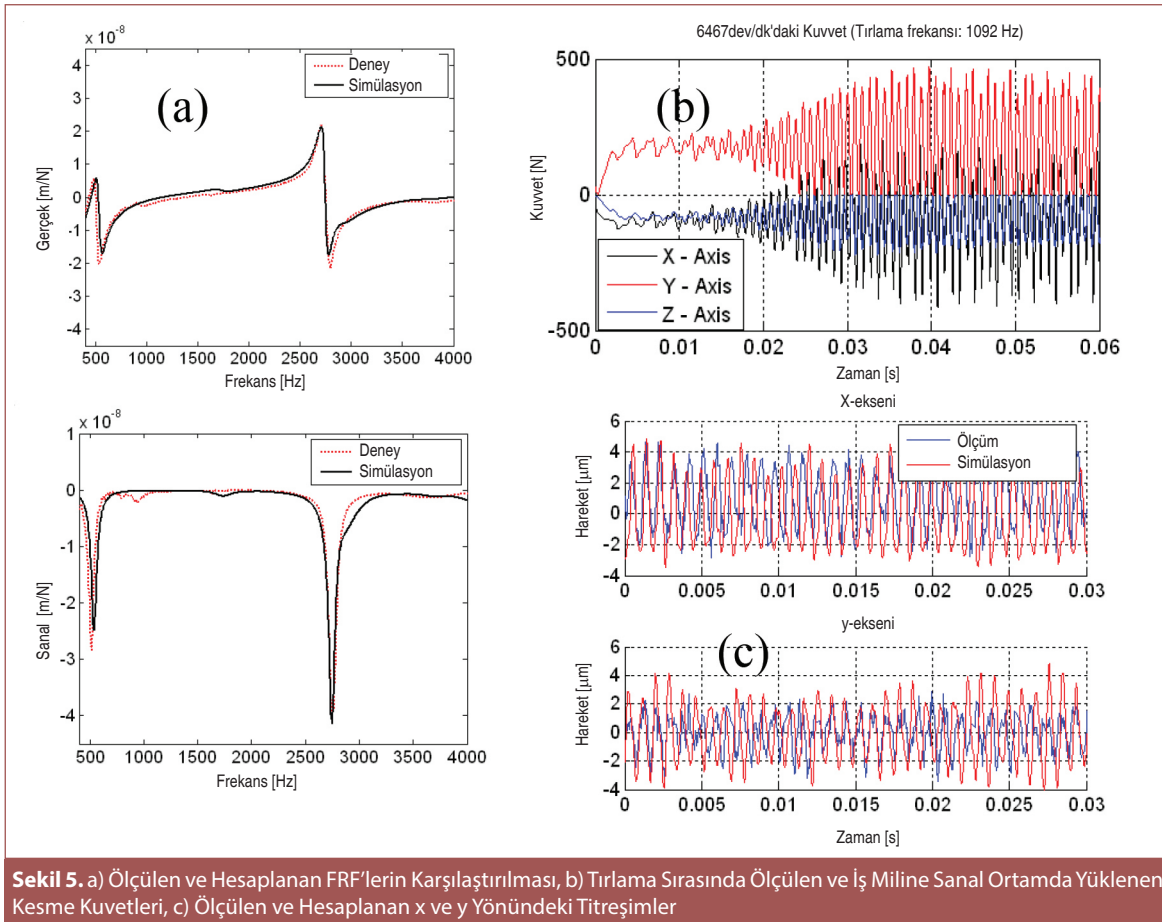
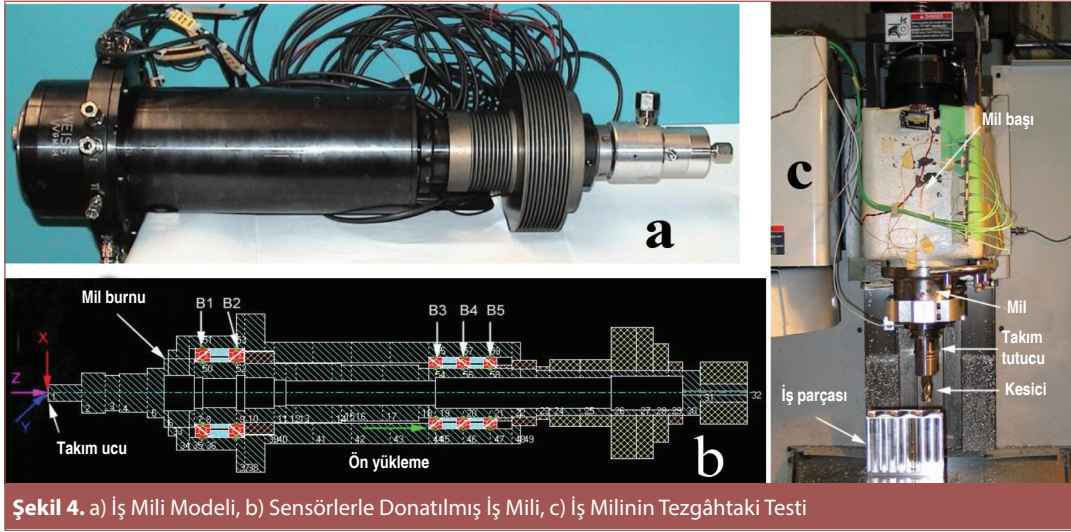


Şekil 3. a) Tezgâhın Sonlu Elemanlar Modeli, b) Hazır Tezgâhın FRF Ölçümü, c) Tezgâhın FRF Diyagramı

Burada kritik araştırma konusu ise tezgâhın standart montaj parçalarına ayrılıp, sonlu elemanlarla herbirinin modellenip, matematiksel montaj ile hesapların sanal ortamda hızlıca yapılmasıdır. Çünkü tezgâh, özellikle beş eksenli tezgâhların FRF'leri, yani dinamik esnekliği, pozisyonuna göre değiştiği için yüzlerce konumun hızlı hesaplanması gereklidir.

Bir iş milinin sanal ortamda modellenmesi ve analizi örnek olarak Şekil 4 de verilmiştir. Proje, 2000 yılının başında Boeing ve yüksek hızlı iş mili üreten Siemens Weiss firmalarının laboratuvarımızdan yardım isteği ile yapılmıştır.

Boeing 33.000 devir/dakikada dönen, 120 Kw lık iş milinin iki ağızlı freze ile alüminyum keserken çok fazla



tırladığını ve bilyalı yatakların 34 saatte dağılmalarından dolayı tezgâhı sadece 12.000 devir/dakika civarında kullanabildiklerini açıkladı. Weiss firması Şekil 4.a daki iş milini, titreşim sensörleri ile donatıp imal etti. Doktora çalışmasında, iş mili shaftı Timoshenko kiriş teorisi bazlı sonlu elemanlar tekniği ile modellendi. Bilyalı yatakların ön yükleme ve hıza bağımlı nonlineer modeli çıkartıldı ki bu, araştırmanın en zor tarafıdır.

Bölüm 1'deki hesaplar kullanılarak parmak freze takılmış iş milinin gereken devirde tırlamasız çalışacağı; doğal frekans, yay katsayıları ve bilyalı yatak yerleri hesaplandı. Sanal ortamda iş milinin FRF'leri hesaplandı ve tırlama (stabilite) diyagramları, kesme kuvvetlerinin bilyalara getirdiği yükler, iş milinin titreşimleri ve çökmeleri sayısal ortamda kesme simuasyonları ile hesaplandı.

DeneySEL ve sayısal simülasyon sonuçları Şekil 5'te karşılaştırıldı. FRF'lerin üst üste çakışması demek (5a), sayısal ortamda geliştirilen matematik modelin doğruluğunun kanıtıdır. İş mili kesme testleri yapıldı, kuvvetler ölçüldü ve iş milinin sayısal modeline yük olarak konuldu (5b). İş miline yerleştirilen altı adet sensörle titreşimler ölçüldü ve sayısal hesaplarla çok yakın olduğu kanıtlandı (5c). Kısacası, iş milinin tasarımı ve sanal kesim testleri tamamen matematiksel olarak modellendi, simülasyon programlarına yerleştirildi ve iş mili tasarım mühendislerine paket olarak sunuldu.

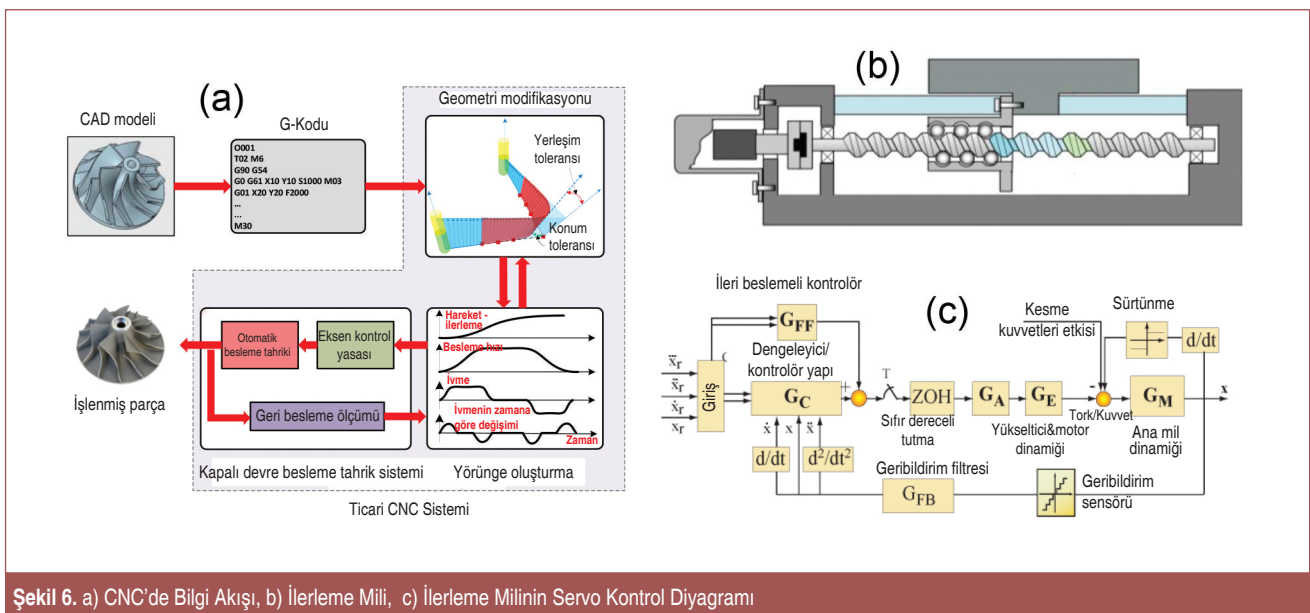
Sonuçta tasarım mühendisi, iş milinin tasarım ve testini kısa zamanda yapıp sadece tek prototip ile atölyede kes-

me testlerine geçebilmesi, deneme yanılma olmaksızın iş milinin, müşterinin uygulamasına cevap verecek şekilde imal edilmesi sağlandı [3]. Tüm tezgâh tasarımının da aynı ilkelerle yapılması üzerine araştırmalarımız devam etmektedir.

#### 4. SANAL ORTAMDA CNC TASARIMI

CNC ünitesinin, tezgâhın kavisli takım yollarını hassas takip edebilmesi için iyi seçilmesi ve "ayarlanması" gereklidir. NC program CNC ye yüklenir. CNC linear (G01) veya dairesel (G02, G03) komutlarını, "trajectory generation" denilen algoritma ile, her servo kontrol zaman aralığında üç boyutta ilerleme miktarını hesaplar. İlerleme miktarının birinci türevi hız, ikinci türevi ivme, ve üçüncü türevi olan jerk (sarsıntı) ne kadar sürekli olursa, makina o kadar düzgün şekilde, salınımsız çalışır. Dolayısıyla, ilerleme beşinci dereceden polinom olarak modellenir, ki üçüncü türevi olan jerkin ikinci dereceden sürekliliği olabilsin. Sürekliliği olmayan servo komutlarının içinde çok frekans olur ve bu frekanslardan biri ivmelenme sırasında tezgâhın doğal frekanslarını tahrik edip, kesmeden bile titreşimlere neden olur.

Servo kontrol matematiği CNC nin veya sayısal (dijital) motorların bilgisayarlarında, hasasiyete göre 0,1ms ile 1ms arasında çözülüp ( $G_c(s)$ ,  $G_{ff}(s)$ ), hız komutları sürücü amplifikatörlere gönderilir. Servo kontrol ünitesinde, enkoderin hissettiği titreşimlerin geri beslemede servoyu tahrik etmemesi için filtreler konulur. Titreşime neden



Şekil 6. a) CNC'de Bilgi Akışı, b) İlerleme Mili, c) İlerleme Milinin Servo Kontrol Diyagramı

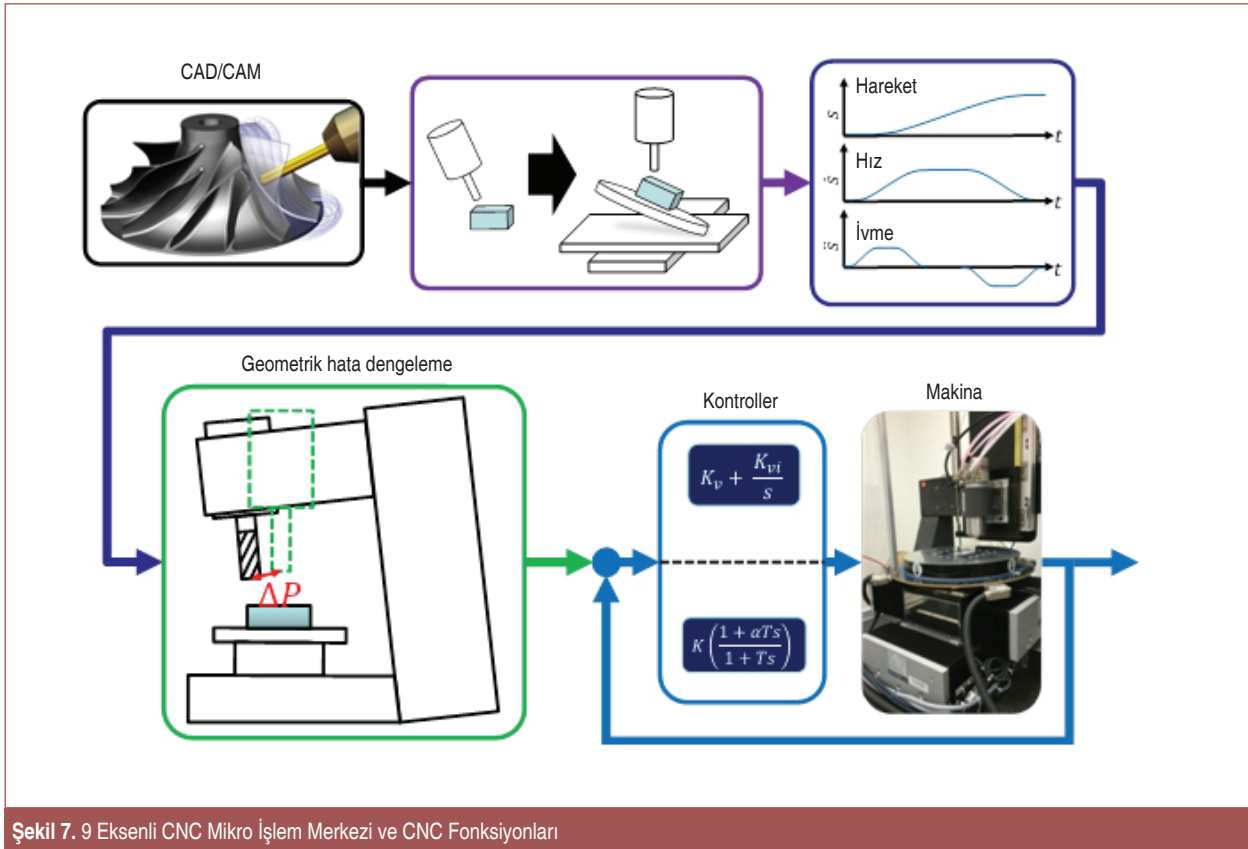
olan doğal frekanslar ne kadar yüksek olursa, servo da kavisli ve dairesel profilleri o kadar yüksek ilerlemelerde hassas olarak takip edebilir. Tezgâh sürücüsünün tahrik olmadan komut takip etme frekans aralığına "bandwidth" denir ve tezgâhın hassasiyet kalitesinin ölçüsüdür.

Laboratuvarımızda ilk CNC'yi parasızlıktan 1988 yılında yapmışım. Hem de hiç otomatik kontrol dersi almadan. Makinayı CNC'ye çevirmeden araştırma yapamayacağım için oturup kendim öğrenmek zorunda kaldım ve CNC araştırması bu şekilde başlamış oldu. Ticari CNC'ler kapalı kutu oldukları için, kendi geliştirdiğimiz kontrol ve "trajectory" (yörünge) algoritmalarını denememiz olanaksızdı. Her uzmanlık asistanının da yeniden CNC yapmasının araştırmaya yenilik getirmeyeceği gibi, boşuna harcanan zaman olması nedeniyle, açık mimarili, kolayca herhangi bir tezgâha ayarlanabilen CNC kütüphanesi oluşturduk. Bilgisayar kökenli asistanlarımız da program mimarisini ve bilgisayarın gerçek zamanda işletimini garantileyen sistemler geliştirdiler.

Şu anda 9 eksene kadar denediğimiz, herhangi bir tezgâhı araştırma açısından kontrol edebilen ve hızlıca tasarlayabilen bir CNC sistemimiz var. Bu konudaki yayınlarımız ise dünyada en fazla atıf almakta. Şekil 7'de, kendimizin

tasarladığı 9 eksenli, 200.000 devir/dakikalık iş mili olan CNC mikro işlem makinası ve CNC fonksiyonları görülmektedir. Makinanın termal genleşmeyi minimize eden granit gövdesi, üç eksenli lineer servo motorlu ve lineer cetveli ilerleme sistemi vardır. Masanın üstüne manyetik alanla havaya kalkıp hızlı şekilde dönebilen fakat her ekseninde 200 mikron ilerleme yapıp her eksen etrafında dönebilen, sürtünmesiz 6 serbestliği olan döner masa vardır. Döner masa, bir master öğrencisi, tüm CNC ise bir doktora asistanı tarafından yapılmıştır. Tezgâhın sadece 5 eksenli gerektiğinden, 4 fazla eksenli "redundant" kinematikdir. Tezgâhın lineer eksenleri uzun mesafeli (250 mm), manyetik masa da kısa mesafeli (200 µm) olduğundan kinematik modeli ve aynı yönde çift eksenli hareket servo kontrol algoritmaları komplektir.

Ayrıca üç boyutlu koordinat sisteminde 9 ilerleme sürücülerine 1 ms aralıklarıyla pozisyon üretilmesi ("trajectory generation") gereklidir. Tezgahtaki montaj hatalarının lazer ile ölçülüp, matematik modelinin çıkartılıp, CNCde kompanse edilmesi gerekmektedir. Açık kütüphaneli CNC sistemimiz, bu araştırmada geliştirdiğimiz ek fonksiyonlarla makinayı 1 µm'nin altındaki hassasiyetle kontrol edip, mikro kalıpları işlemekte denenmiştir [4].

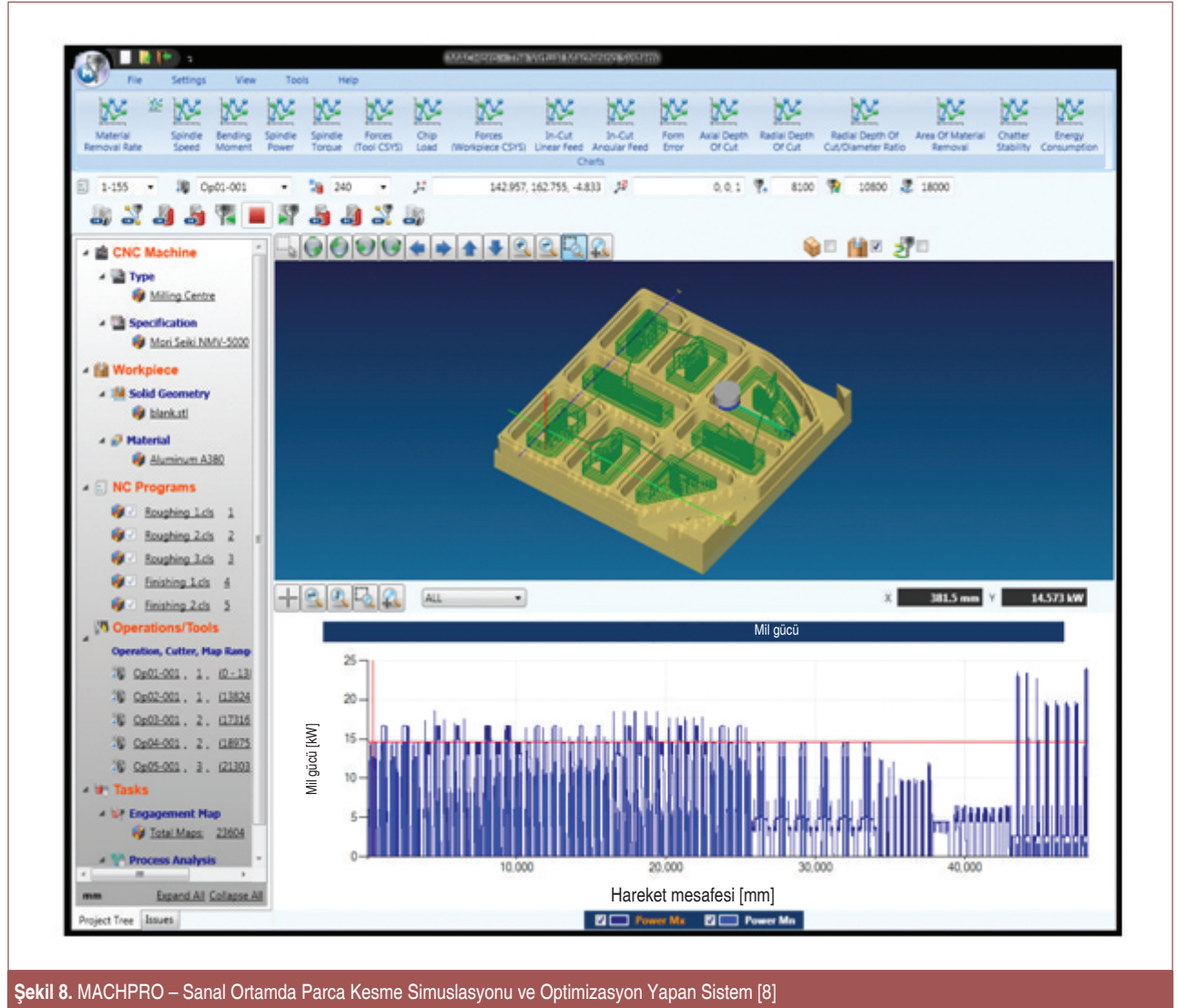


## 5) SANAL ORTAMDA CNC MAKINASININ TALAŞLI İMALATI

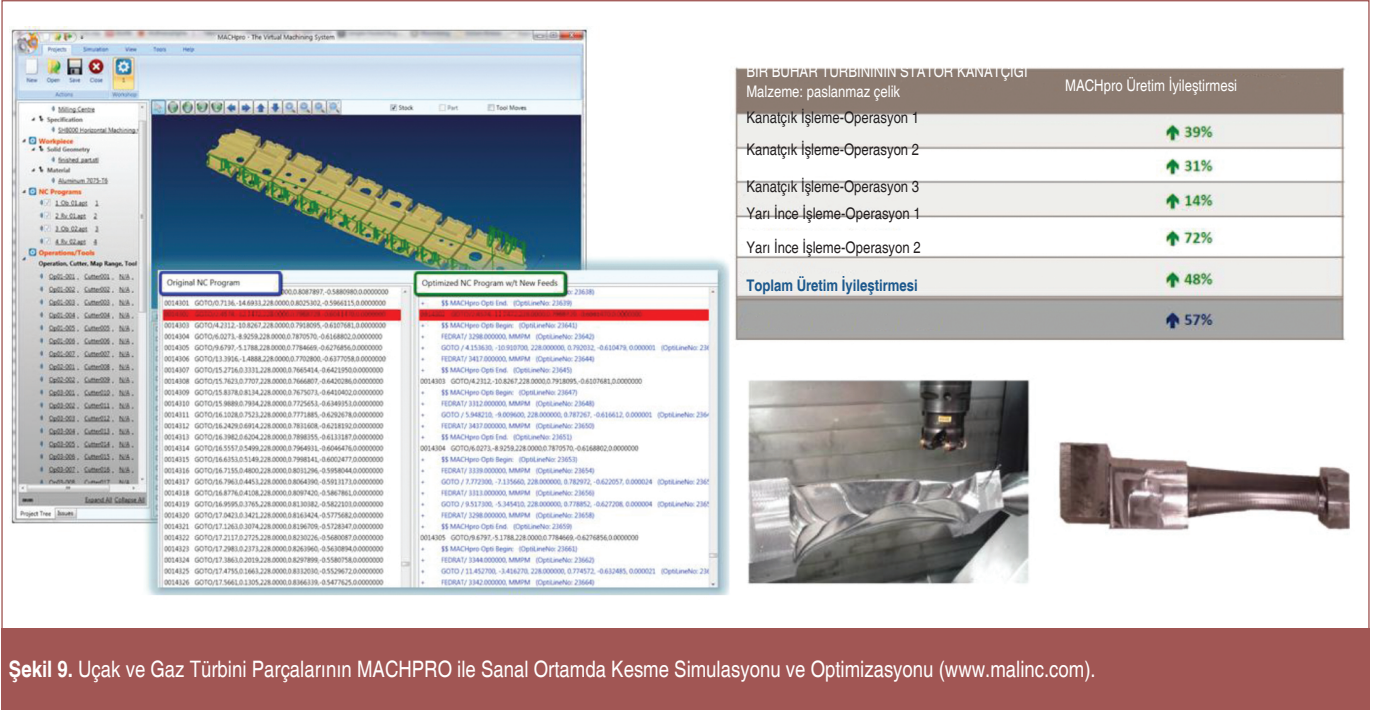
Bir parçanın, sanki makina üstünde kesilip, kuvvetlerin, gücün, titreşimlerin, CNC ve kuvvetlerden gelen çökme hatalarının ölçülmesinin yerine geçecek sayısal ikizinin yaratılması, yukardaki modellemelerin hassas şekilde yapılmasına bağlıdır. Parça kesme sırasında, çıkan kuvvetlerin hesaplanması ve sebep oldukları elastik çökme hatalarının, titreşim frekans ve boyutlarının, tırlamanın, ilerleme servo sürücü sistemlerinin entegre edilip takım yolu boyunca, parçanın geometrisi değiştiği simüle edilmesi gereklidir. Yaptığımız araştırmaları toparlayıp, bilgisayar programcısı mühendislerle, "Sanal Ortamda Parça kesme" simülasyon teknolojisini geliştirdik ve bunu üniversitenin desteğiyle kurduğumuz şirket aracılığı ile

2011 yılında dünya piyasasına MACHPRO markası olarak sürdürdük ([www.malinc.com](http://www.malinc.com)). MACHPRO, CAM sisteminden aldığı NC programları analiz edip, takım yolu boyunca kesme kuvvetlerini, güç ve momentleri, çökme hatalarını, tırlama olasılıklarını, talaş kalınlıklarını, iş miline gelen yükleri hesaplayıp, ilerleme hızlarını tezgâha ve toleranslara uyumlu hale otomatik olarak getirmektedir (Şekil 8).

Araştırmayı destekleyen Sandvik Coromant takım şirketi, atölyelerinde ilk testleri yapıp %30 ile %70 arasında parça işleme zamanlarını düşürdüklerini rapor ettiler (Şekil 9). Algoritmalar, Siemens NX ve CATIA 3DS sistemlerine de entegre edilmiş olup, NC programcıları daha parça işlemeyen tezgâhta çıkacak problemleri CAM ekranında görüp önlem alabildikleri gibi, parçalar da daha az hata olasılığı ile en hızlı şekilde üretilmektedir [5-6].



Şekil 8. MACHPRO – Sanal Ortamda Parça Kesme Simulasyonu ve Optimizasyon Yapan Sistem [8]



Şekil 9. Uçak ve Gaz Türbini Parçalarının MACHPRO ile Sanal Ortamda Kesme Simülasyonu ve Optimizasyonu (www.malinc.com).

## 6. SONUÇ

Makina tasarım ve üretim mühendisliği, endüstride genellikle, deneyim ve deneme-yanılma yöntemleri ile götürülmektedir. Bunun sonucu ise uzun ve masraflı makina tasarım süreçleri ya çok fazla iskarta ürün çıkması, ya da işleme zamanlarının uzun olması sonucunu doğurmaktadır. Bilimsel yöntemlerin, bilgisayar programlarında paketlenip, tasarım ve üretim mühendislerince kolayca kullanılmasını sağlayan, el emeği yerine bilginin yoğun olduğu "sayısal (dijital)" teknolojiler yaratmakla mümkündür.

Üniversitelerin bilimsel üretimi ise, teknolojinin yaratılması ve teknolojiyi endüstriye uygulayabilecek nitelikte, bilgili mühendislerin yetiştirilmesi ile mümkündür. Teknolojinin ilerlemesi için üniversitelerin bilimsel yeterliliğe bağlı, araştırmalarının kaynaklarını yaratıp bağımsızca

kullanan, eğitim ve araştırmayı üstün tutan bir kültürle yapılması gereklidir.

## KAYNAKÇA

1. **Allıntaş, Y.** 2018. "Üretim Otomasyonu: Metal Kesme Mekaniği, Takım Tezgahları Titreşimleri ve Bilgisayarlı Sayısal Denetim Tasarımı". Koç yayınları, ISBN: 9786059389877., Çevirenler: İsmail Lazoğlu ve Erhan Budak.
2. CUTPRO – Advanced Machining Simulation and Testing Software (www.malinc.com).
3. SPINDLEPRO – Advanced Spindle design and analysis software (www.malinc.com).
4. Virtual CNC – MATLAB Toolbox for CNC Design and Machine Tool Control (www.malinc.com).
5. MACHPRO – Virtual Machining and Optimization System (www.malinc.com).
6. NPRO – NX Siemens Integrated Virtual Machining and Optimization System (www.malinc.com).