

**UNSUR BAZLI FREZELEME OPERASYONLARINDA ENERJİ TÜKETİMİ  
KARAKTERİZASYONU VE TÜKETİMİ AZALTMA STRATEJİLERİ**

**RESUL SERCAN ALTINTAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2014**

**ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

---

Prof. Dr. Osman EROĞUL

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

---

Doç. Dr. Murat Kadri Aktaş

Anabilim Dalı Başkanı

Resul Sercan ALTINTAŞ tarafından hazırlanan UNSUR BAZLI FREZELEME OPERASYONLARINDA ENERJİ TÜKETİMİ KARAKTERİZASYONU VE TÜKETİMİ AZALTMA STRATEJİLERİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Yrd. Doç. Dr. Hakkı Özgür ÜNVER

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Nuri DURLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hakkı Özgür ÜNVER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yiğit KARPAT

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

**Resul Sercan ALTINTAŞ**

**Üniversitesi** : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
**Enstitüsü** : Fen Bilimleri  
**Anabilim Dalı** : Makine Mühendisliği  
**Tez Danışmanı** : Yrd. Doç. Dr. Hakkı Özgür ÜNVER  
**Tez Türü ve Tarihi** : Yüksek Lisans – Temmuz 2014

**Resul Sercan ALTINTAŞ**

## **UNSUR BAZLI FREZELEME OPERASYONLARINDA ENERJİ TÜKETİMİ KARAKTERİZASYONU VE TÜKETİMİ AZALTMA STRATEJİLERİ**

### **ÖZET**

İnsan nüfusunun ve endüstrileşmenin hızla artması enerji tüketiminin de sürekli artmasına yol açmaktadır. Günümüzde elektrik üretiminin büyük bir kısmı fosil kaynaklar yakılarak elde edilmektedir. Gerek bu durumun yarattığı çevresel etkiler gerekse artan kaynak bulunurluğu problemlerinden dolayı enerji talebini azaltma ve enerjiyi daha verimli kullanma gereksinimleri doğmuştur. Sanayi sektörü en çok enerji tüketen sektör konumundadır. İmalat operasyonlarını gerçekleştirmek için harcanan enerji sanayi sektörü enerji tüketiminin önemli bir kısmını teşkil etmektedir. Talaşlı imalat operasyonları yaygın olarak kullanılan imalat operasyonlarından biridir ve bu operasyonlar takım tezgahları vasıtasıyla gerçekleştirilir. Frezeleme ve tornalama gibi talaşlı imalat operasyonlarının gerçekleştirildiği takım tezgahları işlem kabiliyetine göre çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Takım tezgahlarını daha verimli kullanmak için öncelikle tükettiği enerji ölçülmeli ve modellenmelidir. Bu tez kapsamında freze takım tezgahlarında uygulanabilir unsur (ISO 10303-STEP AP 224) bazlı bir enerji tahmin modeli sunulmuştur. Makine Mühendisliği Bölümü, İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarı'nda bulunan BSD (CNC) dik işleme merkezinin enerji tüketen birimleri saptanıp, bu birimlerin tükettiği enerjiyi modellemek üzere sabit değerler elde edilmiştir. Bu değerler ve enerji tahmin modeli kullanılarak yapılan hesaplamalar, deneysel kesim sonucu elde edilen verilerle karşılaştırılarak modelin tutarlılığı ölçülmüş ve frezelenen parça seviyesinde tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Tüketilen toplam enerjinin tezgahın hangi alt biriminden ne kadar karşılandığı tespit edilerek türetilecek enerji azaltma stratejilerine veri sağlanmıştır. Ayrıca bir unsuru frezelemek için BDÜ paket programları tarafından oluşturulan değişik takım yollarının enerji tüketimine etkisi deneysel kesimlerle incelenmiştir. Takım yolu uzunluğuna bağlı kesme süresi arttıkça toplam enerji tüketiminin de arttığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji Verimliliği, Takım Tezgahları, Enerji Karakterizasyonu, Takım Yolu

**University** : TOBB University of Economics and Technology  
**Institute** : Institute of Natural and Applied Sciences  
**Science Programme** : Mechanical Engineering  
**Supervisor** : Asst. Prof. Dr. Hakkı Özgür ÜNVER  
**Degree Awarded and Date** : M.Sc. – July 2014

**Resul Sercan ALTINTAŞ**

**ENERGY CONSUMPTION CHARACTERIZATION IN FEATURE BASED  
MILLING AND REDUCTION STRATEGIES**

**ABSTRACT**

The rapid increase in human population and industrialization has led to a constant increase in energy consumption. Today, electricity production is mostly obtained by burning fossil fuels. The need of reduction in energy demand and the need to use energy more efficiently have arisen due to environmental impacts and the increase in resource availability problems. The industry sector is the leading energy consuming sector. The energy used for manufacturing processes constitutes a significant portion of the energy consumption in industry sector. Machining operations are widely used in manufacturing operations and these operations are carried out by machine tools. These machine tools that are used in machining operations such as milling and turning have a wide application area due to their transaction capabilities. The energy consumption of machine tools should be measured and modeled for a more efficient use. Within the scope of this thesis, a feature (ISO 10303-STEP AP 224) based energy assumption model applicable for milling machine tools is presented. The energy consuming components of the CNC vertical machining center placed in Mechanical Engineering Department Advanced Manufacturing Technology Laboratory are determined and constant values are obtained for modeling the energy consumption of these components. The calculations that are carried out using these obtained values and energy prediction model are compared to the data obtained from experimental cutting, the consistency of the model is measured and consistent results are obtained for milled parts. The total energy consumption proportion of the auxiliary components of the machine tool and how much energy they provide are determined and data are collected to derive energy reduction strategies. In addition to this, the effect of different tool paths that are produced by CAM packaged software on energy consumption is investigated by experimental cuttings for milling operations of a feature. It is found that as the time which depends on tool path length increases, the total energy consumption also increases.

**Key words:** Energy Efficiency, Machine Tools, Energy Characterization, Tool Path.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans hayatım boyunca ve tez çalışmalarım kapsamında beni destekleyen, akademik ve mühendislik bilgilerini benimle paylaşan ve hayatıma yön vermemde bana yardımcı olan kıymetli hocam Yrd. Doç. Dr. Hakkı Özgür ÜNVER'e teşekkürü bir borç bilirim. Tezimi değerlendirerek fikirleriyle katkıda bulunan juri üyesi hocalarım Prof. Dr. Nuri DURLU ve Yrd. Doç. Dr. Yiğit KARPAT'a şükranlarımı sunarım. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirdiğimiz deneysel kesimlerde bana çok yardımcı olan usta teknisyen Hasan UZ'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince yanımda olan, yardımlarını ve desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen çok değerli arkadaşlarım Nehir KANDEMİR ve Duygu ERSOL'a, sıkıntılı zamanlarda beni motive eden, her zaman yanımda olduğunu hissettiren 20 yıllık kadim dostum Mehmet Şükrü YAYĞIR ve müstakbel eşi Nilay YAYĞIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Sıkıntılar karşısında yılmadan, dimdik ayakta kalıp savaşmayı bana öğreten ve hayatım boyunca yaşam mücadelesini örnek aldığım ve alacağım rahmetli anneannem Havva ÇAVDAR başta olmak üzere lisans ve yüksek lisans hayatım boyunca gerek maddi gerekse manevi olarak benden desteğini hiç esirgemeyen aile bireylerim sevgili annem Yıldız ALTINTAŞ, saygı değer babam Dağıstan ALTINTAŞ ve biricik kardeşim Hatice Simge ALTINTAŞ'a tüm kalbimle teşekkür ederim.

Resul Sercan ALTINTAŞ

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR.....	VI
İÇİNDEKİLER .....	VII
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	X
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	XII
KISALTMALAR .....	XVII
SEMBOL LİSTESİ.....	XVIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin İçeriği .....	5
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	7
2.1. Takım Tezgahlarının Enerji Tüketimini Sınıflandırma ve Modelleme Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	7
2.2. Serbest Yüzey Aşınmasının Metal Kesme Enerjisine Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	22
3. UNSUR BAZLI ENERJİ TAHMİN MODELİ.....	26
3.1. Unsur Bazlı Tasarım (UBT) ve ISO 10303 (STEP) Standardı.....	26
3.2. Unsur Bazlı Enerji Tahmin Modeli.....	28
3.2.1. Yardımcı Enerji Tüketimi Tahmin Modeli .....	29
3.2.2. Metal Kesme Enerjisi Tüketimi Tahmin Modeli .....	31

4. BSD TEZGAHININ ENERJİ KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI.....	34
4.1. BSD Tezgahı Özellikleri.....	34
4.2. Enerji Ölçüm Yöntemi .....	36
4.3. Temel Enerji Ölçme İşlemleri.....	37
4.4. Yardımcı Enerji Ölçme İşlemleri.....	39
4.4.1. Kesme Sıvısı Ünitesi Enerji Tüketimi Ölçme İşlemleri.....	39
4.4.2. İş Mili Enerji Tüketimi Ölçümleri .....	40
4.4.3. İlerleme Eksenleri Enerji Tüketimi Ölçümleri.....	42
4.4.4. Talaş Konveyörü Enerji Tüketimi Ölçümleri .....	47
4.5. BSD Tezgahı Enerji Tüketimi Dağılımı .....	48
5. ENERJİ TAHMİN MODELİ DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI.....	50
5.1. Test Koşullarının Belirlenmesi .....	51
5.2. Deneysel İşlem Basamakları.....	52
5.3. Deneysel Test Sonuçları .....	54
5.4. Enerji Tahmin Modeli Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar.....	59
5.5. Deneysel Sonuçlar ve Enerji Tahmin Modeli Kullanarak Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması .....	66
6. STEP UNSURLARINI FREZELEMELİK İÇİN OLUŞTURULAN FARKLI TAKIM YOLLARININ ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ VE ENERJİ TÜKETİMİ AZALTMA STRATEJİLERİ.....	69
6.1. Dikdörtgen Açık Cep İçin Yapılan Testler .....	70
6.2. Dikdörtgen Kapalı Cep İçin Yapılan Testler .....	73
6.3. Açık Kanal İçin Yapılan Testler .....	75
6.4. Yapılan Test Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	78
7. SONUÇLAR .....	80
7.1. Gelecek için Önerilen Çalışmalar .....	82



KAYNAKLAR .....	84
ÖZGEÇMİŞ .....	87
EK 1. ENERJİ METRE İLE ALINAN ANLIK GÜÇ VE ZAMAN DEĞERLERİNİ SUNUCU ÜZERİNDE KAYDEDEBİLMEK İÇİN KULLANILAN KOD.....	89
EK 2. ENERJİ TAHMİN MODELİ DOĞRULAMA TESTİNDE İŞLENEN PARÇANIN TEKNİK RESMİ .....	91
EK 3. DENEYSEL TEST SONUÇLARI .....	92

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 4.1.	DMU 65 monoBLOCK tezgahı teknik özellikleri	35
Çizelge 4.2.	İş mili devir değeri – ortalama anlık güç değeri çizelgesi	41
Çizelge 4.3.	X eksenli ilerleme değeri – ortalama anlık ilerleme gücü çizelgesi	43
Çizelge 4.4.	Y eksenli ilerleme değeri – ortalama anlık güç değeri çizelgesi	44
Çizelge 4.5.	Z- eksenli ilerleme değeri – ortalama anlık güç değeri çizelgesi	45
Çizelge 4.6.	Z+ eksenli ilerleme değeri – ortalama anlık güç değeri çizelgesi	46
Çizelge 5.1.	Testlere ait kesme koşulları	51
Çizelge 5.2.	Kesici takım teknik bilgileri	51
Çizelge 5.3.	Kesici uç teknik bilgileri	52
Çizelge 5.4.	Unsurları frezelemek için geçen deneysel süre çizelgesi	57
Çizelge 5.5.	Boş kesim ve dolu kesim sonucu elde edilen değerler	57
Çizelge 5.6.	Enerji tüketim değerlerinin toplam tüketime göre yüzde oranları	58
Çizelge 5.7.	Takım yolu uzunluğu kullanılarak elde edilen kesme süreleri	60
Çizelge 5.8.	Tahmin modeli kullanılarak hesaplanan ilerleme eksenleri hareketinden kaynaklanan enerji tüketimi değerleri	61
Çizelge 5.9.	Tahmin modeli kullanılarak hesaplanan metal kesme enerjisi değerleri	62

Çizelge 5.10.	Enerji tahmin modeli kullanılarak hesaplanan enerji tüketim değerleri	63
Çizelge 5.11.	Hesaplanan enerji tüketim değerlerinin toplam tüketime göre yüzde oranları	63
Çizelge 5.12.	Deneysel kesme süreleri kullanılarak hesaplanan enerji tüketim değerleri	64
Çizelge 5.13.	Deneysel kesme süreleri kullanılarak hesaplanan enerji tüketim değerlerinin toplam tüketime göre yüzde oranları	65
Çizelge 5.14.	Takım yolu uzunluğu kullanılarak hesaplanan kesme süreleri vasıtasıyla elde edilen enerji tüketim değerlerinin hata oranları	66
Çizelge 5.15.	Deneysel kesme süreleri vasıtasıyla elde edilen enerji tüketim değerlerinin hata oranları	67
Çizelge 6.1.	Kesici takım teknik bilgileri	69
Çizelge 6.2.	Kesici uç teknik bilgileri	70
Çizelge 6.3.	Kesim koşulları	70
Çizelge 6.4.	Dikdörtgensel açık cep testi sonuçları	73
Çizelge 6.5.	Dikdörtgensel kapalı cep testi sonuçları	75
Çizelge 6.6.	Açık kanal testi sonuçları	77

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 1.1. (a)	Dünya’da birincil enerji tüketim kaynakları	2
Şekil 1.1. (b)	Türkiye’de birincil enerji tüketim kaynakları	2
Şekil 2.1.	Bridgeport universal freze tezgahı güç tüketim profili	8
Şekil 2.2.	Bridgeport otomatik freze tezgahı güç tüketim profili	8
Şekil 2.3.	Cincinnati Milacron otomatik freze tezgahı güç tüketim profili	9
Şekil 2.4.	Takım tezgahı birimlerinin enerji kayıp türleri	16
Şekil 2.5.	Tahmin edilen ve deneysel enerji tüketim eğrisi	20
Şekil 2.6.	Serbest yüzey aşınma şiddetinin talaş kaldırma gücüne etkisi	23
Şekil 2.7.	Serbest yüzey aşınmasının enerji tüketimine etkisi	24
Şekil 2.8.	Frezeleme operasyonu esnasında aşınmış ve yeni kesici takıma ait Anlık Güç – Zaman grafiği	25
Şekil 3.1.	STEP AP 224’de tanımlanan imalat unsurları	28
Şekil 3.2.	Frezeleme operasyonu kesme parametreleri	32
Şekil 4.1.	DMG DMU 65 monoBLOCK tezgahı	34
Şekil 4.2.	Enerji ölçüm yöntemi şematik gösterimi	37

Şekil 4.3.	Temel enerji tüketim testi anlık güç – zaman grafiği	38
Şekil 4.4.	Kesme sıvısı ünitesi enerji tüketim testi anlık güç – zaman grafiği	40
Şekil 4.5.	İş mili enerji tüketimi testi iş mili ortalama anlık güç – devir grafiği	41
Şekil 4.6.	X eksen için ortalama anlık ilerleme gücü – ilerleme hızı grafiği	43
Şekil 4.7.	Y eksen için ortalama anlık ilerleme gücü – ilerleme hızı grafiği	44
Şekil 4.8.	Z- eksen için ortalama anlık ilerleme gücü – ilerleme hızı grafiği	45
Şekil 4.9.	Z+ eksen için ortalama anlık ilerleme gücü – ilerleme hızı grafiği	46
Şekil 4.10.	Talaş konveyörü enerji tüketimi testi anlık güç – zaman grafiği	47
Şekil 4.11.	Deneysel sonuçlarla elde edilen enerji tüketim dağılımı	48
Şekil 4.12.	Teorik ilerleme süresi kullanılarak tahmin modeli vasıtasıyla hesaplanan enerji tüketim dağılımı	49
Şekil 4.13.	Deneysel kesme süresi kullanılarak tahmin modeli vasıtasıyla hesaplanan enerji tüketim dağılımı	49
Şekil 5.1.	Enerji tahmin modeli doğrulama testi parçası	50
Şekil 5.2.	Kenar frezeleme operasyonu için oluşturulan takım yolu	53

Şekil 5.3.	Dikdörtgensel açık cep unsurunu işlemek için oluşturulan takım yolu	53
Şekil 5.4.	Açık kanal unsurunu işlemek için oluşturulan takım yolu	53
Şekil 5.5.	Kenar frezeleme operasyonu anlık güç – zaman grafiği	55
Şekil 5.6.	Dikdörtgensel açık cep frezeleme operasyonu anlık güç – zaman grafiği	56
Şekil 5.7.	Açık kanal frezeleme operasyonu anlık güç – zaman grafiği	56
Şekil 5.8.	Enerji tüketim değerlerinin toplam tüketime göre oranlarının grafiksel gösterimi	58
Şekil 5.9.	Hesaplanan enerji tüketim değerlerinin toplam tüketime göre oranlarını gösteren sütun grafiği	64
Şekil 5.10.	Deneysel kesme süreleri kullanılarak hesaplanan enerji tüketim değerlerinin toplam tüketime göre oranlarını gösteren sütun grafiği	65
Şekil 5.11.	Takım yolu uzunluğu kullanılarak hesaplanan kesme süreleri vasıtasıyla elde edilen enerji tüketim değerlerinin unsur ve parça başına düşen hata oranlarını gösteren sütun grafiği	68
Şekil 5.12.	Deneysel kesme süreleri vasıtasıyla elde edilen enerji tüketim değerlerinin unsur ve parça başına düşen hata oranlarını gösteren sütun grafiği	68
Şekil 6.1.	Parçayı takip et alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu	71
Şekil 6.2.	Periferi takip et alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu	71

Şekil 6.3.	Profil alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu	71
Şekil 6.4.	Zig alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu	72
Şekil 6.5.	Zig-Zag alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu	72
Şekil 6.6.	Konturla Zig alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu	72
Şekil 6.7.	Parçayı takip et alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu	74
Şekil 6.8.	Zig alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu	74
Şekil 6.9.	Zig-Zag alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu	74
Şekil 6.10.	Konturla Zig alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu	74
Şekil 6.11.	Parçayı takip et alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu	76
Şekil 6.12.	Periferi takip et alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu	76
Şekil 6.13.	Profil alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu	76
Şekil 6.14.	Zig alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu	76
Şekil 6.15.	Zig-Zag alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu	76
Şekil 6.16.	Dikdörtgensel açık cep unsuru enerji tüketimi sütun grafiği	79
Şekil 6.17.	Dikdörtgensel kapalı cep unsuru enerji tüketimi sütun grafiği	79
Şekil 6.18.	Açık kanal unsuru enerji tüketimi sütun grafiği	79

Şekil E2.1.	Deneysel Kesim Parçası Teknik Resmi	86
Şekil E3.1.	Test 2 Kenar Frezeleme Operasyonu Anlık Güç – Zaman Grafiği	87
Şekil E3.2.	Test 2 Dikdörtgensel Açık Cep Frezeleme Operasyonu Anlık Güç – Zaman Grafiği	87
Şekil E3.3.	Test 2 Açık Kanal Frezeleme Operasyonu Anlık Güç – Zaman Grafiği	88
Şekil E3.4.	Test 3 Kenar Frezeleme Operasyonu Anlık Güç – Zaman Grafiği	88
Şekil E3.5.	Test 3 Dikdörtgensel Açık Cep Frezeleme Operasyonu Anlık Güç – Zaman Grafiği	89
Şekil E3.6.	Test 3 Açık Kanal Frezeleme Operasyonu Anlık Güç – Zaman Grafiği	89
Şekil E3.7.	Test 4 Kenar Frezeleme Operasyonu Anlık Güç – Zaman Grafiği	90
Şekil E3.8.	Test 4 Dikdörtgensel Açık Cep Frezeleme Operasyonu Anlık Güç – Zaman Grafiği	90
Şekil E3.9.	Test 4 Açık Kanal Frezeleme Operasyonu Anlık Güç – Zaman Grafiği	91



## KISALTMALAR

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım
BDÜ	Bilgisayar Destekli Üretim
BSD	Bilgisayarlı Sayısal Denetim
CES	Karbon Salınım İzi
IRENA	Uluslararası Yenilebilir Enerji Örgütü
ISO	Uluslararası Standart Organizasyonu
MRR	Talaş Debisi
OTD	Otomatik Takım Değiştirici
SD	Sayısal Denetim
SEC	Özgül enerji tüketimi değeri
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
UBT	Unsur Bazlı Tasarım
UP	Uygulama Protokolü
UTT	Unsuru Tanıyarak Tasarım

## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Sembol</b>	<b>Açıklama</b>
$a_e$	Kesme genişliği
$a_p$	Kesme derinliği
$a_0$	Ek yük kaybı katsayısı
$a_1$	Ek yük kaybı katsayısı
$B$	Kesme genişliği
$C$	Katsayı
$C_0$	Deneysel sabit
$C_1$	Deneysel sabit
$D$	Kesici takım çapı
$D_c$	Kesici takım çapı
$E_{aY}$	İş milinin Y ekseninde ilerleme esnasında pozitif ivmelenme süresince harcadığı enerji
$E_{ayd}$	Tezgahın aydınlatma amaçlı kullandığı enerji
$E_{bilg}$	Bilgisayar ünitesinin harcadığı enerji
$E_{boşkesim}$	Boşta kesme operasyonu sırasındaki enerji
$E_c$	Tüketilen enerji

$E_{cs}$	Özgül tüketim enerjisi
$E_{cut}$	İş milinin kendi etrafında belli bir dönüyle asıl metal kesme işlemini yaparken harcadığı enerji
$E_{dY}$	İş milinin Y ekseninde ilerleme esnasında negatif ivmelenme süresince harcadığı enerji miktarı
$E_{dolaylı}$	Fabrikada parçayı üretmek için elverişli ortam oluşturmak için harcanan enerji
$E_{dolukesim}$	Dolu kesme operasyonu sırasındaki enerji
$E_{faydalı,birincil}$	Metal kesme işlemi için işlem özelliklerini iyileştiren alt birimlerin harcadığı enerji
$E_{faydalı,ikincil}$	Metal kesim işleminde doğrudan katkısı olmayan alt birimlerini soğutmaya harcanan enerji
$E_{ilerleme}$	Metal kesme işlemi gerçekleşirken tezgahın eksenleri vasıtasıyla yaptığı ilerleme hareketi için harcanan enerji
$E_{ilerleme-X}$	X yönündeki ilerleme enerji tüketimi
$E_{ilerleme-Y}$	Y yönündeki ilerleme enerji tüketimi
$E_{işmili}$	İş milinin yüksüz durumdayken belli bir devirde dönmesiyle elde edilen enerji
$E_{kayıp}$	Birincil ve ikincil enerji tüketimini gerçekleştiren alt birimlerinin verimsizliğinden kaynaklanan enerjik kayıplar
$E_{kesim}$	Talaş kaldırma işlemi ile harcanan enerji
$E_{kesme sıvısı}$	Kesme sıvısını kesme ortamına göndermek için harcanan enerji
$E_{kızak yağ}$	Kızak yağlama ünitesi tarafından harcanan enerji

$E_{metalkesme}$	Metal kesmeye harcanan enerji tüketimi
$E_{nakliye}$	Nakliye için harcanan enerji
$E_{OTD}$	OTD (Otomatik Takım Değiştirici) tarafından harcanan takım değiştirme enerjisi
$E_{parça}$	Bir parçayı üretmek için harcanan enerji
$E_{run}$	İş milinin kendi etrafında belli bir dönü değerinde kararlı halde iken yani kesilen malzeme ile etkileşim olmayan anlarda harcadığı enerji
$E_{sabit}$	Tezgahın kesime hazır durumda tükettiği enerji miktarı
$E_{servo}$	İlerleme eksenlerini kilitlemek için servo motorlar tarafından harcanan enerji
$E_{soğ}$	Sıvının kesim ortamına iletilmesi için harcanan enerji
$E_{soğutucu}$	Soğutucu birim tarafından harcanan enerji miktarı
$E_{soğ(el.ünite)}$	Sabit enerji kalemleri ve elektronik üniteyi soğutmak için harcanan enerji
$E_{soğ(ortam)}$	Ortam sıcaklığının uygun olmadığını algıladığında devreye giren soğutucunun harcadığı enerji
$E_{SY}$	İş milinin Y ekseninde kararlı halde ilerlerken harcadığı enerji
$E_t$	Tüketilen toplam enerji miktarı
$E_{takım}$	Takım değiştirme işlemlerinin harcadığı enerji tüketimi
$E_{takım-değ}$	Gerçekleştirilen operasyon sırasında takım değiştirmek için harcanan enerji

$E_{talaş\ kon}$	Talaş konveyörünün harcadığı enerji
$E_{temel}$	Tezgahın kesime hazır durumda beklerken harcadığı temel enerji tüketimi
$E_{teorik}$	Operasyon düzeyinde sarf edilen metal kesme enerjisi
$E_{toplam}$	Tüketilen toplam enerji miktarı
$E_{unsur}$	Urusların her biri için harcanan enerji
$E_{yardımcı}$	Kesme işleminin gerçekleşmesi ya da iyileştirilmesi için alt birimler tarafından sarf edilen yardımcı enerji tüketimi
$E_{yar,sabit}$	Yardımcı birimlerce tüketilen sabit enerji
$E_{yar,değişken}$	Yardımcı birimlerce tüketilen değişken enerji
$f$	İlerleme hızı
$F_t$	Kesme kuvvetinin teğetsel bileşeni
$f_z$	Diş başına ilerleme
$h_m$	Ortalama talaş kalınlığı
$k$	Kesilecek malzemenin özgül kesme enerjisi
$K$	Ayar açısı
$k_c$	Özgül kesme enerjisi
$k_{c1,1}$	Malzeme sabiti
$l_f$	Parçayı işlemek için izlenen takım yolunun uzunluğu

$l_{f-X}$	X eksenindeki takım yolu uzunluğu
$l_{f-Y}$	Y eksenindeki takım yolu uzunluğu
$m$	Katsayı
$mc$	Malzeme sabiti
$N$	İş milinin çalıştığı devir değer
$n$	İş mili dns
$P_a$	Metal kesme sırasında gerçekleşen mekanik ve elektriksel kayıplardan kaynaklanan gc sarfiyatı
$P_{air}$	Boşta kesme işleminde çekilen gc
$P_b$	Temel gc
$P_c$	Kesme anında çekilen gc
$P_{cool}$	Soğutucunun çektiği gc
$P_{cut}$	Kesme işlemi için çekilen gc
$P_{ilerleme,eksen-a,ort}$	Deneysel çalışmalarla ilgili eksenlerde belirli ilerleme değerleri için çekilen ortalama gc değerleri
$P_{ilerleme,eksenX,ort}$	X+ ve X- ekseninde yapılan test sonucunda elde edilen ilgili ilerleme değerleri için ortalama anlık gc değerleri
$P_{ilerleme,eksenY,ort}$	Y+ ve Y- ekseninde yapılan test sonucunda elde edilen ilgili ilerleme değerleri için ortalama anlık gc değerleri
$P_{ilerleme,eksenZ-,ort}$	Z- ekseninde yapılan test sonucunda elde edilen ilgili ilerleme değerleri için ortalama anlık gc değerleri

$P_{ilerleme,eksenZ+,ort}$	Z+ ekseninde yapılan test sonucunda elde edilen ilgili ilerleme değerleri için ortalama anlık güç değerleri
$P_{in}$	İş mili tarafından çekilen toplam güç
$P_{iş\ mili,ort}$	İş mili motorundan çekilen ortalama güç
$P_{kesmesivisi,ort}$	Kesme sıvısını ortama göndermek için çekilen ortalama güç
$P_{talaşkonveyörü,ort}$	Talaş konveyörünün ortalama anlık güç tüketim değeri
$P_{temel,ort}$	Tezgahın kesime hazır durumdayken çektiği ortalama anlık güç değeri
$P_r$	Kesime hazır durum gücü
$P_u$	İş milinin belli bir hızda döndüğü fakat metal kesme işlemi yapmadığı durumda çektiği güç
$P_0$	Tezgahın kesime hazır durumda çektiği güç miktarı
$P_1$	Tezgahın kesime hazır durumda beklerken çektiği güç
$P_2$	Servo motorlar ve iş mili tarafından metal kesme için çekilen güç
$P_3$	İş milini ivmelendirme ve pozisyonlama için çekilen güç
$Q$	Talaş debisi
$s_z$	Diş başına ilerleme
$t$	Metal kesme süresi
$T$	Takım ömrü
$t_{air}$	Malzemeye dalma ve çıkma esnasında geçen süre

$t_b$	Temel güç sarfedilirken geçen süre
$t_c$	Metal kesme operasyonu boyunca geçen zaman
$t_d$	Kesme derinliği
$t_{ilerleme,eksen-a}$	Deneysel çalışmalarla ilgili eksenlerde gerçekleşen ilerleme hareketinin süresi
$t_{kesmesıvısı}$	Kesme sıvısı gönderilme süresi
$t_{metalkesme}$	Metal kesme süresi
$t_{operasyon}$	Operasyon süresi
$t_r$	Kesme hazır durum süresi
$t_{talaş konveyörü}$	Talaş konveyörünün aktif olduğu süre
$t_1$	Tezgahın kesmeye hazır hale geçme süresi
$t_2$	Metal kesme operasyonu süresi
$t_3$	Takım değiştirme süresi
$T_1$	Tezgahın kesime hazır durumda beklerken geçen süre
$T_2$	Metal kesme süresi
$T_3$	İş milini ivmelendirme ve pozisyonlama için geçen süre
$\overline{VB}(t)$	Serbest yüzey aşınma miktarının zamana göre değişimi
$V_f$	İlerleme hızı



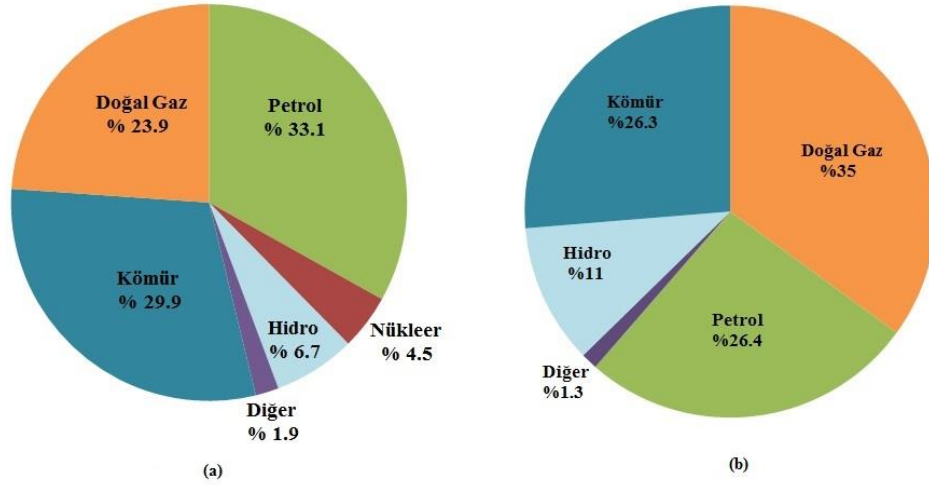
$V_{unsur}$	Frezeleme operasyonunda işlenecek unsurun hacmi
$Y$	Kesme hacmi
$y_E$	Kesici uç başına enerji ayak izi
$z$	Kesme ağzı sayısı
$\gamma_0$	Efektif küreme açısı
$\Delta T$	Operasyon süresi
$\eta$	Verimlilik oranı
$\varphi_s$	Kesme açısı

## 1. GİRİŞ

Endüstrileşmenin ve insan nüfusunun artışı dünya enerji tüketiminin hızla artmasına yol açmaktadır. Çeşitli senaryolar ışığında yapılan tahminlere göre 2035 yılında dünya genelinde birincil enerji talebinin mevcut talebe göre minimum %42,7 artış göstermesi beklenmektedir [1]. Artan enerji talebiyle birlikte enerji üretimi için kullanılan kaynakların çevreye etkileri ve enerji bulunurluğu hakkında endişeler artmaktadır. Karbondioksit, su buharı ve metan gibi atmosferde bulunan gazlar sera gazları olarak bilinirler. Bu gazların dünyadan yansıyan güneş ışınlarını tutma özelliği vardır ve gazların ışınları tutmasıyla yerküre ısınır. Bu gazların atmosferdeki oranlarının artması, yer kürenin de sıcaklığının artarak ısınması anlamına gelmektedir. Enerji üretebilmek için karbon bazlı ya da fosil yakıtlar olarak adlandırılan kömür, doğal gaz ve petrol gibi doğal enerji kaynaklarının yakılmasıyla ortaya çıkan karbondioksit de güneş ışınlarının yer yüzeyinde tutunmasına dolayısıyla yer yüzeyi sıcaklığının artmasına sebep olmaktadır. Küresel ısınma adı verilen bu ısınma olayı buzulların erimesi ve yeryüzünün kimi bölgelerinde deniz seviyelerinin 8-88 mm arası yükselmesi gibi sorunlar doğurmaktadır. 2012 verilerine göre dünyada kaynaklar bazında birincil enerji tüketiminde en büyük pay %33,1 ile petrole aittir. Şekil 1.1(a)'da görüldüğü üzere petrolün ardından sırasıyla %29,9 pay ile kömür ve ardından %23,9 ile doğal gaz gelmektedir. Bu üç karbon bazlı yakıtın toplam payı %86,9 seviyesindedir. Nükleerin payı %4,5, yenilenebilir kaynaklardan hidronun payı %6,7 ve diğer yenilenebilir kaynakların payı ise %1,9 seviyesindedir [1].

Çeşitli senaryolar ışığında yapılan tahminlere göre fosil yakıt kullanımının 2035'de %76 oranlarına düşmesi beklenmektedir [1]. Beklenen bu %10'luk azalma her ne kadar ciddi bir oran olarak görülse de aynı senaryolarda 2035 yılında enerji talebinin de %42,7 artması da söz konusu olduğundan kullanılan fosil yakıt miktarının azalmayacağı aksine artacağı, dolayısıyla karbon salınım miktarının da artacağı görülmektedir. Ayrıca BP'nin (British Petroleum) dünya genelinde yaptığı çalışmalar sonucunda mevcut petrol rezervlerinin 53, doğal gaz rezervlerinin 56, kömür rezervlerinin de 109 yıllık ömre sahip olduğu hesaplanmıştır [2]. Bu da elektrik

üretiminde tükenbilir fosil kaynaklar yerine yenilenebilir kaynakların tercih edilmesinin önemini ortaya koyan bir diğer gerçektir. Yenilenebilir enerji santrallerinin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması bu tip santrallerin hızlı bir şekilde yaygınlaşmasının önünde bir engel teşkil etmektedir. Öte yandan gelişmiş ülkelerin yenilenebilir enerji konusundaki teşvikleri ve yenilenebilir enerji üretimi teknolojilerindeki gelişmelerle beraber kurulum maliyetlerinin de giderek azalması ve yenilenebilir enerji üretim miktarının artması beklenmektedir. Yenilenebilir enerji konusunda duyarlılığı ve farkındalığı arttırmak amacıyla 2009 yılında IRENA (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Örgütü) kurulmuştur ve faaliyetlerine devam etmektedir. IRENA tarafından 2030 yılında yenilenebilir enerji oranını iki katına çıkarmak amacıyla ortaya konan REmap projesi yürütülmektedir [3]. Ayrıca Avrupa Birliği de 20-20-20 iklim koruma formülüyle, 2020 yılında sera gazı salınım oranlarını 1990 yılı değerlerine göre %20 azaltmayı, yenilenebilir enerji üretim oranlarını %20 arttırmayı ve enerjiyi daha verimli kullanarak toplam enerji kullanım miktarlarını %20 azaltmayı hedeflemektedir.



Şekil 1.1. (a) Dünya'da birincil enerji tüketim kaynakları [1], (b) Türkiye'de birincil enerji tüketim kaynakları [1].

Şekil 1.1(b)'de görüldüğü üzere, Türkiye'de 2012 verilerine göre birincil enerji tüketim kaynağı olarak kullanılan fosil yakıtlar konusunda dünyadaki verilerle bir

paralellik söz konusudur. En fazla %35 ile doğal gaz, sonra sırasıyla %26,4 petrol ve %26,3 kömür olmak üzere fosil yakıtların toplam payı %87,7'yi bulmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak gösterilen hidronun payı %11 iken diğer yenilenebilir kaynakların payı ise %1,3'tür [2]. Fosil yakıtlar kullanarak enerji elde etmek Türkiye için bir sorunu daha beraberinde getirmektedir. Türkiye elektrik üretmek üzere kullandığı kömür, doğal gaz ve petrolün büyük bir kısmını ithal etmektedir. Öyle ki Türkiye, doğal gaz ithal eden ülkeler sıralamasında beşinci sırada, kömür ithal eden ülkeler sıralamasında ise sekizinci sırada yer almaktadır [1]. Ayrıca Türkiye petrol rafinelerinde işlediği ham petrolün yaklaşık %90'ını ithal etmektedir [4,5]. 2011 verilerine göre Türkiye'nin toplam ithalatının %21,9'luk payı enerji ithalatına aittir [6]. Tüm bu dışa bağımlılık, artan birincil enerji kaynakları fiyatlarından, enerji tedarikinde yaşanan belirsizlik ve oynaklıklardan ve değişken ülke politikalarından doğrudan etkilenme anlamına gelmektedir. Bu rakamlara bakıldığında Türkiye'nin enerji politikasını yenilenebilir enerji kaynaklar üzerine yöneltmesi gerektiği sonucu çıkmaktadır.

Yapılan tahminlere göre yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılma oranının önümüzdeki yıllarda artması beklense de, bu artışın enerji talebinde beklenen artıştan daha az olması sebebiyle atmosfere salınan sera gazı salınımının da artması beklenmektedir. Bu yüzden yenilenebilir enerji kaynakları artırılması faaliyetlerine paralel olarak, mevcut enerjiyi daha verimli kullanarak enerji talebini azaltmaya yönelik çalışmalar da yürütülmelidir. Enerji verimliliği, bir ürünü ya da hizmeti daha az enerji kullanarak üretmek ya da sağlamak olarak tanımlanabilir [7]. Dünyada ve ülkemizde başta konutlarda, ulaşım araçlarında ve endüstri sektöründe enerji verimliliği konusunda büyük bir potansiyel görülmektedir. Konutlarda yapılan mantolama işlemleri, floresan ampullerin kullanımı, ulaşımda yakıt tüketimi düşük araçların kullanımı enerjiyi verimli kullanmak üzere yapılan çalışmaların sonucunda hayatımıza girmiştir. Ayrıca ülkeler vatandaşlarının enerji verimliliği konusunda farkındalığını arttırmak amacıyla birçok proje yürütmektedir [8].

Endüstriyel enerji tüketimi, Dünya'da özellikle gelişmiş ülkelerde toplam enerji tüketiminin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Teknolojinin gelişmesi ve insanların

endüstriyel ürünlere talebinin artması gibi sebeplerden enerji tüketiminin önümüzdeki yıllarda da hızla artması beklenmektedir. Gelişmekte olan bir ülke olan Türkiye’de de durum farklı değildir. Öyle ki sanayi sektörünün enerji tüketim miktarı 2002 yılı verilerine göre 2010 yılında %25 artış göstermiştir. Türkiye’de sanayi sektörünün enerji tüketim payı ise toplam enerji tüketiminin yaklaşık %28’i kadardır ve en fazla enerji tüketen sektör konumundadır [9].

Sanayi sektöründe enerji tüketen operasyonların başında imalat işlemleri gelir. İmalat işlemleri işlenmemiş malzemeleri makineler ve/veya takım tezgahları vasıtasıyla son veya ara ürün haline getirmek için yürütülen işlemlerdir. Döküm, kaynak, yüzey iyileştirme, ısıl işlem, talaşlı imalat temel imalat işlemlerindedir [10]. İmalat işlemlerinin yaygın olarak kullanılanlarından biri de talaşlı imalat işlemidir. Talaşlı imalat işlemlerinin başında frezeleme, tornalama, vargelleme, planyalama, taşlama, broşlama ve delik delme işlemleri gelir. Talaşlı imalat işlemleri genellikle takım tezgahlarıyla yapılmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle takım tezgahları da zamanla gelişmiş ve bilgisayar kontrollü tezgahların sayısı artmıştır. Takım tezgahı üretim teknolojisinin gelişmesi ile tezgahlar çok hassas kesim yapabilecek kabiliyete ulaşmaktadır. Takım tezgahlarının yaygın kullanımı takım tezgahlarını sanayi sektöründeki önemli enerji tüketimi kalemlerinden biri kılmıştır. Takım tezgahları çalışmak için elektrik enerjisine ihtiyaç duyar. Ülkemizde üretilen elektriğin çoğu da hem karbon salınımı yüksek olan hem de enerji dönüşüm verimliliği düşük olan fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Bu yüzden enerjiyi verimli kullanmak adına takım tezgahlarının talaşlı imalat operasyonları süresince harcadığı enerjiyi belirlemek önemli hale gelmiştir. Her takım tezgahının enerji tüketimi gerek kullanım amacına göre gerekse kesime yardımcı alt birimlerinin farklı kabiliyetlerde olmasından ötürü kendine özgüdür. Bu yüzden her tezgahın özgün güç tüketim profillerinin çıkarılması gerekmektedir. Bu profiller operasyonlar için harcanacak enerji tüketim değerlerinin tahminini kolaylaştırır ve dolayısıyla enerjiyi daha verimli kullanmak adına geliştirilecek işleme stratejilerinin belirlenmesine yardımcı olur.

## 1.1. Tezin İçeriği

Bu tez çalışmasının iki temel amacı bulunmaktadır. Bunlardan ilki her takım tezgahında kullanılabilir, işlenilen unsur bazında bir enerji tahmin modeli ortaya koymak ve modelin tutarlılığını deneysel çalışmalarla ölçmektir. Diğeri ise unsurları işlemek üzere oluşturulan takım yollarının enerji tüketime etkisini incelemek ve buradan yola çıkarak enerji tüketimini azaltmak için stratejiler geliştirmektedir.

Tez kapsamında öncelikle takım tezgahlarının enerji tüketim değerlerini tahmin eden bir model sunulacaktır. Daha sonra TOBB ET Teknoloji Merkezi İleri İmalat Laboratuvarı'nda yer alan DMG DMU 65 monoBLOCK BSD (Bilgisayarlı Sayısal Denetim) dik işleme merkezinin enerji tüketime deneyler yapılarak incelenecek ve modelde kullanılmak üzere bazı sabit değerler elde edilecektir. Doğrulama alışmaları kapsamında prizmatik bir iş parçası üzerinde STEP unsurları frezelenen ve elde edilen deneysel değerlerin önerilen enerji tahmin modeli vasıtasıyla elde edilen değerlerle tutarlılığı saptanacaktır. Ayrıca her bir unsur aynı kesme koşulları altında farklı takım yolları kullanılarak işlenip enerji tüketimleri incelenecek ve alt birimlerin tükettiği enerji değerlerinden yola çıkılarak türetilen enerji tüketime azaltma stratejileri üzerinde durulacaktır.

Tezin ikinci bölümü literatür araştırmalarını içermektedir. Bu bölümde ayrıntılı olarak takım tezgahlarının enerji tüketime sınıflandırılması ve modellenmesi üzerine yapılan çalışmalar üzerinde durulmuştur. Tezgah alt birimlerinin enerji tüketime modelleme üzerine yapılan çalışmalar da detaylı olarak incelenmiştir. Serbest yüzey aşınmasının metal kesme enerjisine etkisini inceleyen daha önce yapılmış çalışmalar detaylandırılmıştır.

nc bölümde unsur bazlı enerji tahmin modeli yer almaktadır. Burada ISO 10303 (STEP) standardı hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Takım tezgahlarının enerji tketeen birimleri tüketime karakterine göre sınıflandırılmıştır. Tezgahın temel enerji tüketime, kesmeye yardımcı alt birimler tarafından harcanan enerji tüketime ve metal kesme enerji tüketime modellenmiştir.

Dördüncü bölümde enerji tahmin modelinde yer alan tezgaha özgü sabit değerleri hesaplamak adına yapılan ölçümler yer almaktadır. Ayrıca doğrulama testleri kapsamında kullanılan tezgahın teknik özellikleri ve gerçekleştirilen deneysel ölçüm yöntemi detaylı olarak anlatılmaktadır.

Bölüm 5’de enerji tahmin modeli doğrulama çalışmaları kapsamında yapılan çalışmalar yer almaktadır. Bu bölümde unsurları frezelemek üzere belirlenen kesme koşulları ve deneysel işlem basamakları anlatılmıştır. Deneysel olarak hesaplanan enerji tüketim değerleri ve tahmin modeli kullanılarak hesaplanan enerji tüketim değerleri verilmektedir. Ayrıca bu değerler grafikler yardımıyla birbirleriyle karşılaştırılarak tahmin modelinin tutarlılığı ölçülmüştür.

Altıncı bölümde, bir unsuru işlemek için oluşturulan takım yollarının enerji tüketimine etkisini incelemek amacıyla yapılan testler detaylı şekilde verilmiştir. Yapılan testler sonucunda elde edilen enerji tüketim değerleri ve metal kesmeye harcanan süreler her bir alternatif için yer almaktadır.

Bölüm 7’de tez çalışması sonucunda elde edilen bulgular yorumlanmış ve gelecek için önerilen çalışmalara yer verilmiştir.

## **2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI**

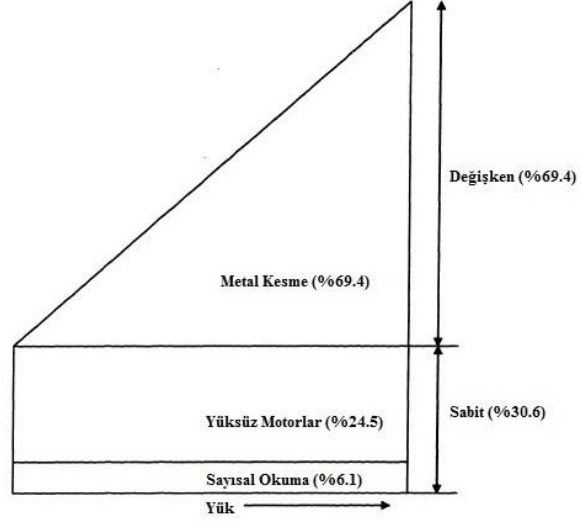
Takım tezgahlarında enerjiyi daha verimli kullanmak adına takım tezgahlarının enerji tüketen elemanlarının sınıflandırılması ve modellenmesi amacıyla literatürde birçok akademik çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar kapsamında bir talaşlı imalat sürecinin ne kadar enerji harcadığı, bu enerjilerin hangi alt birimlerden ne kadar miktarda sağlandığı imalat süreçleri boyunca elektrik tüketimi kayıt altına alınarak incelenmiş, elde edilen verilerle takım tezgahlarının enerji tüketim karakterini temsil eden matematiksel hesaplama modelleri ortaya konmuştur. Bu modellerin tutarlılığını ölçmek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca bu tutarsızlıkların kaynaklarını tespit etmek amacıyla yapılan ek çalışmalar da literatürde mevcuttur.

### **2.1. Takım Tezgahlarının Enerji Tüketimini Sınıflandırma ve Modelleme Üzerine Yapılan Çalışmalar**

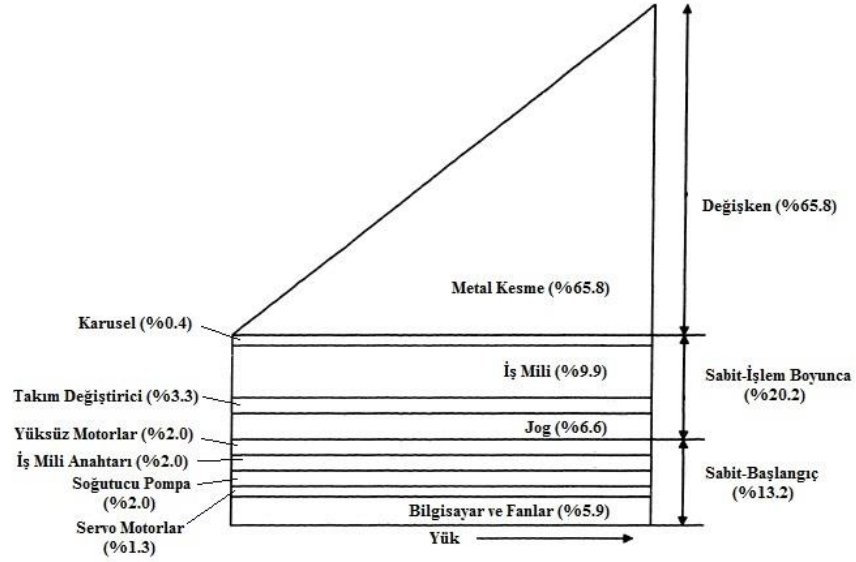
Takım tezgahlarının çevresel etkilerini belirlemek, tüketilen enerjinin tezgahın hangi alt birimi tarafından hangi miktarlarda ve hangi zamanlarda tüketildiğini belirlemek amacıyla yapılan öncü çalışmalardan biri Kordonowy[11] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında 1985 üretimi Bridgeport markalı universal freze tezgahı, 1988 üretimi Cincinnati Milacron markalı otomatik freze tezgahı ve 1998 üretimi Bridgeport markalı otomatik freze tezgahının güç tüketim verileri alınmıştır. Üç tezgahta yapılan frezeleme operasyonunda da alüminyum alaşımından imal edilmiş iş parçasından aynı kesici takımla, eşit ilerleme hızlarında eşit hacimde talaş kaldırılmıştır ve değişen talaş debilerinde güç tüketimindeki değişim gözlemlenmiştir. Çalışmada güç ölçümleri multimetre yardımıyla voltaj ve akım değerleri ölçülerek gerçekleştirilmiştir. Alt birimlerin sınıflandırılması yapılarak, hangi alt birimler tarafından ne kadar güç çekildiği tespit edilerek tezgahların enerji karakterizasyonları yapılmıştır. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere metal kesme için harcanan güç ve alt birimler tarafından harcanan güç miktarlarının frezeleme operasyonunu gerçekleştirmek için harcanan toplam güce oranı üç tezgah için ölçülmüştür. Ayrıca harcanan güç değerleri operasyonun içindeki karakterlerine göre



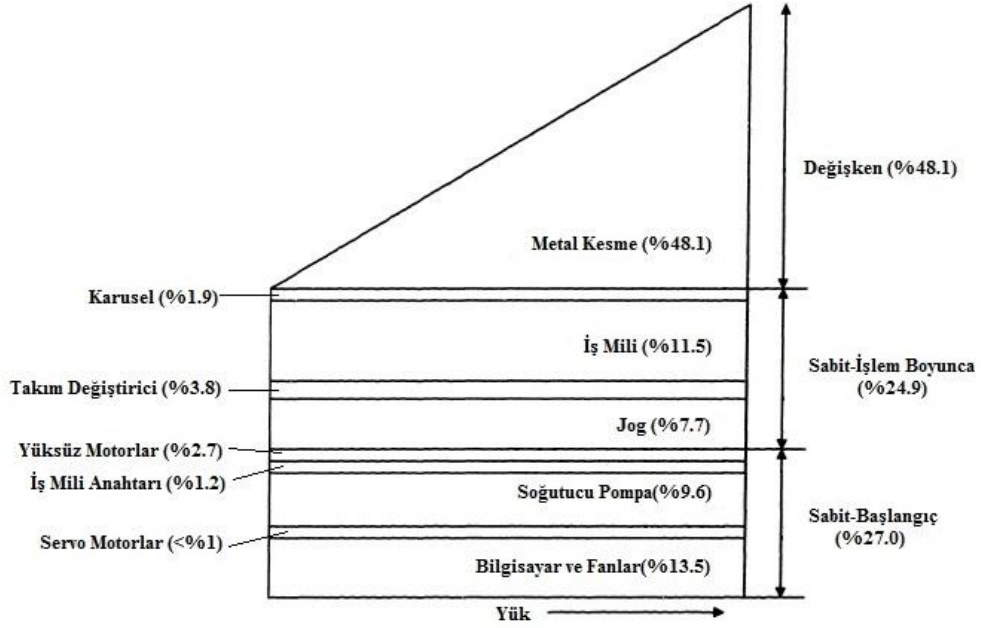
değişken, sabit-ilk çalıştırma ve sabit-işlem boyunca olarak üç gruba ayrılmıştır. Tezgah çalışır çalışmaz devreye giren bilgisayar, fanlar, servo motorlar, soğutucu pompalar, iş mili anahtarı gibi alt birimlerin çektiği güç sabit-ilk çalıştırma olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 2.1. Bridgeport universal freze tezgahı güç tüketim profili [11]



Şekil 2.2. Bridgeport otomatik freze tezgahı güç tüketim profili [11]



Şekil 2.3. Cincinnati Milacron otomatik freze tezgahı güç tüketim profili [11]

Tezgah çalıştıktan sonra, frezeleme operasyonu esnasında iş mili, takım değiştirici ve eksenlerde hareketi sağlayan jog tarafından çekilen güçler ise sabit-işlem boyunca olarak sınıflandırılmıştır. Metal kesme işlemini gerçekleştirmek için harcanan güç ise değişken güç olarak tanımlanmıştır. Çalışmada ayrıca alüminyumun özgül kesme enerjisi ile talaş debisi çarpılarak metal kesme işlemi için harcanacak teorik güç hesaplanmış ve deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır [11].

Dahmus ve Gutowski[12], Kordonowy[11]'nin ve Gutowski vd.[13]'nin yaptığı çalışmalardan elde edilen güç tüketim profillerini inceleyerek takım tezgahlarında metal kesme işlemini yapmak için harcanan enerjinin, metal kesme işlemini devam ettirebilmek için gerekli yardımcı birimlerin harcadığı enerjiden çok daha düşük olduğu sonucuna varmıştır. Bu çalışmada ayrıca aynı kesme parametrelerine sahip bir frezeleme operasyonunun birbirinden farklı dört takım tezgahında işlenmesi durumunda enerji tüketiminin nasıl olacağı varsayımlar yapılarak hesaplanmıştır. Yüksek otomasyonlu freze tezgahının, universal ve otomatik freze tezgahlarına göre çok daha fazla enerji tüketmekte olduğu ve bu enerjinin çoğunun alt enerji birimleri

tarafından tüketildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca yüksek otomasyonlu freze tezgahları çok daha yüksek kesme hızlarında çalışmaya imkan tanıdığı görülmüştür.

Talaşlı imalat işlemlerinin harcadığı enerjiyi tahmin edebilmek için yapılan modelleme çalışmalarına öncülük eden çalışma Gutowski vd.[13] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada talaşlı imalat süreci boyunca harcanan enerjinin Denklem 2.1 kullanarak hesaplanacağı ileri sürülmüştür.

$$E = (P_0 + kQ)t \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de kullanılan  $P_0$ , tezgahın kesime hazır durumda çektiği güç miktarını,  $k$  kesilecek malzemenin özgül kesme enerjisini,  $Q$  talaş debisini ve  $t$  metal kesme süresini ifade etmektedir. Bu model birçok çalışmanın önünü açmış olmakla beraber yardımcı alt birimlerin tükettiği enerjiyi tam teşekküllü modelleyememiştir. Çünkü yardımcı alt birimlerin tükettiği enerji sabit kalmayıp operasyon süresinde değişikliğe uğramaktadır. Bu modelin tutarlılığını ölçmek amacıyla deneysel bir çalışma yapılmamıştır.

Rajemi vd.[14], tornalama operasyonu ile bir parçayı üretmek için harcanan enerjiyi Denklem 2.2'deki gibi modellemiştir. Burada  $P_0$  tezgahın kesime hazır durumda çektiği güç miktarını,  $t_1$  tezgahın kesmeye hazır hale geçme süresini,  $t_2$  metal kesme operasyonu süresini,  $t_3$  takım değiştirme süresini,  $T$  takım ömrünü ve  $y_E$  kesici uç başına enerji ayak izini belirtmektedir. Bu model talaşlı imalat operasyonları için enerji ayak izi belirleme üzerine yoğunlaşmıştır ve oluşturulan modelin deneysel ölçümlerle tutarlılığını araştıran bir çalışma yürütülmemiştir.

$$E = P_0 t_1 + (P_0 + kQ)t_2 + P_0 t_3 \left(\frac{t_2}{T}\right) + y_E \left(\frac{t_2}{T}\right) \quad (2.2)$$

Mori vd.[15] takım tezgahlarının enerji verimliliğini arttırmak üzerine yaptığı çalışmada takım tezgahının enerji tükettiği durumları dörde ayırmıştır. Bunlar takım değişiminden sonra iş milini pozisyonlama ve ivmelendirme, metal kesme, metal

kesme operasyonu bittiğinde iş milini takım değiştirme noktasına geri getirme ve iş milini durdurma işlemleridir. Bu sınıflandırmadan yola çıkarak oluşturduğu model Denklem 2.3'te gösterilmiştir. Burada  $P_1$ , tezgahın kesime hazır durumda beklerken çektiği güç,  $P_2$  servo motorlar ve iş mili tarafından metal kesme için çekilen güç,  $P_3$  iş milini ivmelendirme ve pozisyonlama için çekilen güç,  $T_1$  tezgahın kesime hazır durumda beklerken geçen süre,  $T_2$  metal kesme süresi,  $T_3$  iş milini ivmelendirme ve pozisyonlama için geçen süre olarak tanımlanmıştır. Bu model işlenen malzemeye göre değişen kesme (takım ucu) enerjisini, ilerleme eksenlerinin harcadığı enerjiyi ve iş mili hızına göre değişiklik gösterecek iş mili enerjisini hesaba katmadığından gerçekçi bir model olarak görülmemektedir.  $P_1$ ,  $P_2$  ve  $P_3$  güçleri kendi içinde modellenip denklem genişletilirse daha sağlıklı sonuçlar alabilmek mümkün olabilir. Çalışma kapsamında farklı talaşlı imalat yöntemleri (yüzey frezeleme, kenar frezeleme, delik delme) için farklı talaş debilerinde deneysel veriler elde edilmiştir; fakat teorik modelle karşılaştırma çalışması yapılmamıştır.

$$P = P_1x(T_1 + T_2) + P_2xT_2 + P_3xT_3 \quad (2.3)$$

Diaz vd.[16] oluşturduğu modelde freze tezgahının bir frezeleme operasyonunda harcadığı toplam enerjiyi modelleyebilmek için tezgahın boşta kesim yaparken çektiği güçten yararlanılmıştır. Denklem 2.4'te gösterilen  $P_{cut}$  kesme işlemi için çekilen gücü,  $P_{air}$  boşta kesme işleminde çekilen gücü ve  $\Delta T$  de operasyon süresini ifade etmektedir.

$$E = (P_{cut} + P_{air})\Delta T \quad (2.4)$$

Diaz vd.[16] modelinin handikapı tezgahın kesime hazır durumda iken çektiği gücü ve yardımcı birimlerin çektikleri gücü göz önünde bulundurmamasıdır. Söz konusu modeli kullanarak yapacağı freze operasyonunun ne kadar enerji tüketeceğini bilmek isteyen bir tasarım mühendisi işlemi boşta kesim yaparak çalıştırıp harcadığı enerjiyi hesaplaması gerekir. Ayrıca teorik modelin deneysel verilerle tutarlılığıyla ilgili bir karşılaştırılma gerçekleştirilmemiştir. Bu çalışmada ayrıca eşit hacimdeki talaş farklı

talaş debilerinde kaldırarak talaş debisinin arttıkça çekilen gücün de arttığı gösterilmiştir. Burada kesici ağız sayıları ve kaplama özellikleri farklı kesici takımlar kullanılarak yapılan testlerde güç talebinin kesici ucun özelliklerine bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmiştir. İki kesme ağızına sahip TiN kaplamalı kesici ucun iki kesme ağızına sahip kaplaması olmayan kesici uca göre daha büyük talaş debilerinde çalışabildiği ve eşit güç tükettiği, dört kesme ağızına sahip kesici ucun ise iki kesme ağızına sahip kesici uca göre daha büyük talaş debilerinde çalışabildiğini gösterilmiştir. Çalışmada ayrıca frezelenen malzemenin çekilen güce etkisi de incelenmiştir. En fazla güç çelik frezelenirken daha sonra sırasıyla alüminyum ve polikarbonat malzeme frezelenirken harcanmıştır [16].

Kara ve Li[17], her takım tezgahına özgü sabitleri deneysel yöntemlerle belirleyip bu sabitleri kullanarak tüketilen enerjiyi hesaplayan bir model ortaya koymuştur. Burada takım tezgahlarının daha önce yaptığı kesimleri kaydeden SPSS yazılımı kullanılarak talaş debisi-ölgül enerji tüketimi eğrilerinden yararlanılarak her tezgah için  $C_0$  ve  $C_1$  sabitleri belirlenmiştir. Denklem 2.5 ve 2.6'da görüldüğü üzere SEC adı verilen ölgül enerji tüketimi değeri, tezgah sabitleri ve MRR yani talaş debisi kullanılarak hesaplanıp talaş kaldırılacak hacimle çarpılarak harcanan toplam enerjinin hesaplanabileceği ifade edilmiştir.

$$E = SEC \times \text{Kesme Hacmi} \quad (2.5)$$

$$SEC = (C_0 + \frac{C_1}{MRR}) \quad (2.6)$$

Kara ve Li [17]'nin ortaya koyduğu bu modelin doğrulama testleri dört farklı tezgahta (frezeleme, tornalama) yapılmıştır. Model yardımıyla tahmin edilen enerji ve ölçülen enerji değerleri karşılaştırıldığında %90 seviyelerinde bir tutarlılık saptanmıştır. Fakat modelin tahmin ettiği enerji, tezgahı ilk defa çalıştırmak için harcanan enerji, kesme hazır bekleme süresince harcanan enerjiyi ve pozisyonlama işlemleri sırasındaki enerjiyi içermemektedir. Çalışma kapsamında, farklı tezgahlarda operasyon sırasında kesme sıvısı ünitesinin çalıştığı ve çalışmadığı durumlar için ayrı

SEC formülleri türetilmiş fakat diğer yardımcı alt birimlerde gerçekleşecek değişikliklerin tüketilen toplam enerjiyi nasıl etkiyeceğini temsil eden modeller ortaya konmamıştır. Farklı kesici uç kullanımının, değişik malzeme kullanımı söz konusu olduğunda, enerji modeli oluştururken nasıl bir prosedür izlenmesi gerektiği bilgisi aktarılmamıştır.

He vd.[18] talaşlı imalat işlemlerinde tüketilen enerjiyi Sayısal Denetim (SD) komutlarıyla ilişkilendirerek modellemişlerdir. Model, takım tezgahlarının enerji tüketen alt birimlerini belirleyip bu birimlerin devreye girme zamanlarını SD komutlarından okuyarak enerji tüketim miktarlarını hesaplamaya dayanmaktadır. Oluşturulan model Denklem 2.7’de gösterildiği gibidir. Bu çalışmada ayrıca alt birimlerin tükettikleri enerji miktarları da çektikleri güç miktarlarının devrede oldukları süre ile çarpılmasına dayanan denklemlerle modellenmiştir.  $E_{işmili}$  işmilinin kesime hazır ve kesim anındaki enerji tüketimini,  $E_{ilerleme}$  ilerleme eksenlerinin enerji tüketimini,  $E_{takım}$  takım değiştirme işlemlerinin harcadığı enerji tüketimini,  $E_{soğutucu}$  soğutucu birim tarafından harcanan enerji miktarını ve  $E_{sabit}$  de tezgahın kesime hazır durumda tükettiği (aydınlatma, fanlar ve bilgisayar gibi birimlerden) enerji miktarını ifade etmektedir. Örneğin SD kod satırında yer alan bir M08 (Soğutucuyu aç) komutu M09 komutu (Soğutucuyu Kapat) gelene kadar geçen sürede soğutucunun çalışma süresi okunacak ve bu sürede soğutucu birim tarafından harcanan güçten yararlanarak  $E_{soğutucu}$  hesaplanacaktır.

$$E_{toplam} = E_{işmili} + E_{ilerleme} + E_{takım} + E_{soğutucu} + E_{sabit} \quad (2.7)$$

Çalışmada oluşturulan modelin tutarlılığını ölçmek amacıyla freze ve torna tezgahlarında deneysel çalışmalar yapılmıştır. İki tezgahta ölçülen enerjiyle tahmin edilen enerji arasında yaklaşık %80 seviyelerinde tutarlılık görülmüştür. Ayrıca tezgahlar özelinde alt birimlerin harcadığı enerjiler ortaya konmuştur fakat teorik model kullanılarak yapılan hesaplamalar açık bir şekilde belirtilmemiştir. Ayrıca iş milinin farklı devir değerlerindeki ve eksenlerin farklı ilerleme hızlarındaki güç

tüketim miktarları modellenmemiştir. Dolayısıyla çalışma sadece vaka analizleri özelinde kullanılan ilerleme hız değeri ve iş mili devir değerleriyle sınırlı kalmıştır.

Dragenescu vd.[19], takım tezgahının verimliliğini modelleme üzerine yaptıkları çalışmada tezgahın harcadığı enerjiyi de kesme parametrelerinden yararlanarak Denklem 2.8 ve 2.9'daki gibi modellemişlerdir.  $E_{cs}$  özgül tüketim enerjisini,  $D$  kesici takım çapını,  $F_t$  kesme kuvvetinin teğetsel bileşenini,  $s_z$  diş başına ilerlemeyi,  $t_d$  kesme derinliğini,  $B$  kesme genişliğini,  $z$  kesme ağızı sayısını,  $\eta$  verimlilik oranını ifade etmektedir. Denklem 2.9'da görüldüğü üzere  $E_{cs}$ 'nin  $Y$  (kesme hacmi) ile çarpılmasıyla da  $E_c$  (tüketilen enerji) hesaplanmaktadır. Bu model sadece kesme işleminin harcadığı enerji hesaplamakta olup yardımcı alt birimlerin harcadığı enerjiyi hesaba katmamaktadır.

$$E_{cs} = \frac{\pi D F_t}{3.672 \times 10^6 s_z t_d B z \eta} \quad (2.8)$$

$$E_c = Y E_{cs} \quad (2.9)$$

Dragenescu vd[19], çalışma kapsamında frezeleme tezgahıyla aynı kesici takım ile aynı alüminyum alaşımı malzemeyi kesme parametrelerini ( $s_z, t, B, z$  vb.) değiştirip işleyerek verimlilik – kesme parametresi, teğetsel kesme kuvveti – kesme parametresi ve özgül tüketim enerjisi – kesme parametresi grafikleri elde etmiştir.

Avram ve Xirouchakis[20], Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) – Bilgisayar Destekli Üretim (BDÜ) paket programlarından olan CATIA V5 R15 programı çıktısı dosyaları okuyarak, bu dosyalardan iş mili devir değerlerini ve ilerleme eksenleri hız değerlerini çeken ve bu değerlerle metal kesme işleminde harcanan enerjiyi hesaplayan bir model ortaya koymuşlardır. Sadece ilerleme ve iş mili devir değerleri değil kesici ağız sayısı, helis açısı, küreme açısı, kesme derinliği, kesme genişliği ve işlenilmek üzere seçilen malzemenin özgül kesme enerjisi bilgileri de modele aktarılarak hesaplama yapılmaktadır. Yapılan bu çalışma 2.5 Eksen frezeleme operasyonlarını gerçekleştirmek için oluşturulan takım yollarına ait paket programı

çıktısı dosyalarından veri okumaya dayanmaktadır. Çalışmada takım tezgahının tükettiği toplam enerjiyi modelleyen bir denklem paylaşmamakla beraber takım tezgahının Y ekseninde yaptığı bir frezeleme işleminde çektiği metal kesme enerjisi iş milinin çektiği güç ve ilerleme eksenlerinin çektiği güçten yola çıkarak modellenmiş, Denklem 2.10 ve 2.11’de gösterilmiştir.

$$E_{DE} = E_{aY} + E_{SY} + E_{dY} + E_{run} + E_{cut} \quad (2.10)$$

$$E_{DE} = \int_{t_0}^{t_1} P_{aY} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{SY} dt + \int_{t_2}^{t_3} P_{dY} dt + \int_{t_0}^{t_3} P_{aY} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{aY} dt \quad (2.11)$$

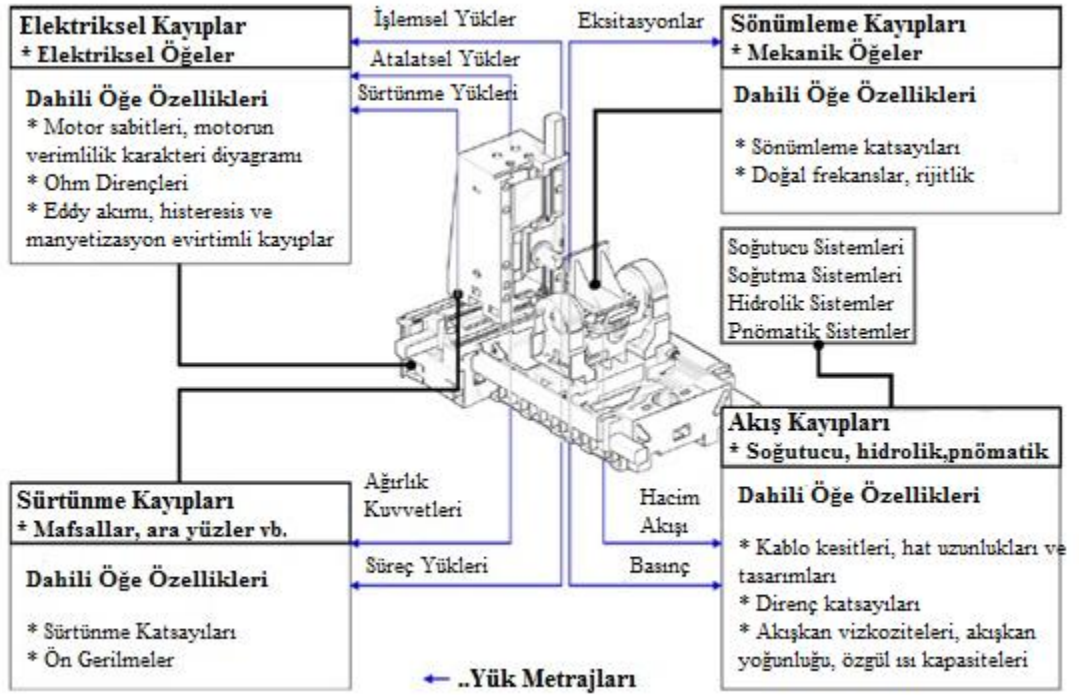
$E_{aY}$  iş milinin Y ekseninde ilerleme esnasında pozitif ivmelenme süresince harcadığı,  $E_{SY}$  iş milinin Y ekseninde kararlı halde ilerlerken harcadığı ve  $E_{dY}$  iş milinin Y ekseninde ilerleme esnasında negatif ivmelenme süresince harcadığı enerji miktarını ifade etmektedir.  $E_{run}$  iş milinin kendi etrafında belli bir devir değerinde kararlı halde iken yani kesilen malzeme ile etkileşim olmayan anlarda harcadığı enerjiyi  $E_{cut}$  ise iş milinin kendi etrafında belli bir devirle asıl metal kesme işlemini yaparken harcadığı enerjiyi ifade etmektedir. İş milinin çektiği güç hesaplanırken tork ve açısal hız değerlerinden yararlanılmıştır. Modeli doğrulamak amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda düşük kesme hızlarında ve yüksek kesme hızlarında frezeleme işlemi yapılarak enerji tüketen birimler ve tükettikleri enerji miktarları verilmiştir. Tüketilen enerji sabit, ilerleme eksenleri, iş mili ve yardımcı enerjiler olmak üzere dört ana gruba ayrılmıştır. Böylelikle diğer çalışmalarda görülen sabit, yardımcı ve metal kesme sınıflandırılmasının dışına çıkılmıştır. Metal kesme enerjisi dolaylı olarak iş mili ve eksenlerin çektiği enerji olarak sınıflandırılmış ve bu birimlerin kararlı haldeyken harcadıkları enerji de metal kesme enerjisi sınıfına dahi olmuştur. Çalışmanın sonucunda ayrıca yüksek hızda yapılan eşit hacimde talaş kaldırılma işleminin %43 daha hızlı gerçekleştiği ve %25 daha az enerji harcadığı ortaya konulmuştur.



Neugebauer vd[21] takım tezgahlarını daha verimli kullanmak amaçlı sistem seviyesinde yaklaşımla yaptıkları çalışmada takım tezgahlarının harcadığı enerjiyi Denklem 2.12'deki gibi modellemiştir.

$$E_{toplam} = E_{faydalı,birincil} + E_{faydalı,ikincil} + E_{kayıp} \quad (2.12)$$

$E_{faydalı,birincil}$ 'i metal kesme işlemi için harcanan şekil verme ve soğutucu gibi işlem özelliklerini iyileştiren alt birimlerin harcadığı enerji olarak,  $E_{faydalı,ikincil}$ 'i ise metal kesim işleminde doğrudan katkısı olmayan fakat işlemin gerçekleşmesi için gerekli olan lojistik faaliyetler ve takım tezgahının alt birimlerini soğutmaya harcanan enerji olarak,  $E_{kayıp}$ 'i ise birincil ve ikincil enerji tüketimini gerçekleştiren alt birimlerinin verimsizliğinden kaynaklanan enerji kayıpları olarak tanımlamıştır. Bu kayıp kaynaklarını Şekil 2.4'teki gibi sınıflandırmıştır. Neugebauer vd[21] takım tezgahının enerji verimliliğini ise birincil faydalı enerji tüketiminin toplam enerji tüketimine olan oranı olarak belirlemiştir.



Şekil 2.4. Takım tezgahı birimlerinin enerji kayıp türleri [21]

Hu vd.[22], iş mili enerji tüketimi üzerinden takım tezgahlarının tükettiği enerjiyi modellemiş ve iş milinin çektiği gücü üç alt gruba ayırmıştır. Denklem 2.13'te görüldüğü üzere iş mili tarafından çekilen toplam güç  $P_{in}$ , iş milinin belli bir hızda döndüğü fakat metal kesme işlemi yapmadığı durumda çektiği güç  $P_u$  ve kesme anında çekilen güç  $P_c$  ile, metal kesme sırasında gerçekleşen mekanik ve elektriksel kayıplardan kaynaklanan güç sarfiyatı da  $P_a$  olarak tanımlamıştır. Hu vd.[23] da tanımını yaptığı ek kayıplardan kaynaklanan güç sarfiyatını ikinci dereceden bir fonksiyon olarak Denklem 2.14'te olduğu gibi modellemiş ve Denklem 2.13 ile birleştirerek Denklem 2.15'i elde etmiştir. Buradaki  $a_0$  ve  $a_1$  ek yük kaybı katsayıları olarak tanımlanmış ve deneysel veriler kullanılarak en küçük kareler yöntemi kullanılarak bulunmuştur.

$$P_{in} = P_u + P_c + P_a \quad (2.13)$$

$$P_a = a_0 P_c + a_1 P_c^2 \quad (2.14)$$

$$P_{in} = P_u + (1 + a_0) P_c + a_1 P_c^2 \quad (2.15)$$

Hu vd.[22] BSD kontrollü bir tornalama tezgahında tork sensörü ve güç sensörü yardımıyla modeli doğrulama amaçlı deneyler gerçekleştirilmiştir. Tork sensöründen alınan verilerle iş milinin açısal hızı çarpılarak iş milinin çektiği toplam güç hesaplanmış ve güç sensöründen alınan veriler alınarak karşılaştırılmıştır. Bu değerler (farklı kesme koşulları altında yapılan 6 testte) doğrudan karşılaştırıldığında hata oranlarının %16.75 ile % 24.09 arasında değiştiği görülmüştür. Hu vd.[23]'da önerilen prosedür takip edilerek torna tezgahı için ek yük kaybı katsayıları belirlenerek, bulunan ek yük kayıpları kesme anında çekilen güçten çıkarıldığında ise hata oranlarının %3 civarında olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada enerji modeli bir bilgisayar yazılımına gömülerek kullanıcıya çevrim içi olarak anlık enerji verimliliği, anlık çekilen güç, operasyon süresince harcanan toplam enerji, metal kesme için harcanan enerji ve operasyon süresi gibi bilgileri sağlanmıştır. Bu model

bir tahmin modelinden çok, mevcut tüketimi sınıflandırmaya yöneliktir. Zira ek yük kayıpları çevrim içi çekilen güç miktarlarından yola çıkılarak hesaplanmaktadır.

Balogun ve Mativenga[24], takım tezgahlarının harcadığı enerjiyi CO2PE!(Karbon Salınımı Azaltılması Kooperatif Çalışması) kapsamında Ostaeyen[25]'in yaptığı sınıflandırmadan ve Kellens vd.[26]'nin önerdiği metodolojiden yola çıkarak kendi enerji modellerini ortaya koymuşlardır. Bu modelde harcanan enerji temel, kesime hazır durum ve metal kesme enerjisi olarak üçe ayrılmıştır. Temel enerji tezgahın açılışından kesime hazır durumda harcadığı enerji olarak tanımlanmış ve bilgisayar üniteleri, ışıklandırma, soğutma fanları, yağlama ve yüksüz motorlar tarafından harcanan enerji bu gruba dahil edilmiştir. Kesime hazır durum enerjisi ise tezgahın kesici takımını kesme pozisyonuna getirme, kesme hızına ulaşma ve uygun takım çağırma gibi işlevleri yerine getirmek için harcadığı enerji olarak tanımlanmıştır. Bu enerji SD kodlarıyla eşleştirildiğinde sırasıyla 'G00', 'S' ve 'T' kodları çalıştığında harcanan enerji olduğu gözlenir. Balogun ve Mativenga[24] literatürdeki diğer modellerin aksine metal kesme enerjisini salt takım ucu ile malzeme etkileşiminden doğan enerji olarak değil soğutucuyu çalıştırmak için harcanan enerjiyi de metal kesme enerjisine dahil ederek tanımlamışlardır. Bu enerji sınıflandırmasından yola çıkarak harcanan toplam enerjinin Denklem 2.16'da olduğu gibi hesaplanabileceğini öne sürmüşlerdir.

$$E_t = P_b t_b + (P_b + P_r) t_r + P_{air} t_{air} + (P_b + P_r + P_{cool} + kQ) t_c \quad (2.16)$$

Burada  $E_t$  tüketilen toplam enerji miktarı,  $P_b$  temel güç,  $P_r$  kesime hazır durum gücü,  $P_{air}$  ise takım ucunun malzemeye dalma ve çıkma sırasında malzeme etkileşimi olmayan durumda çektiği güç,  $P_{cool}$  kesme sıvısının çektiği güç ve  $t_b$  temel güç sarfedilirken geçen süre,  $t_r$  kesime hazır durum süresi,  $t_{air}$  malzemeye dalma ve çıkma esnasında geçen süre,  $t_c$  ise metal kesme operasyonu boyunca geçen zaman olarak tanımlanmıştır.  $Q$  talaş debisini,  $k$  ise özgül kesme enerjisini temsil etmektedir. Bu modele deneysel çalışmalar sonucu elde edilen iş mili devir-enerji

tüketimi grafiklerinden yola çıkarak elde edilen iş milinin enerji tüketim denklemi (Denklem 2.17) etki ettirilmiş ve Denklem 2.18 elde edilmiştir [24].

$$P_s = mN + C \quad (2.17)$$

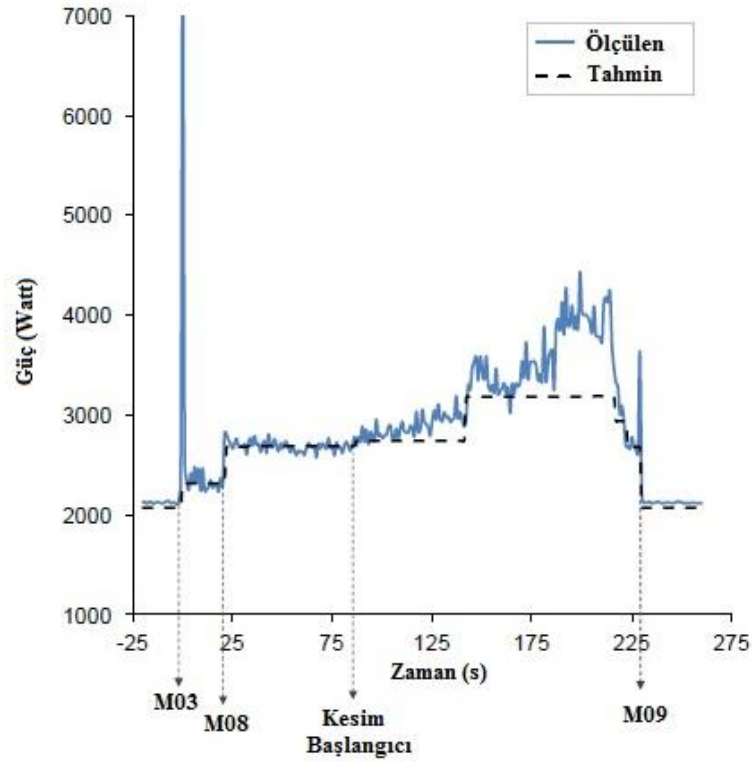
$$E_t = E_b + E_r + P_{air}t_{air} + (mN + C + P_{cool} + kQ)t_c \quad (2.18)$$

Denklem 2.17 ve 2.18'deki  $m$  ve  $C$ 'ler katsayılar olup takım tezgahının tipine ve çalıştığı devir aralığına göre değişebilmektedir.  $N$  ise iş milinin çalıştığı devir değeridir. Bu çalışmada ayrıca tornalama ve frezeleme olmak üzere üç farklı takım tezgahında kesimler yapılmış ve enerji tüketen birimlerin harcadıkları enerji miktarları belirtilmiştir. Ayrıca iki farklı tezgahta oluşturulan modele göre hesaplanan enerji tüketim değeriyle ölçülen enerji değeri arasında %2 ile %3'lük bir fark tespit edilmiştir. Fakat bu hesaplama işlemlerinin detayına ve özgül kesme enerjisinin nasıl belirlendiğine dair detay verilememiştir.

Aramcharoen ve Mativenga[27], takım tezgahının harcadığı enerjiyi ( $E_{toplam}$ ) Denklem 2.21'de görüldüğü gibi modellemiştir.  $E_{temel}$  takım tezgahının açık konumda olduğu fakat iş milinin dönmediği, ilerlemenin gerçekleşmediği ve kesmenin olmadığı durumda tezgahın harcadığı enerji olarak tanımlanmıştır.  $E_{takım-değ}$ , gerçekleştirilen operasyon sırasında takım değiştirmek için harcanan,  $E_{iş mili}$  iş milinin döndüğü süre zarfında harcanan,  $E_{ilerleme}$  eksenlerde ilerleme sağlayabilmek için harcanan,  $E_{soğ}$  ise sıvının kesim ortamına iletilmesi için harcanan enerji olarak tanımlanmıştır. İlgili birimlerin çektiği güç miktarlarının çalıştıkları süre ile çarpılmasıyla hesaplanmasına dayanan alt birim enerji tüketim modelleri de çalışmada sunulmuştur. Talaş kaldırma işlemi ile harcanan enerji ise  $E_{kesim}$  ile gösterilmiştir ve çoğu çalışmada olduğu gibi talaş debisiyle özgül kesme enerjisinin çarpılmasıyla elde edilen kesim gücünün zamanla çarpılmasıyla bulunmuştur.

$$E_{toplam} = E_{temel} + E_{takım-değ} + E_{iş mili} + E_{kesim} + E_{ilerleme} + E_{soğ} \quad (2.21)$$

Çalışma dahilinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek enerji modelinde belirtilen alt birimlerin güç tüketimleri ölçülmüş, güç tüketim profilleri çıkarılmış ve ortalama güç tüketimleri saptanmıştır. Bu ortalama değerlerden yararlanılarak model doğrulama çalışmaları yapılmış ve tahmin edilen enerji miktarları kesim sırasında çekilen enerji dışında kalan bölgelerde tutarlılık göstermiştir (bkz. Şekil 2.5). Model vasıtasıyla tahmin edilen enerjiyle, deneysel olarak ölçülen enerji miktarında %5’lik bir oranda fark tespit edilmiştir. Ayrıca  $E_{temel}$ ’in tüketilen toplam enerjideki payı %72.86 olarak tespit edilmiştir ve bu sabit değer yüzdesinin etkisi modelin tutarlılık oranını arttıran bir unsurdur. Bu çalışmada iş parçasını işlemek için üretilecek farklı takım yollarının toplam enerji tüketimini nasıl etkilediğini gözlemlemek amacıyla testler yapılmıştır. Bu testler sonucunda takım yolu daha uzun kesimlerin daha fazla enerji tükettiği görülmüş bunun sebebi olarak da tezgahın temel enerji tüketiminin toplam enerji tüketimini domine etmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Tahmin edilen ve deneysel enerji tüketim eğrisi [27]

Uluer vd.[28] tornalama operasyonu ile bir parçayı ( $E_{parça}$ ) üretmek için harcanan enerjiyi modellerken, enerji tüketimini sistem düzeyinde inceleyip direkt ve dolaylı enerji olarak ikiye ayırmıştır. Dolaylı enerji ( $E_{dolaylı}$ ) fabrikada parçayı üretmek için elverişli ortam oluşturmak için harcanan enerji olarak tanımlanmıştır. Direkt enerji ise operasyon düzeyinde sarf edilen metal kesme ( $E_{teorik}$ ), yardımcı birimlerce tüketilen ( $E_{yar,sabit} + E_{yar,değişken}$ ) ve nakliye ( $E_{nakliye}$ ) için harcanan enerjiler olarak sınıflandırılmıştır. Çalışma dahilinde bir parçayı üretebilmek için gereken enerjiyi tahmin edebilmek için ortaya konan matematiksel model Denklem 2.22'de gösterilmiştir. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak yardımcı birimler tarafından harcanan enerji sabit ve değişken olarak ikiye ayrılmıştır ve buradaki sabit enerji tüketimi diğer modellerdeki temel enerji tüketimi olarak düşünülebilir.

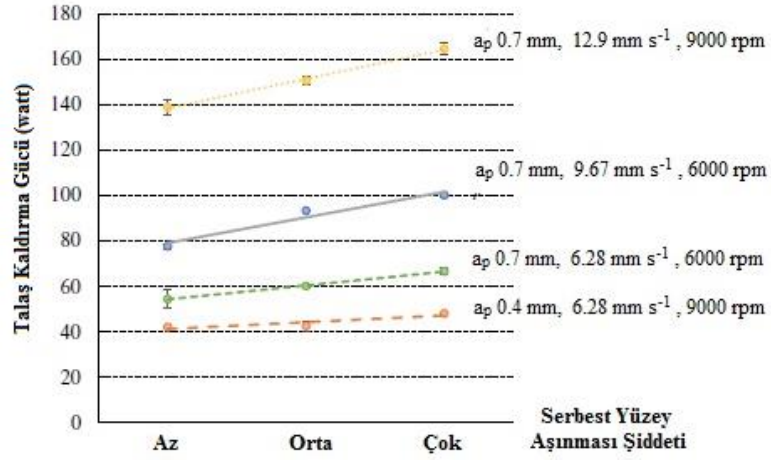
$$E_{parça} = E_{teorik} + E_{yar,sabit} + E_{yar,değişken} + E_{nakliye} + E_{dolaylı} \quad (2.22)$$

Uluer vd.[28] metal kesme enerjisini diğer modellerden farklı olarak özgül kesme enerjisini kaldırılan talaş hacmiyle çarpılarak elde etmiştir. Bu da unsur bazlı modellemeyle uyum sağlayacak bir model seçeneği sunmuştur. Fakat çalışmada yardımcı birimler tarafından harcanacak enerjinin hesaplanmasına dair detay verilmemiş ve  $E_{teorik}$  olarak tanımlanan metal kesme enerjisine yoğunlaşmıştır. Ayrıca deneysel çalışmalar yapıp modelleme doğrulanmamış sadece teorik olarak unsurların tornalanarak harcayacakları enerji miktarları tahmin edilmiştir. Fakat çalışmada Jeswiet ve Kara[29]'nın oluşturduğu modelden yararlanılarak yapılan tornalama işlemleri sonucu ortaya çıkacak tahmini karbon izi salınımı miktarlarının bulunabileceğini ortaya koymuşlardır. Jeswiet ve Kara[29]'nın yaptığı çalışmada karbon izi hesaplama yöntemi işlem için harcanan enerji miktarının, elektrik enerjisinin sağlandığı elektrik şebekesinin kullandığı birincil kaynakların oralarıyla elde edilen CES adı verilen bir sabitle çarpılmasıyla elde edilir. Her bir fosil kaynak için ortalama bir karbon salınım değeri vardır ve bu değer elektrik şebekesinin bu kaynağı kullanma oranıyla ve enerji dönüşüm oranıyla çarpılarak CES adı verilen bu sabit elde edilir. Karbon ayak izi hesaplama için önerilen bu yöntem literatürde yer alan çalışmalarda yaygın olarak kullanılmıştır.

## 2.2. Serbest Yüzey Aşınmasının Metal Kesme Enerjisine Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Talaşlı imalat boyunca kesici takım, yüksek temas gerilmelerine ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı bir ortamda çalışmaktadır. Bu yüzden takım yüzeylerinde aşınma gerçekleşmesi kaçınılmaz bir olaydır. Bir takım optimum kesme değerlerinde ve kesme sıvısıyla birlikte de çalışsa serbest yüzey aşınmasına maruz kalır ve zamanla aşınmaya bağlı takımın performansı azalır ve bir süre sonra takım kullanılmaz hale gelir. Serbest yüzey aşınması şiddeti kesme hızı ve kesme ortamı sıcaklığıyla doğru orantılıdır. Kesme hızı veya kesme ortamı sıcaklığı arttıkça daha şiddetli serbest yüzey aşınması gerçekleşir. Titreşim, talaşların yeniden kesilmesi, parça üzerinde çapak oluşumu ve zayıf yüzey kalitesi gibi etmenler serbest yüzey aşınmasının şiddetini arttırmakta ve kısa takım ömrüne neden olmaktadır. Serbest yüzey aşınması gerçekleşen takımlarda kesilecek yüzeyle olan mesafe arttığından metal kesmeye harcanacak kuvvet dolayısıyla metal kesme gücü artacağından metal kesme enerjisi de artmaktadır. Aşınma gerçekleşen takımlarda kesme gücü hesaplanırken genellikle takım aşınması düzeltme faktörü olarak 1,25 değeri kullanılır [10]. Literatürde de bu durumu destekleyen bir çok çalışma yapılmıştır.

Yoon vd.[30] kesici uç aşınmasının takım tezgahının enerji tüketimine etkisini araştırmak amacıyla yaptıkları çalışmada serbest yüzey aşınmasının artmasıyla birlikte talaş kaldırmak için çekilen güç miktarının da arttığı sonucuna varmışlardır. Şekil 2.6'da kesme parametrelerine bağlı olarak serbest yüzey aşınmasının talaş kaldırma gücüne etkisinin değiştiği görülmektedir. Deneysel çalışmalarla ayrıca tezgahın güç tüketim profili oluşturulmuş ve tezgahın çektiği gücün %49.3'ünün kesime hazır durumda beklerken çektiği güç olan temel tüketim olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.



Şekil 2.6. Serbest yüzey aşınma şiddetinin talaş kaldırma gücüne etkisi [29]

Yoon vd.[30] yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda elde ettikleri deneysel sabitlerle talaş kaldırmak için çekilen gücü hesaplama modeli ortaya koymuşlardır. Denklem 2.19 ve 2.20’de görüldüğü üzere model iş mili devri ( $n$ ), ilerleme hızı ( $f$ ) ve kesme derinliği ( $a_p$ ) parametrelerinin deneysel sabitlerle çarpılmasıyla elde edilen fonksiyonlardan oluşmaktadır. Modelde serbest yüzey aşınma miktarının zamana göre değişimi  $\overline{VB}(t)$  de etki ettirilmiştir.

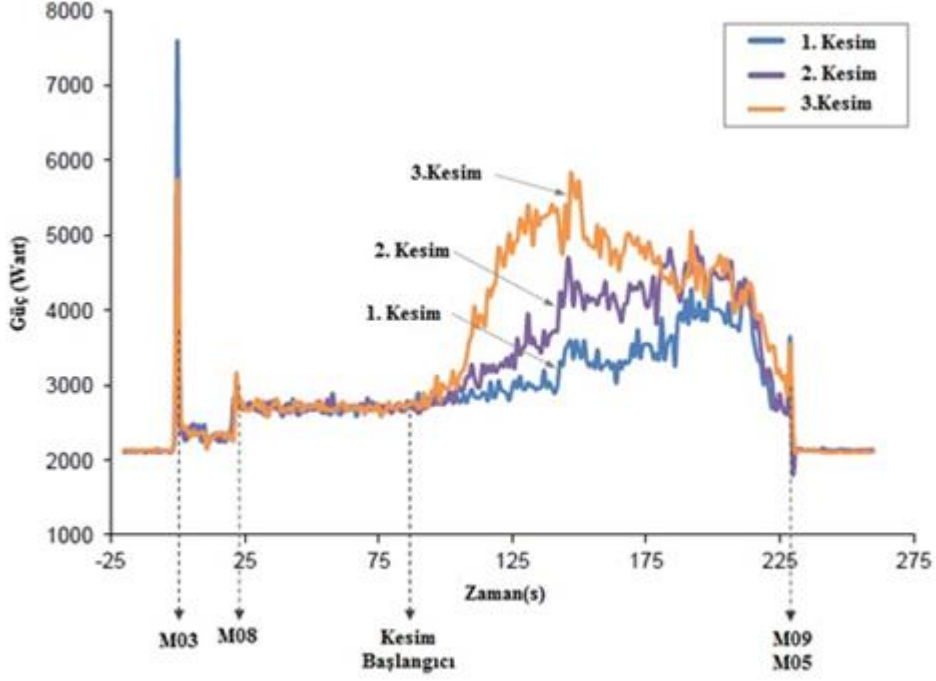
$$P_{metalkesme} = f_1(n, f, a_p) + f_2(n, f, a_p) \cdot \overline{VB}(t) \quad (2.19)$$

$$f_i(x_1, x_2, x_3) = \beta_{i0} + \beta_{i1}x_1 + \beta_{i2}x_2 + \beta_{i3}x_3 + \beta_{i4}x_1^2 + \beta_{i5}x_2^2 + \beta_{i6}x_3^2 + \beta_{i7}x_1x_2 + \beta_{i8}x_1x_3 + \beta_{i9}x_2x_3 \quad (2.20)$$

Aramcharoen ve Mativenga [27], oluşturdukları enerji tahmin modelinin kesim esnasında harcadığı enerjiyi tahmin konusunda aksaması üzerine kesici uç aşınmasının harcanan kesme enerjisine etkisini belirlemek amacıyla bir ek çalışma gerçekleştirilmiştir. Aynı kesme parametrelerine sahip operasyon aynı kesici takım ile üst üste üç kere yapılmıştır ve her seferinde kesim enerjisinin arttığı Şekil 2.7’de görüldüğü üzere gözlemlenmiştir. Takım aşınmasının takım iş parçası etkileşimini

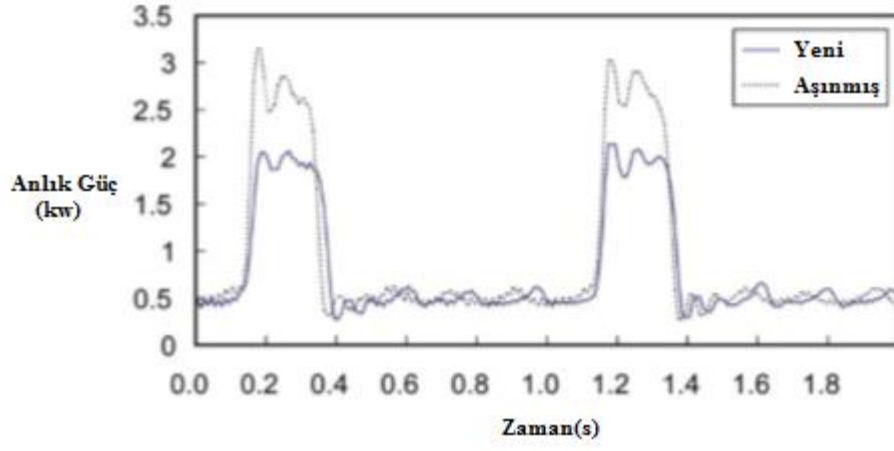


etkileyerek kesme kuvvetlerini arttırması sebebiyle bu güç artışına neden olması muhtemeldir.



Şekil 2.7. Serbest yüzey aşınmasının enerji tüketimine etkisi [27]

Shao vd.[31] kesme gücünden yararlanarak frezeleme operasyonlarındaki takım aşınmasının simülasyonunu gerçekleştirmeye çalıştığı çalışmada serbest yüzey aşınması arttıkça kesme gücünün arttığını gösteren grafikler elde etmiştir. Serbest yüzey aşınma genişliği 0,98 mm ve serbest yüzey aşınma uzunluğu 4 mm olan bir kesici takım ile hiç serbest yüzey aşınması olmayan tek kesme ağızına sahip karbür kesici takımla dökme demir malzeme üzerinde talaş kaldırılmış ve Şekil 2.8'de gösterilen Anlık Güç – Zaman grafiği elde edilmiştir.



Şekil 2.8. Frezeleme operasyonu esnasında aşınmış ve yeni kesici takıma ait Anlık Güç – Zaman grafiği [31]

### 3. UNSUR BAZLI ENERJİ TAHMİN MODELİ

#### 3.1. Unsur Bazlı Tasarım (UBT) ve ISO 10303 (STEP) Standardı

BDT paket programları vasıtasıyla mühendisler geometrik ve topolojik parça modellerini tasarlama olanağına sahiptirler. Fakat bu düşük seviyeli veri temsili parça modelini BDÜ ve BSD aşamalarında temsil etmek için yetersiz kalmaktadır. Yüksek seviyede veri aktarımını sağlamak için unsur bazlı tasarım geliştirilmiştir. Unsurlar sadece geometrik ve topolojik veri aktarımını değil; tolerans, malzeme özellikleri ve yüzey pürüzlülüğü gibi verileri de aktarabilme özelliğine sahiptir. Bir unsur, Unsur Bazlı Tasarım (UBT) ile veya Unsuru Tanıyarak Tasarım (UTT) olmak üzere iki farklı yöntemle oluşturulabilir. UBT'de boyut, tolerans ve malzeme özellikleri gibi veriler değişken olarak tutulur ve bu değişkenlerden yararlanılarak oluşturulmak istenen parçanın geometrisi oluşturulur. UBT, bağımsız formatta açık (*explicit*) ürün verisi oluşturarak parça modelini akış aşağı (*down stream*) uygulamalarda temsil yeteneği kazanır ve tasarım amacının daha iyi anlaşılmasına olanak sağlamış olur [32].

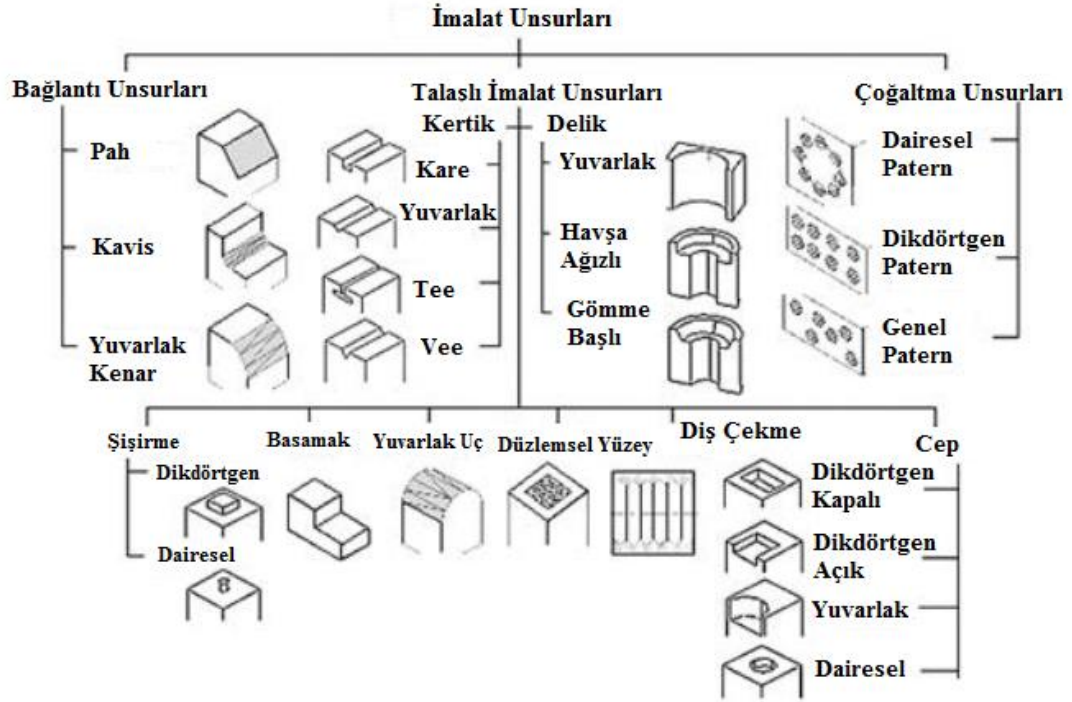
Üretim ve tasarım aşamalarında birçok sistem teknik ürün bilgisi yönetmekte kullanılmaktadır. Her sistemin kendine özgü bir veri formatı vardır ve bilgiyi bu formatla oluşturmaktadır. Bu da aynı bilginin birçok kez birçok farklı sisteme girilmesini gerektirir. Bu durum bilgi fazlalığına ve bilgi çokluğundan kaynaklanan hatalara yol açmaktadır. Ulusal Standart Enstitüsü, bu veri uyumsuzluğun üretim sektörü için 90 milyar dolarlık bir sorun olduğunu belirtmektedir [33]. Bu uyumsuzluğu çözmek amacıyla, veri değişimini sağlamak için standartlar ortaya konulmuştur. Fransa'da 'SET', Almanya'da 'VDAFS', Amerika'da 'IGES' formatları oluşturulmuştur. Daha sonra Uluslararası Standart Organizasyonu (ISO) altında birleşilerek ISO 10303 veya bilinen adıyla STEP (*Standard for the Exchange of Product Model Data*) ortaya konulmuştur.

STEP'in genel amacı ürünü yaşam döngüsü içerisinde herhangi bir sistemden bağımsız olarak tanımlayan bağımsız (nötral) bir mekanizma sağlayabilmektir. Bu da

sadece tarafsız dosya değişimine imkan tanımakla kalmayıp ayrıca ürün veri tabanlarının paylaşımı ve arşivleme işlemleri için bir temel oluşturmaktadır. STEP'in nihai hedefi, ürünün yaşam döngüsü içerisinde etkileşim içinde olduğu kaynaklara ulaşılabilir ve yararlı entegre ürün bilgisi veri tabanı oluşturmaktır [33].

STEP, her biri ayrı ayrı yayımlanan ve parçalardan oluşan serilerden oluşur. Uygulama protokolleri (UPler), tanım yöntemleri, entegre edilmiş kaynaklar, uygulama yorumlayıcı yapılar, soyut deney dizileri, gerçekleştirim yöntemi ve uyum testi gibi seriler STEP'in içinde yer alır ve her biri kendi içinde parçalardan oluşur. STEP AP224'de STEP'in içinde yer alan uygulama protokollerinden biridir ve işleme özellikleri kullanarak süreç planlama için mekanik ürün tanımlama bilgilerini içerir. STEP AP224'ün sağladığı bir parçayı üretmek için gerekli bilgilerden bazıları şunlardır; işleme özelliklerini göstermek için gerekli sınır gösterimi formatındaki geometrik ve topolojik unsurlar, işleme özelliklerinin kesin, açık (*explicit*) gösterimleri, işleme özelliklerinin gerekli ölçüsel ve geometrik toleranslarını içeren bilgiler, malzemeyi, sertlik değerini, yüzey kalitesini ve diğer teknolojik bilgileri içeren bilgiler.

STEP AP224'de imalat unsuru, işlenecek malzemeden talaşlı imalat işlemleriyle kaldırılacak hacmi temsil edilen şekiller olarak tanımlanmıştır. STEP AP224 kütüphanesinde imalat unsurları Şekil 3.1'deki gibi bağlantı, talaşlı imalat ve çoğaltma unsurları olarak üç ana grupta tanımlanmıştır [34]. STEP standardının parçayı üretim döngüsünün bütün aşamalarında tek formatta temsil etme gayesi BDT/BDÜ paket programı şirketleri üzerinde de sonuç göstermiştir. Çoğu şirket kendi programlarında oluşturulan parça bilgisinin yalnız kendi veri formatlarında değil STEP formatında da kaydedilmesine olanak sağlayacak eklentiler yapmış ve kullanıcılara bu imkanı sağlamıştır. Önümüzdeki yıllarda STEP formatının daha da yaygın olarak kullanılması beklenmektedir. Bu çalışmada da STEP unsurları üzerinden bir enerji tahmin modeli ortaya konmuştur ve modeldeki metal kesme enerjisi hesabı STEP unsurlarının parametreleri üzerinden hesaplanacak unsur hacmine dayandırılmıştır.



Şekil 3.1. STEP AP 224’de tanımlanan imalat unsurları [34]

### 3.2. Unsur Bazlı Enerji Tahmin Modeli

Bir parçayı talaşlı imalat işlemleriyle üretmek için harcanan enerji ( $E_{parça}$ ), parça üzerinde talaşlı imalat işlemiyle oluşturulacak unsurların her biri için harcanan enerji ( $E_{unsur}$ ) toplanarak bulunabilir (Denklem 3.1).

$$E_{parça} = \sum_{i=0}^n E_{unsur,i} \quad (3.1)$$

Bir unsuru işlemek için takım tezgahlarının harcadığı enerji Denklem 3.2’de olduğu gibi tezgahın kesime hazır durumda beklerken harcadığı temel enerji tüketimi ( $E_{temel}$ ), kesme işleminin gerçekleşmesinde doğrudan rol oynamasa da kesme işleminin gerçekleşmesi veya kesme işleminin iyileştirilmesi için alt birimler tarafından sarf edilen yardımcı enerji tüketimi ( $E_{yardımcı}$ ) ve iş parçasıyla kesici takımın etkileşimi sonucu harcanan metal kesmeye harcanan enerji tüketimi ( $E_{metalkesme}$ ) olarak üçe ayrılabilir.

$$E_{unsur} = E_{temel} + E_{yardımcı} + E_{metalkesme} \quad (3.2)$$

Temel enerji tüketimi toplamı Denklem 3.3’de görüldüğü üzere tezgahın bilgisayar ünitesinin harcadığı enerji ( $E_{bilg}$ ), tezgahın aydınlatma amaçlı kullandığı enerji ( $E_{ayd}$ ), ilerleme eksenlerini kilitlemek için servo motorlar tarafından harcanan enerji ( $E_{servo}$ ) gibi sabit enerji kalemleri ve elektronik üniteyi soğutmak için harcanan enerji ( $E_{soğ(el.ünite)}$ ), ortam sıcaklığının uygun olmadığını algıladığında devreye giren soğutucunun harcadığı enerji ( $E_{soğ(ortam)}$ ) ve kızak yağlama ünitesi tarafından harcanan enerji ( $E_{kızak yağ}$ ) gibi ortam veya operasyon şartlarına göre değişebilen enerji kalemlerinden oluşmaktadır. Burada soğutma ünitelerinin harcadığı enerji tek bir kalem olarak da gösterilebilir; fakat gelişmiş tezgahlarda bu ayrımın gerekliliği kaçınılmazdır.  $E_{temel}$  her tezgah için, Denklem 3.4’deki gibi tezgah boşta çalışırken anlık güç değerlerinin güç ölçer yardımıyla kaydedilmesi ve ortalama bir güç değerinin belirlenerek ( $P_{temel,ort}$ ) operasyon süresiyle ( $t_{operasyon}$ ) çarpılmasıyla bulunabilir.

$$E_{temel} = E_{bilg} + E_{ayd} + E_{soğ(el.ünite)} + E_{soğ(ortam)} + E_{kızakyağ} + E_{servo} \quad (3.3)$$

$$E_{temel} = P_{temel,ort} \cdot t_{operasyon} \quad (3.4)$$

### 3.2.1. Yardımcı Enerji Tüketimi Tahmin Modeli

Yardımcı enerji tüketimi metal kesme işlemi esnasında devrede olan alt birimler tarafından harcanan enerji miktarıdır ve Denklem 3.5’te olduğu gibi hesaplanabilir. İş milinin yüksüz durumdayken belli bir devirde dönmesiyle iş mili motorundan çekilen ortalama güç ( $P_{iş mili,ort}$ ) ile iş milinin çalıştığı süre ( $t_{metalkesme}$ ) çarpılarak Denklem 3.5’teki gibi  $E_{iş mili}$  hesaplanabilir.

$$E_{yardımcı} = E_{iş mili} + E_{ilerleme} + E_{kesmesivisi} + E_{OTD} + E_{talaş kon} \quad (3.5)$$

$$E_{iş mili} = P_{iş mili,ort} \cdot t_{metalkesme} \quad (3.6)$$

Metal kesme işlemi gerçekleşirken tezgahın eksenleri vasıtasıyla yaptığı ilerleme hareketi için harcanan enerji ( $E_{ilerleme}$ ), deneysel çalışmalarla ilgili eksenlerde belirli ilerleme değerleri için çekilen ortalama güç değerleri ( $P_{ilerleme,eksen-a,ort}$ ) hesaplanarak o ekseninde gerçekleşen ilerleme hareketinin süresiyle ( $t_{ilerleme,eksen-a}$ ) çarpılarak hesaplanabilir (Denklem 3.7). Kesme sıvısının metal kesme ortamına gönderildiği durumlarda ise kesme sıvısını ortama göndermek için çekilen ortalama güç ( $P_{kesmesivisi,ort}$ ) ile kesme sıvısı gönderilme süresi ( $t_{kesmesivisi}$ ) çarpılarak kesme sıvısını kesme ortamına göndermek için harcanan enerji ( $E_{kesme sivisi}$ ) hesaplanabilir (Denklem 3.8).

$$E_{ilerleme} = \sum_{a=0}^n P_{ilerleme,eksen-a,ort} \cdot t_{ilerleme,eksen-a} \quad (3.7)$$

$$E_{kesmesivisi} = P_{kesmesivisi,ort} \cdot t_{kesmesivisi} \quad (3.8)$$

Parça üzerindeki unsurları işlerken birden fazla kesici takım kullanılıyorsa veya operasyon süresinde takım ömrünün dolması sebebiyle kesici uçların değişmesi gerekiyorsa OTD (Otomatik Takım Değiştirici) tarafından harcanan takım değiştirme enerjisi ( $E_{OTD}$ ) de hesaba katılmalıdır. Takım değiştirme enerjisi takım başına harcanan ortalama takım değiştirme gücüyle, takım değiştirme süresi ve takım değiştirme sayısı çarpılarak Denklem 3.9'da olduğu gibi bulunabilir. Burada takım değiştirme sayısı parçayı işlemek için yazılan NC kod üzerindeki M06 (takım değiştirme) kodlarından ve/veya toplam operasyon süresinin kullanılan kesici takımın takım ömrüne bölünmesiyle bulunabilir. Ayrıca talaş konveyörünün aktif olduğu süre ( $t_{talaş konveyörü}$ ) ile talaş konveyörünün çektiği anlık ortalama güç ( $P_{talaş konveyörü,ort}$ ) çarpılarak işlem süresince talaş konveyörünün harcadığı enerji hesaplanabilir ( $E_{talaş kon}$ ) (Denklem 3.10).

$$E_{OTD} = P_{OTD,ort} \cdot t_{tak-değ} \cdot n_{tak} \quad (3.9)$$

$$E_{talaş kon} = P_{talaş konveyörü,ort} \cdot t_{talaş konveyörü} \quad (3.10)$$

### 3.2.2. Metal Kesme Enerjisi Tüketimi Tahmin Modeli

Metal kesmek için harcanan enerji ( $E_{metalkesme}$ ), frezeleme operasyonu için talaş debisiyle ( $Q$ ) özgül kesme enerjisi ( $k_c$ ) çarpımının metal kesme süresiyle ( $t_{metalkesme}$ ) çarpılmasıyla elde edilen değer makine verimlilik oranına ( $\eta$ ) bölünmesiyle hesaplanabilir (Denklem 3.11).

$$E_{metalkesme} = \frac{(k_c \cdot Q) t_{metalkesme}}{\eta} \quad (3.11)$$

Frezeleme operasyonunda talaş debisi ( $Q$ ), kesme genişliği ( $a_e$ ), kesme derinliği ( $a_p$ ) ve ilerleme hızına ( $V_f$ ) bağlı olarak değişir ve Denklem 3.12 yardımıyla hesaplanabilir [35,36]. İlerleme hızı ( $V_f$ ) da Denklem 3.13'te görüldüğü üzere diş başına ilerleme ( $f_z$ ), diş sayısı ( $z$ ) ve iş mili devir değerinin ( $n$ ) çarpılmasıyla bulunur [35,36]. Şekil 3.2'de frezeleme operasyonundaki kesme parametreleri gösterilmiştir. Denklem 3.14'te görüldüğü üzere metal kesme için harcanan süre ( $t_{metalkesme}$ ) ilerleme hızı ( $V_f$ ) ile parçayı işlemek için izlenen takım yolunun uzunluğunun ( $l_f$ ) bölümüne eşittir [10,37].

$$Q = a_e \cdot a_p \cdot V_f \quad (3.12)$$

$$V_f = f_z \cdot z \cdot n \quad (3.13)$$

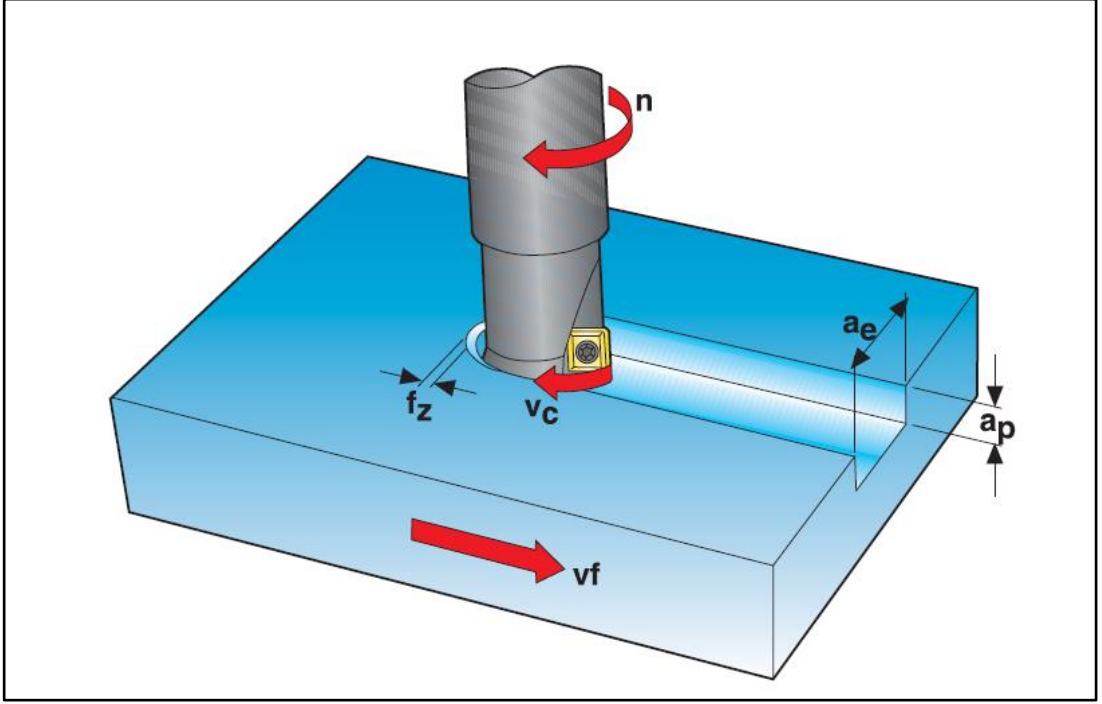
$$t_{metalkesme} = \frac{V_f}{l_f} \quad (3.14)$$

$E_{metalkesme}$ , ayrıca, frezeleme operasyonunda işlenecek unsurun hacmi ( $V_{unsur}$ ) ile özgül kesme enerjisinin ( $k_c$ ) çarpımının makine verimlilik oranına ( $\eta$ ) bölünmesiyle de Denklem 3.15'de olduğu gibi bulunabilir. Bu denklemi kullanarak doğrudan unsur hacmi bilgisini kullanarak metal kesme süresinden bağımsız bir metal kesme enerjisi modeli oluşturulmuş olur. Burada frezeleme işlemini gerçekleştirmek için oluşturulan takım yolu unsur hacmini ne kadar iyi temsil ediyorsa talaş debisi



kullanılarak hesaplamaya dayanan denklemle (Denklem 3.11) o kadar uyumlu sonuçlar elde edilebilir.

$$E_{metalkesme} = \frac{k_c \cdot V_{unsur}}{\eta} \quad (3.15)$$



Şekil 3.2. Frezeleme operasyonu kesme parametreleri [35]

Özgül kesme enerjisi ( $k_c$ ) Denklem 3.15’de olduğu gibi hesaplanmaktadır. Burada  $k_{c1,1}$  ve  $mc$  işlenecek malzemeye göre değişen sabitlerdir.  $k_{c1,1}$  malzemenin  $1 \text{ mm}^3$ ’ünü kaldırmak için harcanan enerji miktarı,  $mc$  malzeme katsayısıdır.  $\gamma_0$  ise efektif küreme açısı olup kesici takımın küreme açısı ile kesici ucun küreme açısının toplamına eşittir.  $h_m$  ortalama talaş kalınlığı olup daha çok kesme parametrelerine göre değişmektedir ve Denklem 3.17’deki gibi hesaplanmaktadır [35].

$$k_c = \frac{1-0.01 \cdot \gamma_0}{h_m^{mc}} k_{c1,1} \quad (3.16)$$

$$h_m = \frac{360 \cdot f_z \cdot a_e}{\pi \cdot D_c \cdot \varphi_s} \sin K \quad (3.17)$$

Denklem 3.16'daki  $f_z$  ağız başına ilerleme değerini,  $a_e$  kesme genişliğini,  $D_c$  kesici takım çapını,  $\varphi_s$  kesme açısını ve  $K$  ayar açısını ifade etmektedir. Kesme açısı, kesici freze takımı merkezi konumda olduğunda Denklem 3.18 ile merkez dışındaki bir konumda olduğunda ise Denklem 3.19 kullanılarak hesaplanmaktadır [35].

$$\varphi_s = 2 \cdot \sin^{-1} \frac{a_e}{D_c} \quad (3.18)$$

$$\varphi_s = 90 + \sin^{-1} \frac{a_e - (D_c/2)}{(D_c/2)} \quad (3.19)$$

## 4. BSD TEZGAHININ ENERJİ KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

Enerji tahmin modeli doğrulama çalışmalarını gerçekleştirmek için önce modelin test edileceği BSD tezgahının enerji karakterizasyon çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Enerji karakterizasyon çalışmaları çerçevesinde tezgahın temel ve yardımcı enerji tüketiminin karakterini ortaya koyacak testler yapılmıştır.

### 4.1. BSD Tezgahı Özellikleri

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Teknoloji Merkezi İleri İmalat Laboratuvarı'nda bulunan DMG firması yapımı DMU 65 monoBLOCK 5-Eksenli BSD dik işleme merkezi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1'de bu tezgahın önden görünümü yer almaktadır.



Şekil 4.1. DMG DMU 65 monoBLOCK tezgahı [38]

DMU 65 monoBLOCK tezgahı, sınıfında ön plana çıkan tezgahlardan olup tezgah üreticilerinin ulaştığı son teknolojiyi temsil eden kompleks bir frezeleme tezgahıdır. Tezgah X, Y ve Z eksenlerindeki hareketi iş milinin de yer aldığı kafa denilen bölümden alır. A ve C eksenlerindeki hareketi ise açılı döner tabla vasıtasıyla kazanır. Tezgah A ekseninde  $\pm 120^\circ$ , C ekseninde ise  $360^\circ$  dönme kabiliyetine sahiptir. Tüm eksenlerde cetveli ölçme sistemi bulunduran tezgah, yuvarlaklık, düzlük, dairesel şekil hassasiyeti ve yüzey kalitesi konusunda son derece yüksek hassasiyetle parça üretimi sağlamaktadır. Tezgahın Z eksenini içten soğutmalıdır ve X ve Z eksenini motorlarına ait harici soğutma sistemi bulunmaktadır. Tezgaha ait diğer teknik özellikler Çizelge 4.1’de belirtilmiştir.

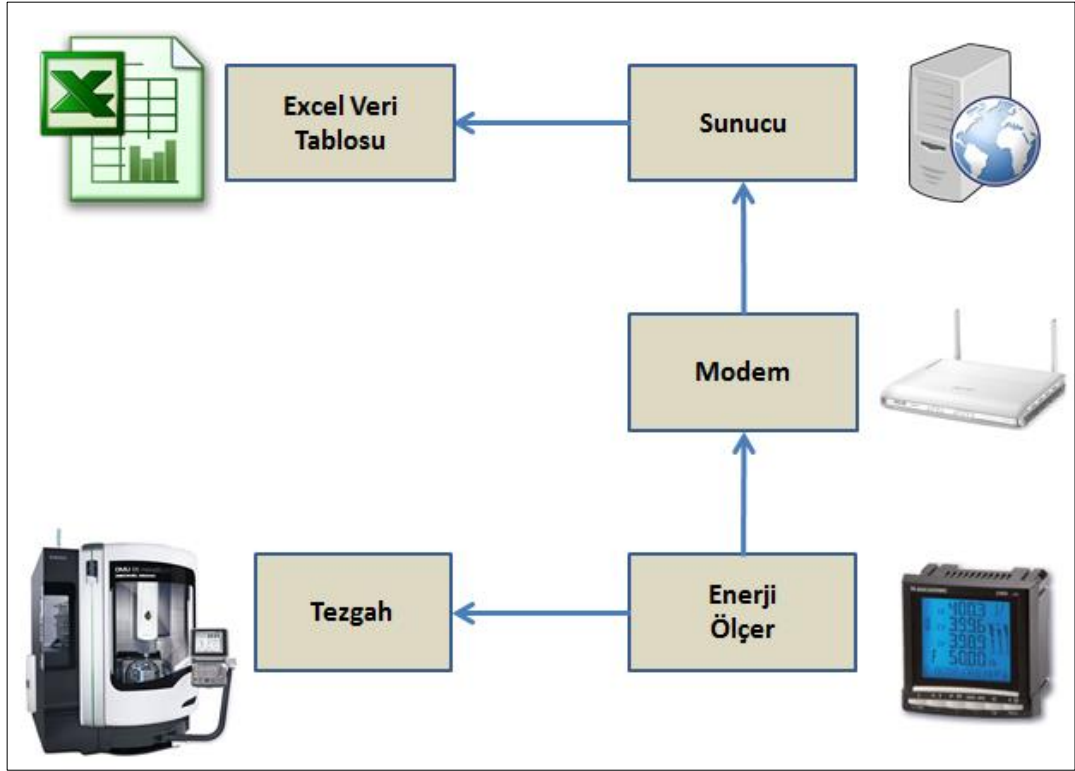
Çizelge 4.1. DMU 65 monoBLOCK tezgahı teknik özellikleri [38]

Çalışma Alanı	Birim	Boyut
X-/Y-/Z- Ekseni	mm	650 / 650 / 560
Tabla	Birim	Tabla Boyutu(UxG)
Sağlam Tabla	mm	1000 x 650
Açılı Döner Tabla	mm	Ø 650
Ana Sürücü	Birim	Değer
Hız	dev/dak (RPM)	18000
Tork(S6)	N.m	119
Performans(S6)	kW	35
Lineer Eksenler(X/Y/Z)	Birim	Değer
İlerleme Hızı	mm/dak	40000
Hızlanma	mm/s <sup>2</sup>	6
İlerleme Gücü(X/Y/Z)	kN	7/13/10
Kızaklar(X/Y/Z)	mm	45
Vidalı Miller(X/Y/Z)	mm	40/50/50
Takım Değiştirici	Özellik	
Takım Tutucu	SK40	
Takım Magazini	30 Takım Kapasiteli	
Kontrol Ünitesi	Heidenhain iTNC 530	

## 4.2. Enerji Ölçüm Yöntemi

Tezgahın enerji karakterizasyonu çalışmaları dahilinde tezgahın çektiği anlık güç bilgilerini okumak amacıyla Socomec DIRIS A40 markalı çok fonksiyonlu bir enerji metre kullanılmıştır. Enerji metre, üzerinde bulunan LCD ekran vasıtasıyla çekilen anlık güç, tüketilen toplam enerji, gerilim değeri vb. bilgileri kullanıcıya sağlayabilmektedir. Enerji ölçerin örnekleme süresi 1 saniyedir, saniyede bir kere aldığı verileri güncellemektedir. Opsiyon olarak sunulan ethernet bağlantısı vasıtasıyla modemden enerji metre üzerinde elle girilebilen bir IP adresi alınarak sunucuya bilgi aktarımı sağlanabilmektedir. Enerji metre üzerinden IP adresi verilirken sunucunun bulunduğu subnet ile uygun/uyumlu olup olmadığı göz önüne alınmalıdır. Bu bağlantı sağlandıktan sonra sunucu üzerinden çevrim içi veri takibi sağlanmaktadır. Bu doğrultuda enerji metreye ‘10.20.29.209’ IP numarası girilmiştir. Verilerin saklanması için ise ölçümlerin alınacağı bilgisayara ‘Wamp Server’ isimli Wamp sunucusu kurulmuştur.

Bir metal kesme işlemi boyunca çekilen anlık güç ve zaman bilgilerini excel dosyasına aktarmak için öncelikle kurulumun yapıldığı bilgisayarda bir internet tarayıcısında <http://localhost/phpmyadmin> adresi girilerek sunucu ara yüzüne kullanıcı girişi yapılmıştır. Kullanıcı girişi yapıldıktan sonra tezgahtan anlık güç – zaman verilerini almayı sağlayan kodu (bkz. EK 1) çalıştırmak amacıyla tarayıcıda yeni sekme açılarak buraya <http://localhost/ecoman> yazılır ve böylece tezgahtan çekilen anlık güç değerleri sunucu üzerinde satırlar halinde saklanır. İlgili sekme kapatıldığında ise veri saklama işlemi durdurulur ve biriken veriler sunucu üzerinde saklanmaya devam eder. Saklanan veriler sunucu ara yüzü üzerinden öncelikle ‘Dışa Aktar’ seçilerek daha sonra ‘CSV for MS Excel’ dosya formatı seçilerek kaydedilir. Böylelikle tezgahın çektiği anlık güç değerleri bir excel dosyasına aktarılmış olur. Veriler kaydedildikten sonra sunucu üzerinden temizlenmek istenirse sunucu arayüzünden ‘Verileri Boşalt’ seçilerek temizlenir [39]. Şekil 4.2’de tezgahtan alınan verilerin excel dosya formatına aktarımına kadar geçtiği aşamalar şematik olarak gösterilmiştir.



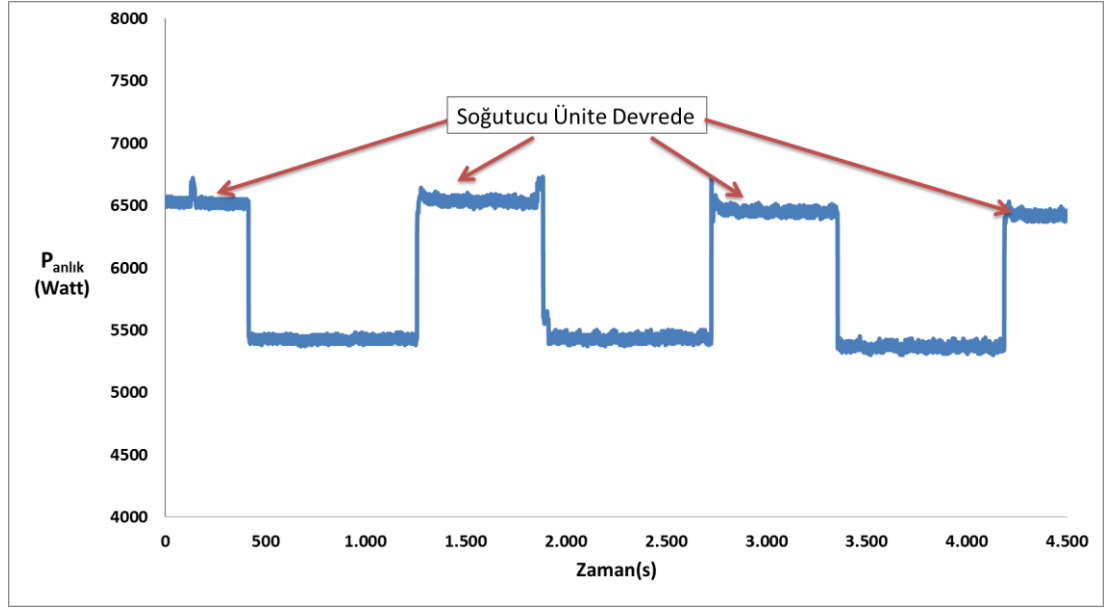
Şekil 4.2. Enerji ölçüm yöntemi şematik gösterimi

### 4.3. Temel Enerji Ölçme İşlemleri

Temel enerji, tezgahın frezeleme veya bir başka talaşlı imalat işlemine hazır durumda beklerken tükettiği enerjidir. Bu enerjiyi DMU 65 monoBLOCK tezgahı için 3. Bölüm’de verilen Denklem 3.4 ile ifade edebilmek amacıyla tezgahın kesime hazır durumdayken çektiği ortalama anlık güç değerinin ( $P_{temel,ort}$ ) saptanması gerekmektedir. Daha sonra saptanan bu değer ile operasyon süresi çarpılarak tezgahın ilgili operasyon için ne kadar temel enerji tükettiği belirlenebilecektir. Bu amaçla tezgah boşta çalışırken enerji ölçer vasıtasıyla ölçümler alınmıştır ve alınan veriler ile oluşturulan Anlık Güç – Zaman grafiği Şekil 4.3’de gösterilmiştir.

Şekil 4.3’te görüldüğü üzere tezgah boşta çalışırken iki farklı ortalama değerde anlık güç çekmektedir. Tezgah üreticisiyle iletişime geçilerek ve testler esnasında yapılan gözlemlerle bu durumun soğutucu ünitenin çalışmasından kaynaklı olduğu tespit

edilmiştir. Tezgahın boştaiken iki farklı ortalama değerde anlık güç çekmesi, çekilen güç değerlerinin periyotlarının belirlenerek; bu periyotların gerçekleşme oranına göre bir ortalama değer belirlenmesinin daha sağlıklı olacağı kanısına yol açmıştır.



Şekil 4.3. Temel enerji tüketim testi Anlık Güç – Zaman grafiği

Temel enerji testi verilerinden yararlanarak soğutucu ünitenin ortalama olarak 736 saniye devrede kaldığı saptanmış ve bu süre boyunca tezgahın çektiği ortalama anlık temel güç değeri 6508 watt olarak hesaplanmıştır. Aynı grafikten soğutucu ünitenin tekrar devreye girme süresi ise ortalama olarak 965 saniye olarak tespit edilmiştir ve bu süre zarfında tezgahın çektiği ortalama anlık güç değeri 5407 watt olarak hesaplanmıştır. Bu iki bulgudan yola çıkarak 1701 saniye sürecek bir operasyon için çekilen ortalama anlık güç değerinin 5883 watt olacağı sonucuna varılmıştır. Tez kapsamında yapılacak enerji tahmin modelinin deneysel doğrulama çalışmalarında da ortalama anlık temel güç ( $P_{temel,ort}$ ) değeri olarak 5883 watt değeri kullanılacaktır. Bu ortalama yaklaşımı özellikle 1701 saniyeden kısa sürecek operasyonlarda enerji modeli tahminlerinin tutarlılığında sıkıntı yaratabilir; fakat soğutucu ünitenin devrede olduğu ve olmadığı zaman periyotlarının arasında gerçekleşen operasyonlarda daha tutarlı tahminlerin yapılmasını sağlayacaktır. Bir

diğer sıkıntı da soğutucu ünitenin her zaman belirli zaman aralıklarıyla devreye girmemesidir. Temel enerji tüketimini belirlemek amacıyla yapılan testlerde her zaman Şekil 4.3'te olduğu gibi tutarlı grafikler elde edilmemiştir. Bunun olası sebebi olarak tezgahın kesmeye hazır beklerken belirli aralıklarla soğutucu üniteyi devreye aldığı fakat kesme gerçekleştiği zamanlarda elektronik kart ünitesinde ve iş milinde gerçekleşen ısınmadan dolayı soğutucu ünitenin daha sık aralıklarla devreye giriyor olabileceği gösterilebilir.

#### **4.4. Yardımcı Enerji Ölçme İşlemleri**

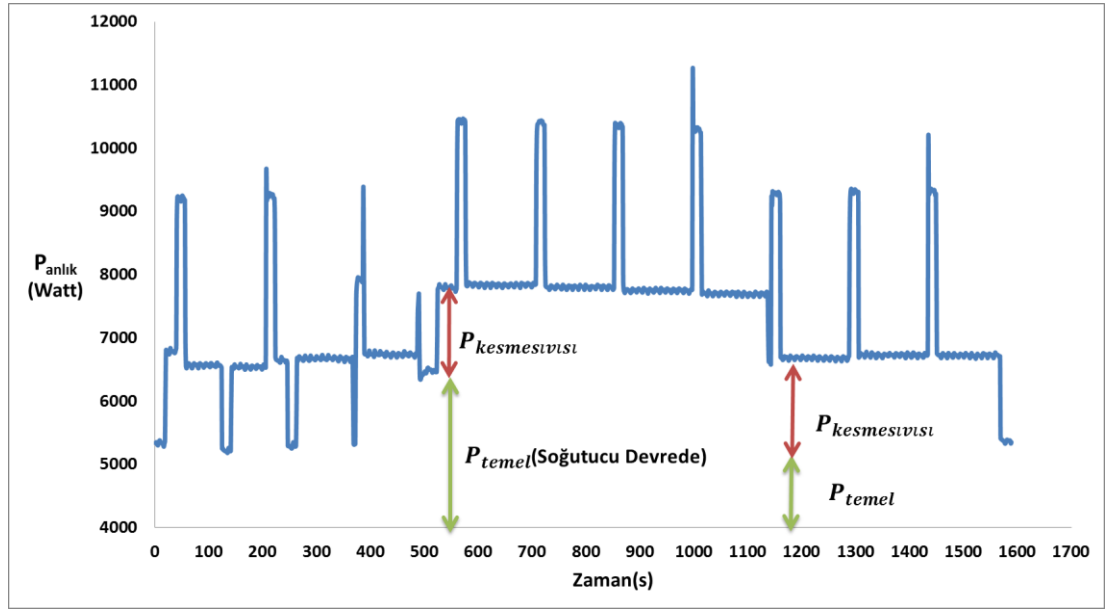
##### **4.4.1. Kesme Sıvısı Ünitesi Enerji Tüketimi Ölçme İşlemleri**

Metal kesme işlemlerinde ortamdan ısıyı uzaklaştırmak ve sürtünmeyi azaltmak amacıyla genelde kesme ortamına kesme sıvısı gönderilir. Kesme sıvısını kesme ortamına göndermek için harcanan enerjiyi tespit etmek ve DMU 65 monoBLOCK tezgahı için ortalama anlık kesme sıvısı gücünü ( $P_{kesmesıvısı,ort}$ ) tespit etmek amacıyla yapılan test sonucu elde edilen Anlık Güç – Zaman grafiği Şekil 4.4'te verilmiştir.

Şekil 4.4'te verilen grafiği elde etmek amacıyla tezgah kesme hazır durumdayken 'Kesme Sıvısını Aç' komutu aktif edilerek ortama kesme sıvısı verilmesi sağlanmış ve enerji metre yardımıyla işlem süresince anlık güç değerleri kaydedilmiştir. Testin ilk basamaklarında 90 saniyede bir 'Kesme Sıvısını Kapat' komutu aktif edilerek 10 saniyelik aralıklarla anlık temel güç değerleri tespit edilmiştir ve grafikte görüldüğü üzere testin ilerleyen zamanlarında anlık temel güç tüketimi soğutucu ünitenin devreye girmesi sebebiyle artış göstermiştir. Ayrıca kesme sıvısının ortama verildiği süre zarfında yaklaşık olarak her 150 saniyede bir düzenli olarak 20 saniye boyunca güç tüketiminde bir artış gözlemlenmiştir. Bu artışın kesme sıvısı deposundaki suyun ana kesme sıvısı deposundan takviyesi için harcanan enerji olabileceği öngörülmüştür. Yapılan test sonucu elde edilen verilerle soğutucu ünitenin devrede olduğu kısım dikkate alınarak ortalama anlık temel güç tüketim değeri 6458 watt, kesme sıvısı ünitesinin devrede olduğu 150 saniyelik periyotlarda çekilen ortalama



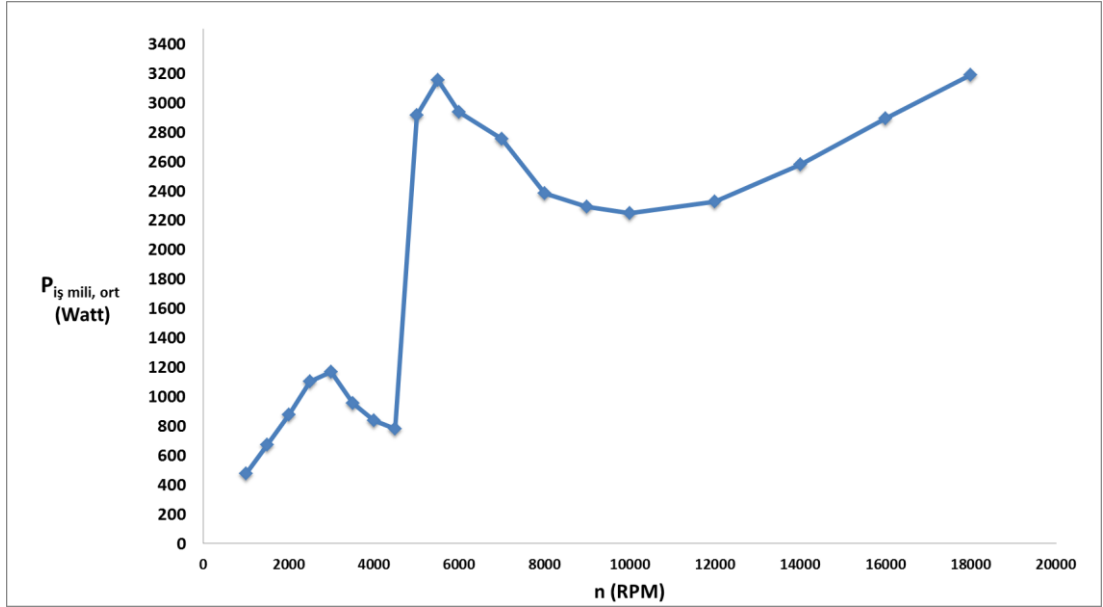
anlık güç değeri 7797 watt, 20 saniyelik devir daim periyotlarında çekilen ortalama anlık güç değeri ise 10239 watt olarak ölçülmüştür. Bu değerlerden yola çıkarak 170 saniye çalışan kesme sıvısı ünitesi için ortalama anlık güç değeri ( $P_{kesmesivisi,ort}$ ) 1628 watt olarak hesaplanmıştır ve enerji tahmin modeli doğrulama çalışmalarında bu değer kullanılacaktır.



Şekil 4.4. Kesme sıvısı ünitesi enerji tüketim testi Anlık Güç – Zaman grafiği

#### 4.4.2. İş Mili Enerji Tüketimi Ölçümleri

İş mili enerji tüketimini belirlemek amacıyla metal kesme hazır durumdaki tezgah üzerinde iş mili belirli devirlerle çalıştırılarak bu devirlerde çekilen ortalama anlık güç değerleri hesaplanmış ve bu değerlerden yararlanarak Ortalama Anlık Güç – Devir grafiği elde edilmiştir. Şekil 4.5'te elde edilen grafik yer almaktadır. Çizelge 4.2'de her bir iş mili devir değeri için hesaplanan ortalama iş mili anlık güç değeri ( $P_{iş\ mili,ort}$ ) bulunmaktadır. Tez kapsamında yapılan enerji tahmin modeli doğrulama çalışmalarında bu değerler kullanılacaktır. Örneğin tezgah üzerinde 8000 RPM iş mili devir değerinde bir metal kesme operasyonu gerçekleştiriliyorsa  $P_{iş\ mili,ort}$  değeri Çizelge 4.2'den yararlanılarak 2381 watt olarak kullanılacaktır.



Şekil 4.5. İş mili enerji tüketimi testi iş mili Ortalama Anlık Güç – Devir grafiği

Çizelge 4.2. İş Mili Devir değeri – Ortalama Anlık Güç değeri çizelgesi

n (RPM)	P <sub>iş mili, ort</sub> (Watt)	n (RPM)	P <sub>iş mili, ort</sub> (Watt)
1000	477	6000	2937
1500	672	7000	2753
2000	878	8000	2381
2500	1104	9000	2292
3000	1167	10000	2247
3500	956	12000	2324
4000	835	14000	2578
4500	782	16000	2892
5000	2915	18000	3186
5500	3152		

Şekil 4.5'te ve Çizelge 4.2'de görüldüğü üzere DMU 65 monoBLOCK tezgahının sahip olduğu iş mili, belirli devir aralıklarında farklı karakterlerde davranmaktadır. Bu yüzden beş ana iş mili devir aralığı belirlenmiş ve bu aralıkların her biri için ayrı grafikler elde edilerek regresyon analiziyle iş milinin bu aralıktaki anlık ortalama güç

değerini hesaplayan denklemler elde edilmiştir. Böylelikle bu denklemler kullanılarak testi yapılmayan ara iş mili devir değerlerinde çalışılıyorsa  $P_{i\text{ş mili,ort}}$  değerleri hesaplanabilecektir. Denklem 4.1-4.5'te sırasıyla 1000-3000, 3000-4500, 4500-5500, 5500-10000, 10000-18000 RPM değer aralıkları için elde edilen regresyon denklemleri verilmiştir.

$$P_{i\text{ş mili,ort}} = 0,3626n + 134,41 \quad 1000 \leq n \leq 3000 \quad (4.1)$$

$$P_{i\text{ş mili,ort}} = -0,1741n + 1554,2 \quad 3000 \leq n \leq 4500 \quad (4.2)$$

$$P_{i\text{ş mili,ort}} = 2,3706n - 9569,6 \quad 4500 \leq n \leq 5500 \quad (4.3)$$

$$P_{i\text{ş mili,ort}} = -0,2074n + 4199,6 \quad 5500 \leq n \leq 10000 \quad (4.4)$$

$$P_{i\text{ş mili,ort}} = 0,1223n + 933,72 \quad 10000 \leq n \leq 18000 \quad (4.5)$$

#### 4.4.3. İlerleme Eksenleri Enerji Tüketimi Ölçümleri

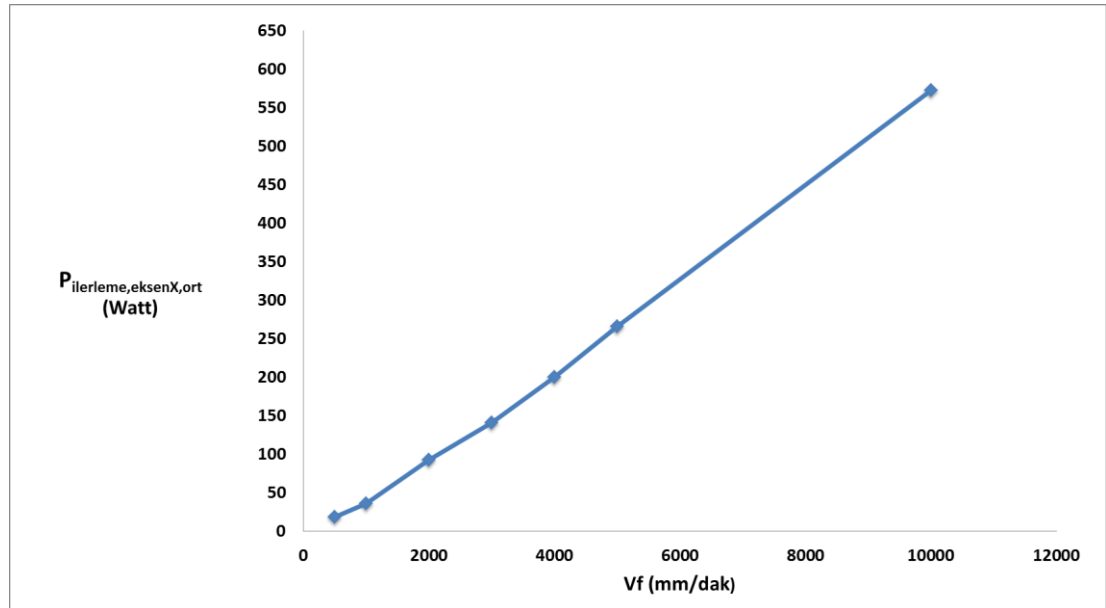
İlerleme eksenlerinin harcadığı enerji tüketimini belirlemek amacıyla belirli ilerleme değerlerinde X, Y ve Z eksenlerinde hareket edilerek anlık güç değerleri enerji metre vasıtasıyla kaydedilmiştir. Eksenler yüksüz durumda belirli ilerleme değeriyle hareket ederken anlık güç tüketim değerlerinden temel güç tüketim değerleri çıkartılarak ilgili ilerleme değeri için ortalama anlık ilerleme güçleri ( $P_{ilerleme,eksen-a}$ ) hesaplanmıştır. Testlerde X+ ile X- yönündeki eksen hareketleri arasında ve Y+ ile Y- yönündeki eksen hareketleri arasında çok fazla güç farkı olmadığı için X ve Y eksenleri için birer tane Ortalama Anlık Güç – İlerleme Hızı grafiği çizdirilmiştir. Fakat Z+ ve Z- eksenleri için ayrı ayrı Ortalama Anlık Güç – İlerleme Hızı grafiği çizdirilmiştir. Burada Z- eksenini yönünde hareket edilirken yer çekimi kuvvetinin etkisiyle tezgah anlık temel güçten daha az güç kullandığından Z- eksenini ortalama güç tüketimi ile Z+ eksenini ortalama güç tüketimi arasında büyük fark oluşmaktadır. Bu yüzden ayrı ayrı incelenmeleri gerekmektedir.

X+ ve X- ekseninde yapılan test sonucunda elde edilen ilgili ilerleme değerleri için ortalama anlık gc değerleri izelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. X eksenini İlerleme değeri – Ortalama Anlık İlerleme Gücü izelgesi

$V_f$ (mm/dak)	$P_{ilerleme,eksenX,ort}$ (Watt)	$V_f$ (mm/dak)	$P_{ilerleme,eksenX,ort}$ (Watt)
500	19	4000	200
1000	36	5000	266
2000	92	10000	573
3000	141		

Ayrıca bu verilerle elde edilen Ortalama Anlık Gc – İlerleme Hızı grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. X eksenini için Ortalama Anlık İlerleme Gücü – İlerleme Hızı grafiği

Testi yapılmayan ara ilerleme değerleri için ise regresyon analizi yapılarak Denklem 4.6 elde edilmiştir. Metal kesme operasyonu esnasında ara değerlerde çalışılıyorsa

Denklem 4.6 kullanılarak yaklaşık bir ortalama anlık ilerleme güç değeri elde edilebilir.

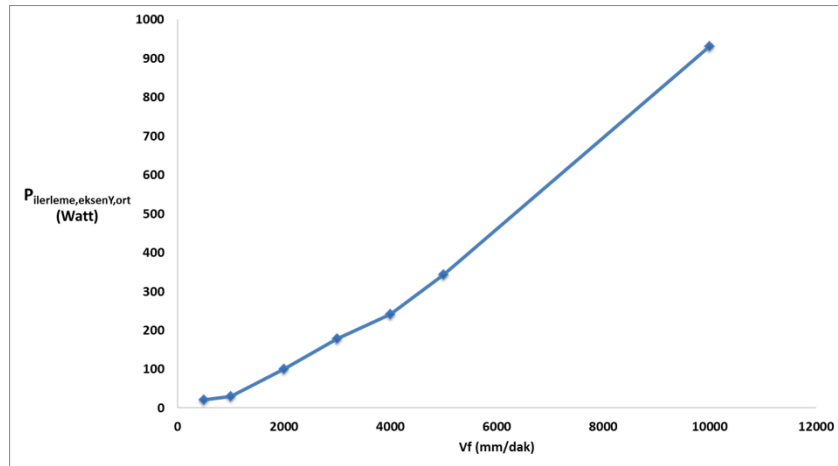
$$P_{ilerleme,eksenX,ort} = 0,059 V_f - 25,251 \quad (4.6)$$

Y+ ve Y- ekseninde yapılan test sonucunda elde edilen ilgili ilerleme değerleri için ortalama anlık güç değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Y eksenini İlerleme değeri – Ortalama Anlık Güç değeri çizelgesi

$V_f$ (mm/dak)	$P_{ilerleme,eksenY,ort}$ (Watt)	$V_f$ (mm/dak)	$P_{ilerleme,eksenY,ort}$ (Watt)
500	20	4000	241
1000	30	5000	343
2000	100	10000	931
3000	178		

Ayrıca bu verilerle elde edilen Ortalama Anlık İlerleme Gücü – İlerleme Hızı grafiği Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Y eksenini için Ortalama Anlık İlerleme Gücü – İlerleme Hızı grafiği

Testi yapılmayan ara ilerleme değerleri için ise regresyon analizi yapılarak Denklem 4.7 elde edilmiştir. Metal kesme operasyonu esnasında ara değerlerde çalışılıyorsa Denklem 4.7 kullanılarak yaklaşık ortalama anlık ilerleme güç değeri elde edilebilir.

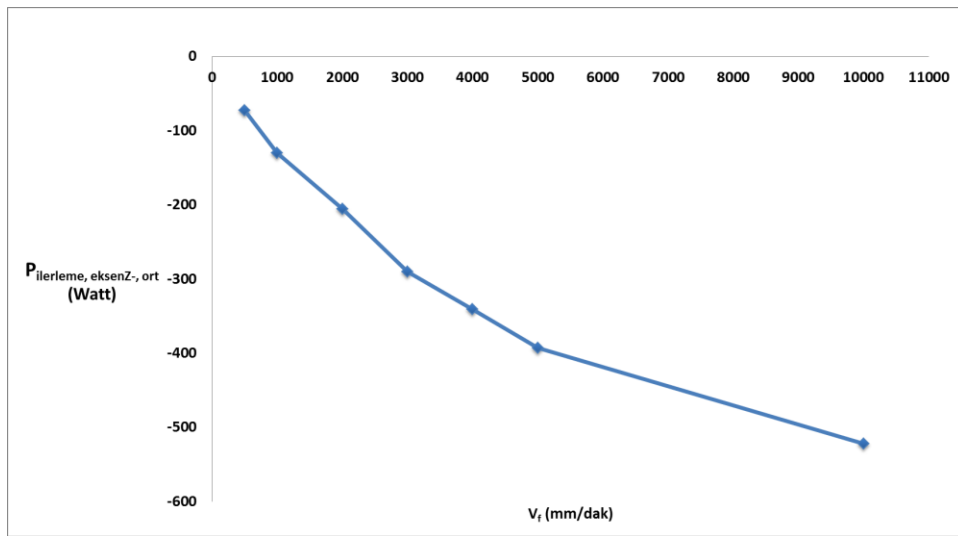
$$P_{ilerleme,eksenY,ort} = 0,097V_f - 89,989 \quad (4.7)$$

Z- ekseninde yapılan test sonucunda elde edilen ilgili ilerleme değerleri için ortalama anlık güç değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Z- eksen İlerleme değeri – Ortalama Anlık Güç değeri çizelgesi

$V_f$ (mm/dak)	$P_{ilerleme,eksenZ-,ort}$ (Watt)	$V_f$ (mm/dak)	$P_{ilerleme,eksenZ-,ort}$ (Watt)
500	-73	4000	-341
1000	-130	5000	-393
2000	-206	10000	-522
3000	-290		

Ayrıca bu verilerle elde edilen Ortalama Anlık İlerleme Gücü – İlerleme Hızı grafiği Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Z- eksen için Ortalama Anlık İlerleme Gücü – İlerleme Hızı grafiği

Testi yapılmayan ara ilerleme değerleri için ise regresyon analizi yapılarak Denklem 4.8 elde edilmiştir. Metal kesme operasyonu esnasında ara değerlerde çalışılıyorsa Denklem 4.8 kullanılarak yaklaşık bir ilerleme değeri elde edilebilir.

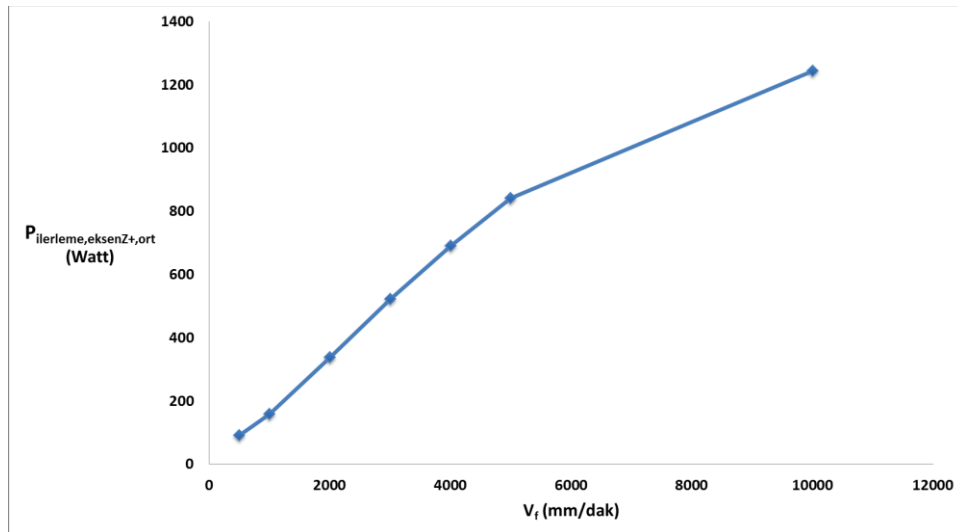
$$P_{ilerleme,eksenZ-,ort} = -0,0462V_f - 111,15 \quad (4.8)$$

Z+ ekseninde yapılan test sonucunda elde edilen ilgili ilerleme değerleri için ortalama anlık güç değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Z+ eksen İlerleme değeri – Ortalama Anlık Güç değeri çizelgesi

$V_f$ (mm/dak)	$P_{ilerleme,eksenZ+,ort}$ (Watt)	$V_f$ (mm/dak)	$P_{ilerleme,eksenZ+,ort}$ (Watt)
500	91	4000	689
1000	158	5000	841
2000	337	10000	1244
3000	521		

Ayrıca bu verilerle elde edilen Ortalama Anlık İlerleme Gücü – İlerleme Hızı grafiği Şekil 4.9'da verilmiştir.



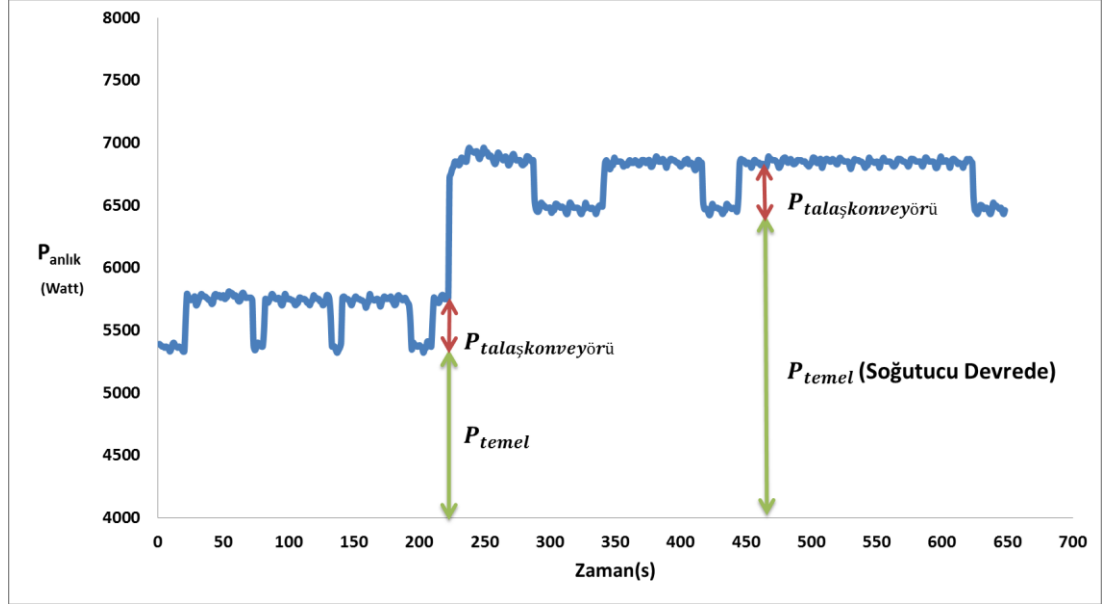
Şekil 4.9. Z+ eksen için Ortalama Anlık İlerleme Gücü – İlerleme Hızı grafiği

Testi yapılmayan ara ilerleme değerleri için ise regresyon analizi yapılarak Denklem 4.8 elde edilmiştir. Metal kesme operasyonu esnasında ara değerlerde çalışılıyorsa Denklem 4.9 kullanılarak yaklaşık bir ilerleme değeri elde edilebilir.

$$P_{ilerleme,eksenZ+,ort} = 0,1235V_f + 104,61 \quad (4.9)$$

#### 4.4.4. Talaş Konveyörü Enerji Tüketimi Ölçümleri

Metal kesme operasyonları esnasında biriken talaşı ortamdan kaldırmak için talaş konveyörleri kullanılır. DMU 65 monoBLOCK tezgahı için talaş konveyörünün harcadığı enerjiyi tespit etmek amacıyla tezgah kesime hazır durumdayken tezgah üzerinde ‘Talaş Konveyörünü Çalıştır’ komutuyla talaş konveyörü çalıştırılmış ve anlık güç tüketim değerleri enerji metre yardımıyla ölçülmüştür. Test sonucunda elde edilen Anlık Güç – Zaman grafiği Şekil 4.10’da verilmiştir.



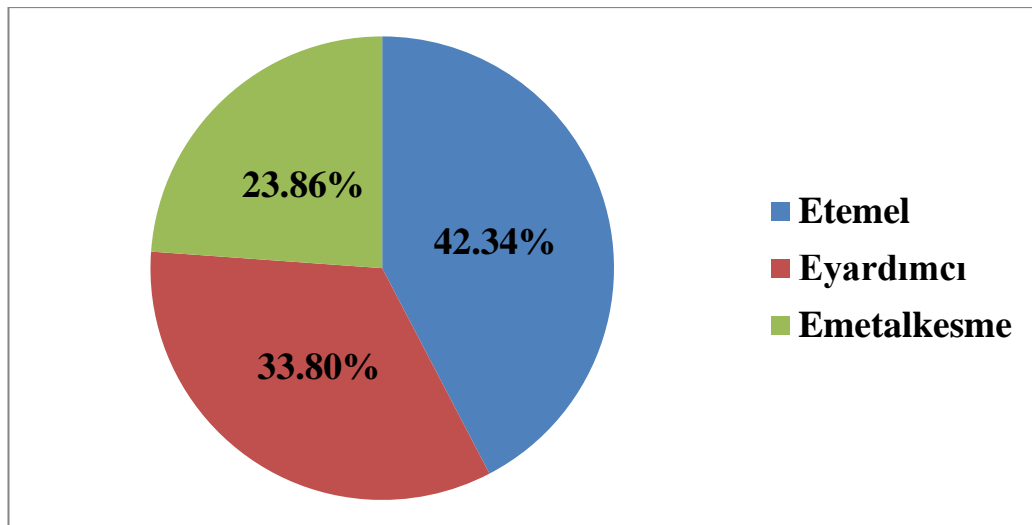
Şekil 4.10. Talaş konveyörü enerji tüketimi testi Anlık Güç – Zaman grafiği



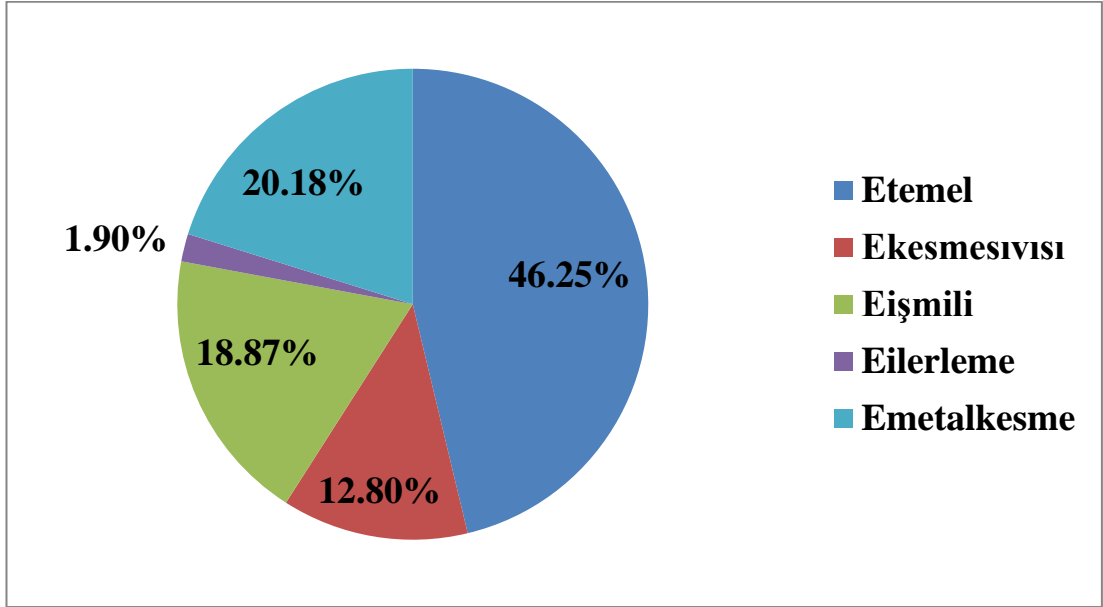
Test sonucunda elde edilen verilerle soğutucu ünitenin devrede olmadığı süre zarfında ortalama anlık temel güç tüketim değeri 5370 watt olarak, devrede olduğu sürede ise 6473 watt olarak hesaplanmıştır. Talaş konveyörü çalışıp soğutucu ünitenin devrede olmadığı zaman ortalama anlık güç değeri 5746 watt, devrede olduğu sürede ise 6846 watt olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerden yararlanılarak talaş konveyörünün anlık ortalama güç tüketim değeri ( $P_{talaş\ konveyörü,ort}$ ) 375 watt olarak hesaplanmıştır.

#### 4.5. BSD Tezgahı Enerji Tüketimi Dağılımı

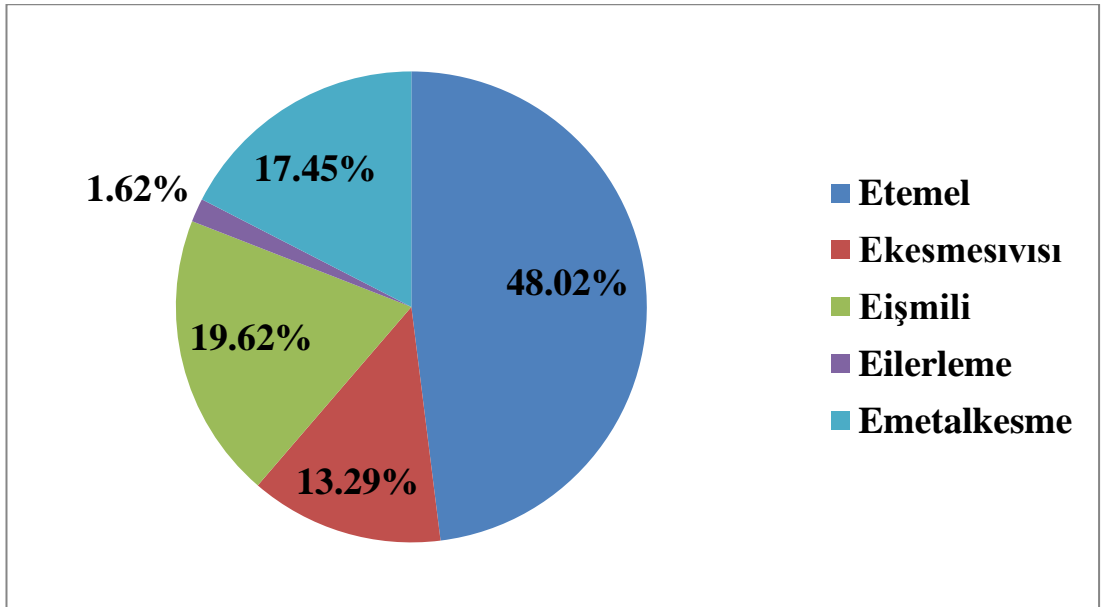
DMG DMU 65monoBLOCK BSD freze tezgahı için yapılan temel ve yardımcı enerji tüketim ölçümleri gerçekleştirildikten sonra tezgahın alt birimleri tarafından harcanan enerji tüketim dağılımı çıkarılmıştır. 5. Bölüm’de gerçekleştirilen deneysel kesimler sonucu elde edilen verilerin ortalaması alınarak çıkarılan enerji tüketimi dağılımı Şekil 4.11’de verilmiştir. Metal kesme süresi olarak teorik ilerleme süresi kullanılarak tahmin modeli vasıtasıyla hesaplanan değerlerin ortalaması alınarak çıkarılan enerji tüketimi dağılımı Şekil 4.12’de, metal kesme süresi olarak deneysel kesme süresi kullanılarak tahmin modeli vasıtasıyla hesaplanan değerlerin ortalaması alınarak Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Deneysel sonuçlarla elde edilen enerji tüketim dağılımı



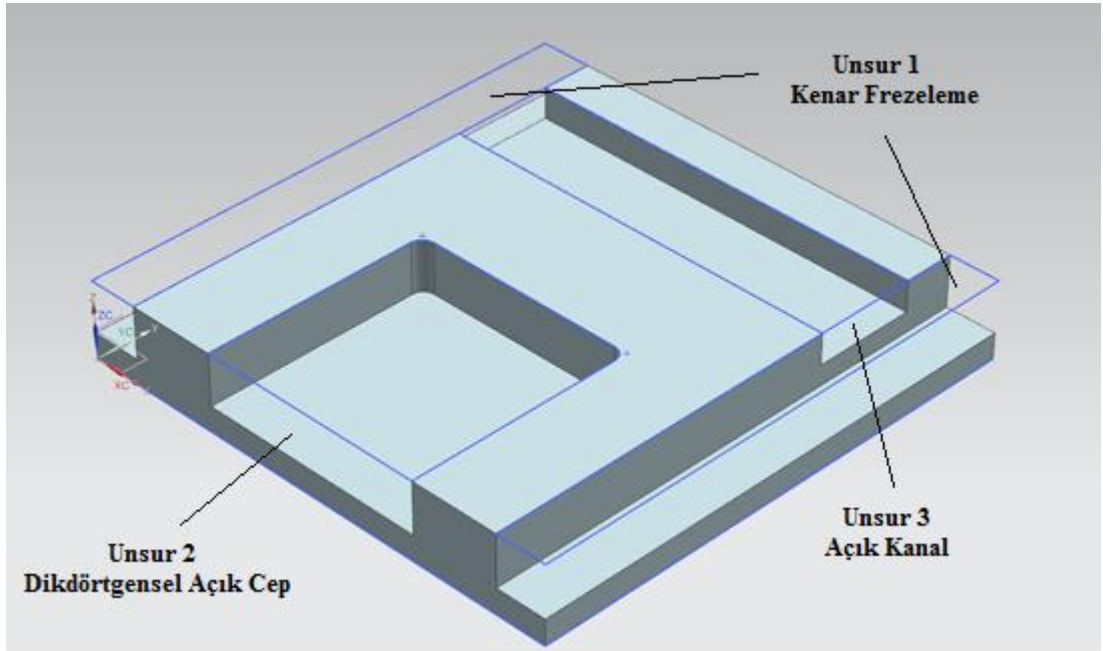
Şekil 4.12. Teorik ilerleme süresi kullanılarak tahmin modeli vasıtasıyla hesaplanan enerji tüketim dağılımı



Şekil 4.13. Deneysel kesme süresi kullanılarak tahmin modeli vasıtasıyla hesaplanan enerji tüketim dağılımı

## 5. ENERJİ TAHMİN MODELİ DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, enerji tahmin modeli doğrulama çalışmaları kapsamında, 3. Bölüm’de önerilen unsur bazlı modelin tutarlılığı 3. Bölüm’de verilen denklemler ve test için belirlenen kesme koşulları kullanılarak yapılan hesaplamalarla deneysel olarak elde edilen değerler karşılaştırılarak ölçülecektir. Bu kapsamda ISO 10303-224 (STEP AP 224) kütüphanesinde tanımlı üç tane unsur içeren bir katı model NX 9.0 programı BDT modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Şekil 5.1’de izometrik görünümü verilen parçada dikdörtgenel açık cep (*rectangular open pocket*) ile açık kanal (*open slot*) unsurları ve basamak (*step*) unsuru ya da kenar frezeleme operasyonu olarak da tanımlanabilecek unsurlar yer almaktadır. EK 2’de bu parçaya ait teknik resim bulunmaktadır. Frezelenen parça ise 200 x 200 x 30 mm ölçülerine sahip 6000 serisi alüminyum malzemedir.



Şekil 5.1. Enerji tahmin modeli doğrulama testi parçası

## 5.1. Test Koşullarının Belirlenmesi

Enerji tahmin modeli doğrulama testi kapsamında Çizelge 5.1’de görüldüğü gibi 4 farklı kesme koşulu oluşturulmuştur. Bu kesme koşullarının belirlenmesinde işlenecek malzemenin cinsi, kullanılan kesici takımın ve bu takımla uyumlu kesici ucun üreticisi tarafından belirtilen maksimum değerler göz önüne alınmıştır. Testlerde kullanılan kesici takıma ve kesici uca ait teknik bilgiler Walter firması kataloğundan edinilerek Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3’te verilmiştir [35]. Kesici takım olarak Walter kataloğundan F4042R.Z20.020.Z03.10 kodlu kesici takım seçilmiştir. Bu takım kanal açma, kenar frezeleme, helisel delik açma, helisel cep açma gibi operasyonları yapabilme yeteneğine sahip olduğundan ve dolayısıyla işlenecek bütün unsurları aynı takımla kesebilme şansı sağladığından tercih edilmiştir. Kesici takım seçildikten sonra takımla uyumlu ve alüminyum malzeme kesmek için kullanışlı olan ADHT10T3PER-G88 WK10 kodlu kesici uç seçilmiştir.

Çizelge 5.1. Testlere ait kesme koşulları

	$a_p$ (mm)	$f_z$ (mm)	$n$ (RPM)	$V_f$ (mm/dak)
Test 1	4	0,12	14000	5040
Test 2	4	0,1	10000	3000
Test 3	2	0,12	14000	5040
Test 4	2	0,1	10000	3000

Çizelge 5.2. Kesici takım teknik bilgileri [36]

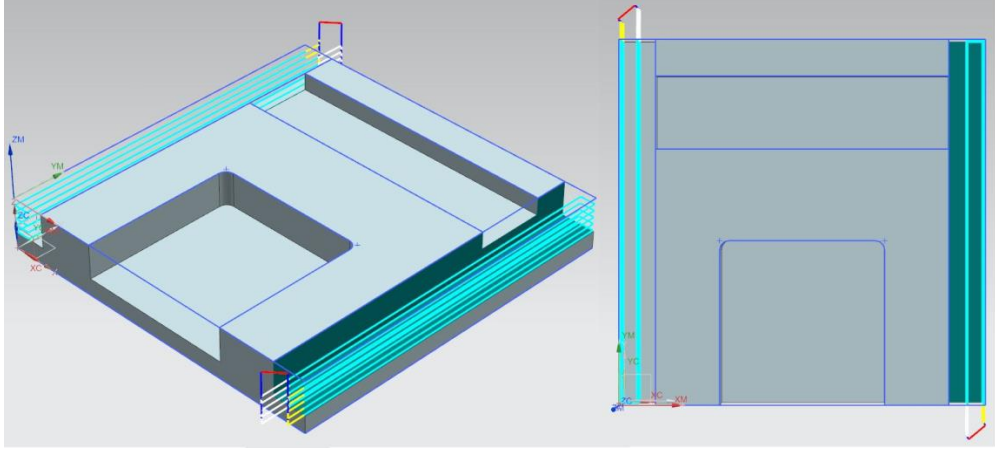
Ürün Kodu	F4042R.Z20.020.Z03.10
$D_c$ (mm)	20
$z$	3
$K$ (°)	90
$\gamma_0$ (°)	0
$max a_p$ (mm)	8
$f_z$ (mm)	0,09 - 0,15
$V_c$ (m/dak)	548 - 875

Çizelge 5.3. Kesici uç teknik bilgileri [36]

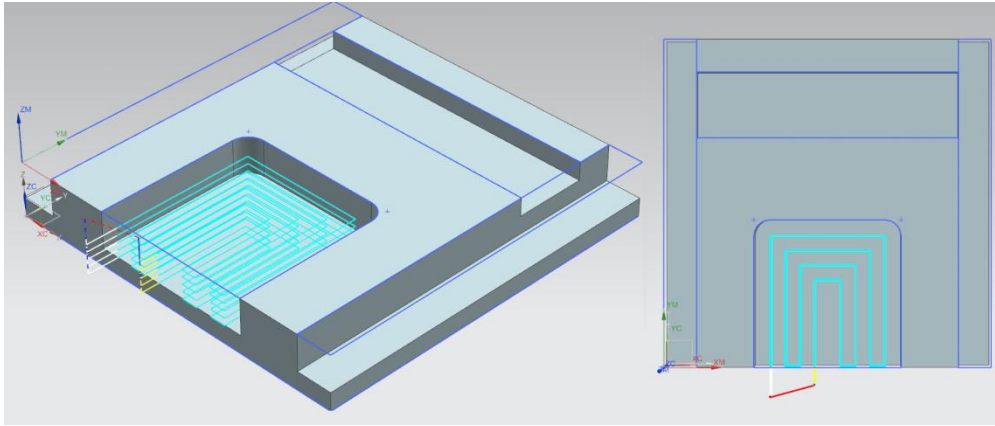
Ürün Kodu	ADHT10T3PER-G88 WK10
Kesici Uç Şekli	Pozitif Rombik
Uzunluk x Genişlik x Kalınlık (mm)	9,5 x 7,25 x 3,35
Kesme Kenarı Sayısı	2
$\gamma_0$ (°)	20
Boşaltma Açısı 1, $\alpha$ (°)	15
Boşaltma Açısı 2, $\alpha_2$ (°)	11
Talaş Kırıcı Boşluk Açısı (°)	20

## 5.2. Deneysel İşlem Basamakları

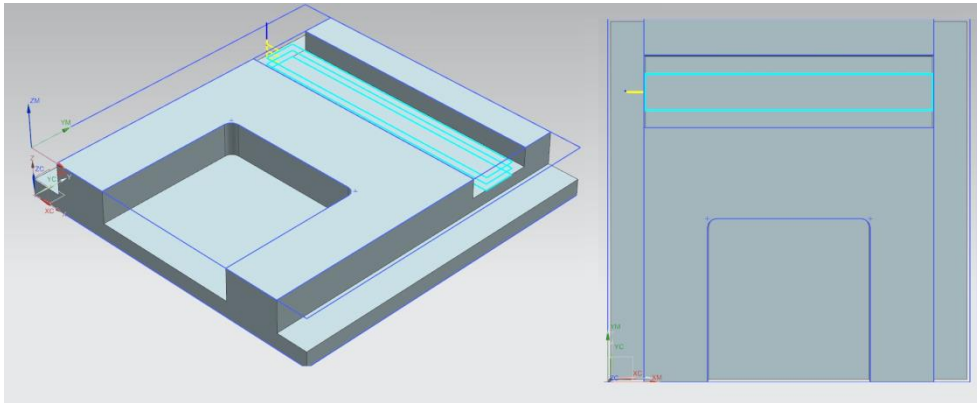
NX 9.0 programının BDT modülü vasıtasıyla parçanın katı modeli oluşturulduktan sonra programın BDÜ modülüne geçilerek Çizelge 5.1’de belirlenen test koşullarıyla parçayı frezelemek amacıyla operasyonlar oluşturulur. Bu operasyonları oluşturmak için öncelikle parçanın işleneceği iş parçası (*workpiece*) diye tabir edilen parça seçilir. Daha sonra iş parçası üzerinden kaldırılacak unsur veya unsurun yüzeyleri seçilerek kesim yapılacak alan (*cut area*) belirlenir. Kesici takım geometrik ve parametrik olarak modellenir. Sonrasında Çizelge 5.1’de belirlenen kesme koşulları programa girilir. Kesici takımın izleyeceği yolu belirlemek amacıyla kesim yolu tipi seçilir. Bütün testlerde ilgili unsuru frezelemek için kullanılan takım yolları aynı seçilmiştir. Takım yollarını seçerken olabildiğince ilgili unsuru işlemek için kullanılan kesme açısının sabit kaldığı alternatifler seçilmeye çalışılmıştır. Dikdörtgensel açık cep işlenirken parçaya bir dalma söz konusu olduğundan takım kesime başlarken  $180^\circ$ ’lik kesme açısı kullanılmış daha sonrasında  $90^\circ$ ’lik kesme açısıyla kesime devam edilmiştir. Açık kanal işlenirken ise, parçaya açıktan dalma yapılırken  $180^\circ$ ’lik açıyla girme zorunluluğu olduğundan hesapların tutarlılığı açısından bütün takım yolu boyunca kesme açısı  $180^\circ$  olarak tutulmuştur. Kenar frezeleme operasyonu, dikdörtgensel açık cep ve açık kanal unsurlarını işlemek için oluşturulan takım yollarının izometrik ve üstten görünümleri sırasıyla Şekil 5.2-5.4’te verilmiştir.



Şekil 5.2. Kenar frezeleme operasyonu için oluşturulan takım yolu



Şekil 5.3. Dikdörtgenel açık cep unsurunu işlemek için oluşturulan takım yolu



Şekil 5.4. Açık kanal unsurunu işlemek için oluşturulan takım yolu

Her bir unsur için takım yolu oluşturulduktan sonra, oluşturulan takım yolları için NX 9.0 BDÜ Modülü'nün içindeki takım yolu doğrulama seçeneği kullanılarak elde edilen frezeleme işleminin simülasyonu incelenir. Bir sorun olup olmadığı kontrol edildikten sonra hazırlanan BDÜ dosyasına ait NC kod dosyasının çıkartılması gerekmektedir. NX 9.0 programı '.cls' dosya formatında NC kod çıkartabilmektedir. Bu kodun DMU 65 monoBLOCK tezgahında bulunan Heidenhain iTNC 530 kontrol ünitesinde çalışabilmesi için post prosesör kullanılması gerekmektedir. Post prosesör '.cls' formatındaki dosyayı '.h' formatına çevirebilmektedir. Manus Yazılım Ltd.'ye ait MANUSpost kullanılarak bu format dönüşümü gerçekleştirilmiştir.

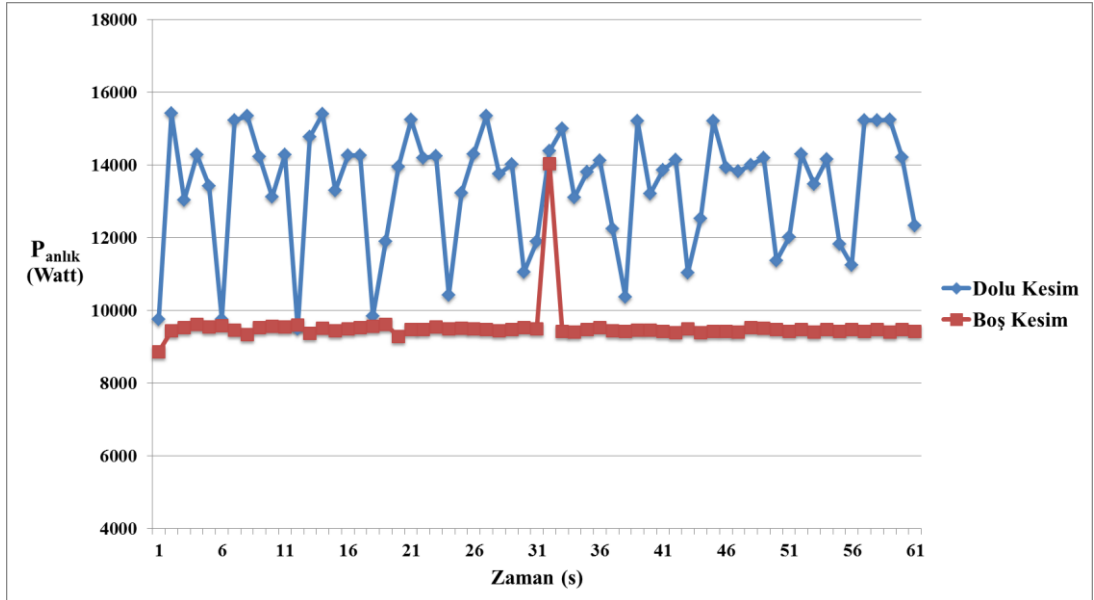
Her bir unsuru işlemek için '.h' uzantılı NC kod dosyaları hazırlandıktan sonra bu dosyalar tezgahın kontrol ünitesine yüklenir. İş parçası mengene yardımıyla sabitlenerek tezgahın tablası üzerine yerleştirilir. BDÜ programında belirlenen parça referans noktasıyla aynı olacak şekilde tezgahın ölçüm probuyla ölçüm yapılarak parça referans noktası belirlenir. BDÜ programında kullanılacak kesici takımlara verilen numarayla tezgahın magazini üzerindeki kesici takımın numarasının aynı olup olmadığı kontrol edilir. Kontrol ünitesine yüklenmiş olan ilgili '.h' uzantılı NC kod dosyası çalıştırılarak operasyon başlatılır.

### 5.3. Deneysel Test Sonuçları

Deneysel test kapsamında Çizelge 5.1'de belirtilen test koşulları altında Şekil 5.2-5.4'te gösterilen takım yolları kullanılarak her bir unsur için frezeleme operasyonu gerçekleştirilmiştir. Her bir unsuru işlemek için kullanılan operasyon öncelikle parça referans noktasının Z eksenine göre 100 mm yukarısında çalıştırılmıştır. Bu boşta kesme operasyonuna ait anlık güç değerleri enerji ölçer yardımıyla alınıp, bu verilerden yararlanılarak Anlık Güç – Zaman grafiği elde edilmiştir. Bu grafiğin altında kalan alan hesaplanarak  $E_{boşkesim}$  değerleri elde edilmiştir.  $E_{boşkesim}$  değeri operasyon süresince gerçekleşen  $E_{temel}$  ve  $E_{yardımcı}$  toplamını vermektedir. Operasyon başlangıcında ve sonrasında en az 10'ar saniyelik sürelerle anlık güç ölçümleri alınarak operasyon süresince gerçekleşen ortalama anlık güç tüketimi belirlenip

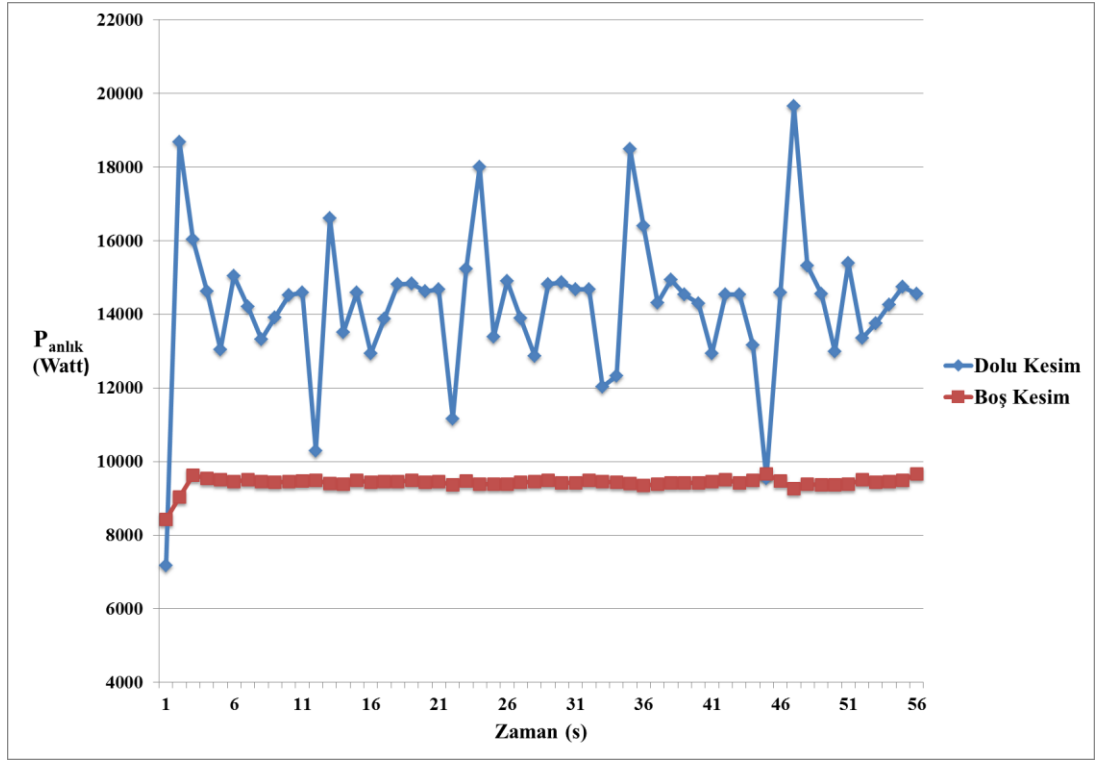
operasyon süresiyle çarpılarak  $E_{temel}$  deneysel olarak hesaplanmıştır ve bu değer  $E_{boşkesim}$ 'den çıkarılarak  $E_{yardımcı}$  bulunmuştur.

Sonraki aşamada metal kesme operasyonu gerçekleştirilmiş, enerji ölçer yardımıyla dolu kesme operasyonuna ait anlık güç değerleri alınmış ve Anlık Güç - Zaman grafiği elde edilmiştir. Bu grafiğin altında kalan alan  $E_{dolukesim}$  olarak adlandırılmıştır. Dolu kesim sonucu elde edilen grafiğin altında kalan alandan boş kesim sonucu elde edilen grafiğin altında kalan alan çıkarılarak  $E_{metalkesme}$  değerleri elde edilir. Şekil 5.5-5.7'de Test 1 kapsamında frezelenen parçaya ait unsurların boş kesim ve dolu kesim operasyonlarında elde edilen Anlık Güç – Zaman grafikleri yer almaktadır. Diğer testler için elde edilen grafikler EK 3'te verilmiştir. Her bir unsuru frezelemek için geçen deneysel operasyon süresi Çizelge 5.4'de belirtilmiştir. Dolu kesim ve boş kesim sonucu elde edilen deneysel enerji tüketim değerleri Çizelge 5.5'de verilmiştir. Burada unsur 1, unsur 2 ve unsur 3 sırasıyla kenar frezeleme, dikdörtgensel açık cep ve açık kanaldır.

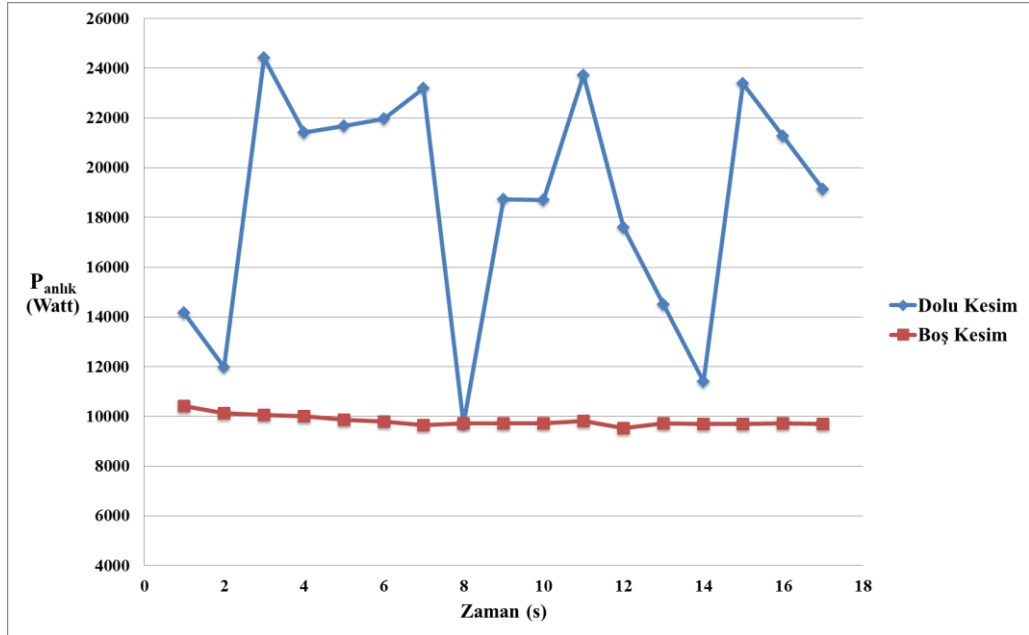


Şekil 5.5. Kenar frezeleme operasyonu Anlık Güç – Zaman grafiği





Şekil 5.6. Dikdörtgenel açık cep frezeleme operasyonu Anlık Güç – Zaman grafiği



Şekil 5.7. Açık kanal frezeleme operasyonu Anlık Güç – Zaman grafiği

Çizelge 5.4. Unsurları frezelemek için geçen deneysel süre çizelgesi

	$t_{unsur,1}$ (s)	$t_{unsur,2}$ (s)	$t_{unsur,3}$ (s)	$t_{parça}$ (s)
Test 1	61	56	17	134
Test 2	96	83	26	205
Test 3	125	111	36	272
Test 4	193	166	51	410

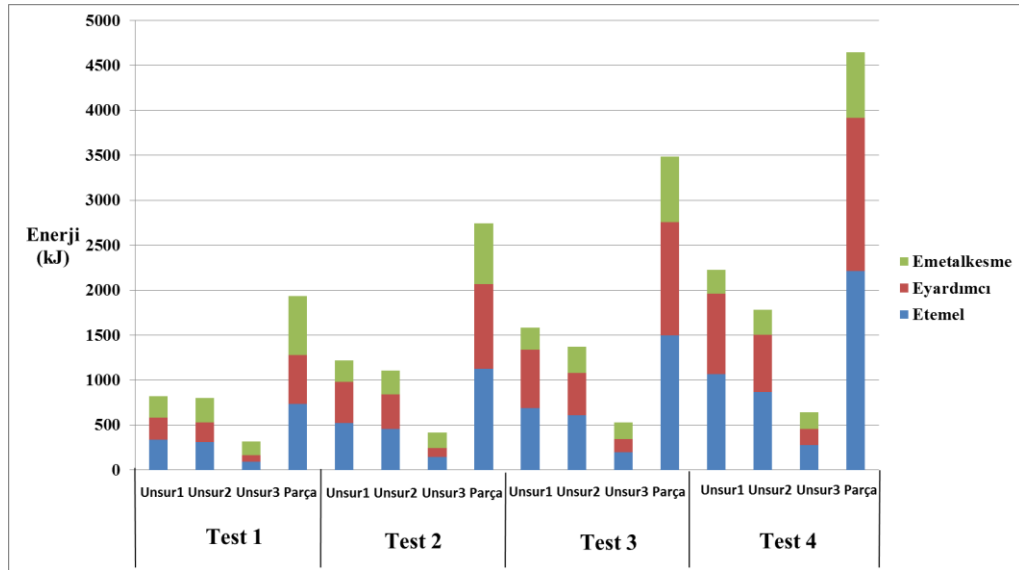
Çizelge 5.5. Boş kesim ve dolu kesim sonucu elde edilen değerler

Test No		Unsur 1	Unsur 2	Unsur 3	Parça
TEST 1	$E_{dolukesim}$ (kJ)	817,67	799,44	316,94	1934,05
	$E_{boşkesim}$ (kJ)	581,80	527,62	166,95	1276,37
	$E_{temel}$ (kJ)	334,65	307,78	92,92	735,34
	$E_{yardımcı}$ (kJ)	247,15	219,84	74,03	541,02
	$E_{metalkesme}$ (kJ)	235,88	271,82	149,99	657,68
TEST 2	$E_{dolukesim}$ (kJ)	1219,14	1107,07	419,65	2745,85
	$E_{boşkesim}$ (kJ)	978,63	843,27	245,16	2067,06
	$E_{temel}$ (kJ)	524,45	455,59	144,04	1124,08
	$E_{yardımcı}$ (kJ)	454,18	387,69	101,12	942,98
	$E_{metalkesme}$ (kJ)	240,51	263,79	174,49	678,79
TEST 3	$E_{dolukesim}$ (kJ)	1585,99	1373,09	529,87	3488,95
	$E_{boşkesim}$ (kJ)	1335,14	1076,71	343,91	2755,76
	$E_{temel}$ (kJ)	690,13	606,62	197,03	1493,77
	$E_{yardımcı}$ (kJ)	645,01	470,10	146,88	1261,99
	$E_{metalkesme}$ (kJ)	250,85	296,38	185,96	733,19
TEST 4	$E_{dolukesim}$ (kJ)	2224,46	1779,56	642,85	4646,87
	$E_{boşkesim}$ (kJ)	1959,82	1501,74	456,18	3917,73
	$E_{temel}$ (kJ)	1065,36	868,68	278,15	2212,19
	$E_{yardımcı}$ (kJ)	894,46	633,06	178,03	1705,54
	$E_{metalkesme}$ (kJ)	264,64	277,83	186,67	729,14

Çizelge 5.5'teki verilerden yararlanılarak temel, yardımcı ve metal kesme enerji tüketim değerlerinin toplam tüketime göre yüzde oranları her bir unsur, parça ve test için hesaplanmış ve Çizelge 5.6'da gösterilmiştir. Çizelge 5.6'daki verilerden yararlanılarak oluşturulan sütun grafiği Şekil 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.6. Enerji tüketim değerlerinin toplam tüketime göre yüzde oranları

Test No		Unsur 1	Unsur 2	Unsur 3	Parça
TEST 1	$E_{temel}$ (%)	40,93	38,50	29,32	38,02
	$E_{yardımcı}$ (%)	30,23	27,50	23,36	27,97
	$E_{metalkesme}$ (%)	28,85	34,00	47,32	34,01
TEST 2	$E_{temel}$ (%)	43,02	41,15	34,32	40,94
	$E_{yardımcı}$ (%)	37,25	35,02	24,10	34,34
	$E_{metalkesme}$ (%)	19,73	23,83	41,58	24,72
TEST 3	$E_{temel}$ (%)	43,51	44,18	37,18	42,81
	$E_{yardımcı}$ (%)	40,67	34,24	27,72	36,17
	$E_{metalkesme}$ (%)	15,82	21,58	35,10	21,01
TEST 4	$E_{temel}$ (%)	47,89	48,81	43,27	47,61
	$E_{yardımcı}$ (%)	40,21	35,57	27,69	36,70
	$E_{metalkesme}$ (%)	11,90	15,61	29,04	15,69



Şekil 5.8. Enerji tüketim değerlerinin toplam tüketime göre oranlarının grafiksel gösterimi

#### 5.4. Enerji Tahmin Modeli Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar

Bölüm 3'te verilen denklemleri kullanarak enerji tüketim değerlerini hesaplamak için öncelikle Denklem 3.14 kullanılarak her unsur ve parça için metal kesme süresi ( $t_{metalkesme}$ ) hesaplanmalıdır. Çünkü bu değerler kullanılarak alt birimlerin tükettiği enerji miktarları hesaplanmaktadır. Her unsur için bu değeri hesaplamak üzere takım yolu uzunlukları belirlenmiş ve ilerleme hızına bölünerek her biri unsuru işlemek için geçen süre hesaplanmıştır. Çizelge 5.7'de hesaplanan operasyon süresi değerleri verilmiştir. Ayrıca X ve Y eksenlerinde ortalama anlık ilerleme güçleri farklı olduğundan takım yollarının X ve Y eksenlerindeki uzunlukları ve operasyon süreleri ayrı ayrı hesaplanıp Çizelge 5.7'ye eklenmiştir. Çizelge 5.7'deki  $l_{f,X}$  ve  $l_{f,Y}$  sırasıyla X eksenindeki ve Y eksenindeki takım yolu uzunluğu;  $t_{f,X}$  ve  $t_{f,Y}$  ise sırasıyla X eksenindeki ve Y eksenindeki takım yolu ilerleme süreleridir. Bu değerler Çizelge 5.4'te verilen deneysel operasyon sürelerine göre daha kısadır. Bunun sebebi Denklem 3.14'te verilen formülün pozisyonlama, dalma ve çıkma gibi aslında takım yoluna dahil olan hareketlerin denkleme dahil edilmemesidir. Bu yüzden yapılacak hesaplamaların Çizelge 5.4'deki değerler kullanılarak da hesaplanması gerekir.

Çizelge 5.7.Takım yolu uzunluğu kullanılarak elde edilen kesme süreleri

		$V_f$ (mm/s)	X Ekseni		Y Ekseni		Toplam	
			$l_{f-X}$ (mm)	$t_{f-X}$ (s)	$l_{f-Y}$ (mm)	$t_{f-Y}$ (s)	$l_f$ (mm)	$t_{metalkesme}$ (s)
TEST 1	Unsur 1	84	100	1,19	4000	47,62	4100	48,81
	Unsur 2	84	1195	14,23	2660	31,67	3855	45,89
	Unsur 3	84	960	11,43	120	1,43	1080	12,86
	Parça	84	2255	26,85	6780	80,71	9035	107,56
TEST 2	Unsur 1	50	100	2,00	4000	80,00	4100	82,00
	Unsur 2	50	1195	23,90	2660	53,20	3855	77,10
	Unsur 3	50	960	19,20	120	2,40	1080	21,60
	Parça	50	2255	45,10	6780	135,60	9035	180,70
TEST 3	Unsur 1	84	200	2,38	8000	95,24	8200	97,62
	Unsur 2	84	2390	28,45	5320	63,33	7710	91,79
	Unsur 3	84	1920	22,86	240	2,86	2160	25,71
	Parça	84	4510	53,69	13560	161,43	18070	215,12
TEST 4	Unsur 1	50	200	4,00	8000	160,00	8200	164,00
	Unsur 2	50	2390	47,80	5320	106,40	7710	154,20
	Unsur 3	50	1920	38,40	240	4,80	2160	43,20
	Parça	50	4510	90,20	13560	271,20	18070	361,40

Çizelge 5.7’de yer alan kesme süreleri verilerinden yararlanılarak her bir unsur ve test parçası için X yönündeki ilerleme enerji tüketimi ( $E_{ilerleme-X}$ ) ve Y yönündeki ilerleme enerji tüketimi ( $E_{ilerleme-Y}$ ) hesaplanmış ve Çizelge 5.8’de gösterilmiştir. Toplam ilerleme hareketi için harcanan enerji tüketimi Denklem 3.7 kullanılarak hesaplanmıştır ve bu değerler Çizelge 5.8’e yansıtılmıştır.

Çizelge 5.8. Tahmin modeli kullanılarak hesaplanan ilerleme eksenleri hareketinden kaynaklanan enerji tüketimi değerleri

		X Eksenli			Y Eksenli			Toplam
		$P_{f-X,ort}$ (Watt)	$t_{f-X}$ (s)	$E_{ilerleme-X}$ (kJ)	$P_{f-Y,ort}$ (Watt)	$t_{f-Y}$ (s)	$E_{ilerleme-Y}$ (kJ)	$E_{ilerleme}$ (kJ)
TEST 1	Unsur 1	266	1,19	0,32	343	47,62	16,33	16,65
	Unsur 2	266	14,23	3,78	343	31,67	10,86	14,65
	Unsur 3	266	11,43	3,04	343	1,43	0,49	3,53
	Parça	266	26,85	7,14	343	80,71	27,68	34,82
TEST 2	Unsur 1	141	2,00	0,28	178	80,00	14,24	14,52
	Unsur 2	141	23,90	3,37	178	53,20	9,47	12,84
	Unsur 3	141	19,20	2,71	178	2,40	0,43	3,13
	Parça	141	45,10	6,36	178	135,60	24,14	30,50
TEST 3	Unsur 1	266	2,38	0,63	343	95,24	32,67	33,30
	Unsur 2	266	28,45	7,57	343	63,33	21,72	29,29
	Unsur 3	266	22,86	6,08	343	2,86	0,98	7,06
	Parça	266	53,69	14,28	343	161,43	55,37	69,65
TEST 4	Unsur 1	141	4,00	0,56	178	160,00	28,48	29,04
	Unsur 2	141	47,80	6,74	178	106,40	18,94	25,68
	Unsur 3	141	38,40	5,41	178	4,80	0,85	6,27
	Parça	141	90,20	12,72	178	271,20	48,27	60,99

Metal kesme enerjisi tüketimi ( $E_{metalkesme}$ ) Denklem 3.15 kullanılarak elde edilmiş ve her bir unsur ve parça için hesaplanarak Çizelge 5.9’da gösterilmiştir. Burada makine verimlilik oranı ( $\eta$ ) 0,9 olarak kabul edilmiştir. Ortalama talaş kalınlığı ( $h_m$ ) her bir test için kesme koşullarına bağlı olarak ve Denklem 3.17 kullanılarak, özgül kesme enerjisi ( $k_c$ ) ise her bir test için Denklem 3.16 kullanılarak hesaplanmıştır.

Test kapsamındaki her bir unsuru ve parçayı frezelemek için gereken temel enerji tüketimi değerleri Denklem 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada  $t_{operasyon}$  değeri olarak her bir unsur ve parça için hesaplanan  $t_{metalkesme}$  değerleri kullanılmıştır. Benzer şekilde her bir unsur ve parçayı frezelemek için kesme sıvısı ünitesinin enerji tüketimi Denklem 3.8 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada deneysel testlerde olduğu gibi tüm kesme operasyonlarında başından sonuna kadar kesme sıvısı ünitesi çalıştığı için  $t_{kesmesıvısı}$  değerleri olarak  $t_{metalkesme}$  değerleri kullanılmıştır. Ayrıca her bir unsur

ve parça frezeleme operasyonu için iş mili enerji tüketimi değerleri Denklem 3.6 kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir unsur ve parçayı frezelemek için model vasıtasıyla hesaplanan tüm bu enerji tüketim değerleri Çizelge 5.10’da gösterilmiştir. Ayrıca iş milinin, kesme sıvısı ünitesinin ve ilerleme akselerasyonunun tükettiği enerji toplamı,  $E_{yardımcı}$ , hesaplanarak Çizelge 5.10’a eklenmiş, böylece deneysel olarak elde edilen sonuçlarla birebir karşılaştırma olanağı sağlanmıştır. Çizelge 5.11’de ise enerji tahmin modeli kullanılarak hesaplanan enerji değerlerinin toplam enerji tüketimine oranları gösterilmektedir. Çizelge 5.12’de takım yolu uzunluğu kullanılarak hesaplanan metal kesme süresi yerine Çizelge 5.4’te verilen deneysel kesme süreleri kullanılarak enerji tahmin modeliyle hesaplanan enerji tüketim değerleri verilmiştir. Çizelge 5.13’de ise bu değerlerin toplam enerji tüketimine oranları verilmiştir. Çizelge 5.11 ve 5.13’teki verilere dayanarak oluşturulan sütun grafikleri sırasıyla Şekil 5.9 ve 5.10’da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Tahmin modeli kullanılarak hesaplanan metal kesme enerjisi değerleri

		$h_m$ (mm)	$k_c$ (J/mm <sup>3</sup> )	$V_{unsur}$ (mm <sup>3</sup> )	$E_{metalkesme}$ (kJ)
TEST 1	Unsur 1	0,076	1064,93	160000	189,32
	Unsur 2	0,076	1064,93	162000	191,69
	Unsur 3	0,076	1064,93	76800	90,87
	Parça	0,076	1064,93	398800	471,88
TEST 2	Unsur 1	0,064	1114,59	160000	198,15
	Unsur 2	0,064	1114,59	162000	200,63
	Unsur 3	0,064	1114,59	76800	95,11
	Parça	0,064	1114,59	398800	493,89
TEST 3	Unsur 1	0,076	1064,93	160000	189,32
	Unsur 2	0,076	1064,93	162000	191,69
	Unsur 3	0,076	1064,93	76800	90,87
	Parça	0,076	1064,93	398800	471,88
TEST 4	Unsur 1	0,064	1114,59	160000	198,15
	Unsur 2	0,064	1114,59	162000	200,63
	Unsur 3	0,064	1114,59	76800	95,11
	Parça	0,064	1114,59	398800	493,89

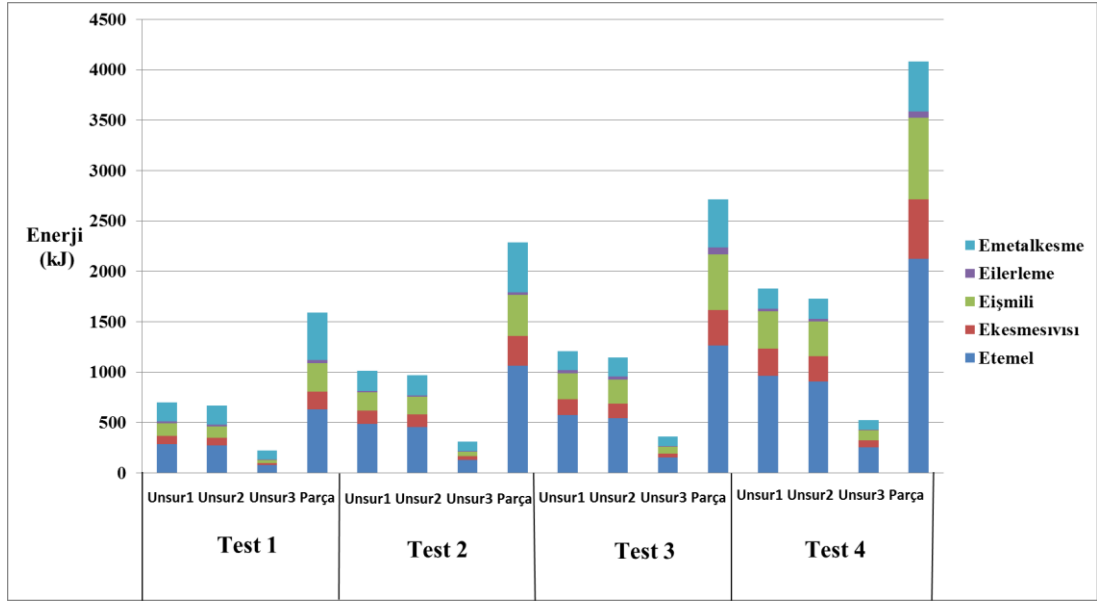
Çizelge 5.10. Enerji tahmin modeli kullanılarak hesaplanan enerji tüketim değerleri

		$E_{temel}$ (kJ)	$E_{kesme\ sıvısı}$ (kJ)	$E_{iş\ mili}$ (kJ)	$E_{ilerleme}$ (kJ)	$E_{yardımcı}$ (kJ)	$E_{metalkesme}$ (kJ)	$E_{toplam}$ (kJ)
TEST 1	Unsur 1	287,15	79,46	125,83	16,65	221,94	189,32	698,41
	Unsur 2	269,99	74,71	118,31	14,65	207,67	191,69	669,35
	Unsur 3	75,64	20,93	33,15	3,53	57,61	90,87	224,12
	Parça	632,77	175,11	277,29	34,82	487,22	471,88	1591,87
TEST 2	Unsur 1	482,41	133,50	184,25	14,52	332,27	198,15	1012,83
	Unsur 2	453,58	125,52	173,24	12,84	311,60	200,63	965,81
	Unsur 3	127,07	35,16	48,54	3,13	86,83	95,11	309,02
	Parça	1063,06	294,18	406,03	30,50	730,71	493,89	2287,65
TEST 3	Unsur 1	574,29	158,92	251,66	33,30	443,89	189,32	1207,50
	Unsur 2	539,98	149,43	236,62	29,29	415,34	191,69	1147,00
	Unsur 3	151,28	41,86	66,29	7,06	115,21	90,87	357,37
	Parça	1265,55	350,21	554,58	69,65	974,44	471,88	2711,87
TEST 4	Unsur 1	964,81	266,99	368,51	29,04	664,54	198,15	1827,51
	Unsur 2	907,16	251,04	346,49	25,68	623,20	200,63	1730,99
	Unsur 3	254,15	70,33	97,07	6,27	173,67	95,11	522,93
	Parça	2126,12	588,36	812,07	60,99	1461,42	493,89	4081,42

Çizelge 5.11. Hesaplanan enerji tüketim değerlerinin toplam tüketime göre yüzde oranları

		$E_{temel}$ (%)	$E_{kesmesivısı}$ (%)	$E_{iş\ mili}$ (%)	$E_{ilerleme}$ (%)	$E_{yardımcı}$ (%)	$E_{metalkesme}$ (%)
TEST 1	Unsur 1	41,11	11,38	18,02	2,38	31,78	27,11
	Unsur 2	40,34	11,16	17,68	2,19	31,03	28,64
	Unsur 3	33,75	9,34	14,79	1,58	25,70	40,55
	Parça	39,75	11,00	17,42	2,19	30,61	29,64
TEST 2	Unsur 1	47,63	13,18	18,19	1,43	32,81	19,56
	Unsur 2	46,96	13,00	17,94	1,33	32,26	20,77
	Unsur 3	41,12	11,38	15,71	1,01	28,10	30,78
	Parça	46,47	12,86	17,75	1,33	31,94	21,59
TEST 3	Unsur 1	47,56	13,16	20,84	2,76	36,76	15,68
	Unsur 2	47,08	13,03	20,63	2,55	36,21	16,71
	Unsur 3	42,33	11,71	18,55	1,98	32,24	25,43
	Parça	46,67	12,91	20,45	2,57	35,93	17,40
TEST 4	Unsur 1	52,79	14,61	20,16	1,59	36,36	10,84
	Unsur 2	52,41	14,50	20,02	1,48	36,00	11,59
	Unsur 3	48,60	13,45	18,56	1,20	33,21	18,19
	Parça	52,09	14,42	19,90	1,49	35,81	12,10





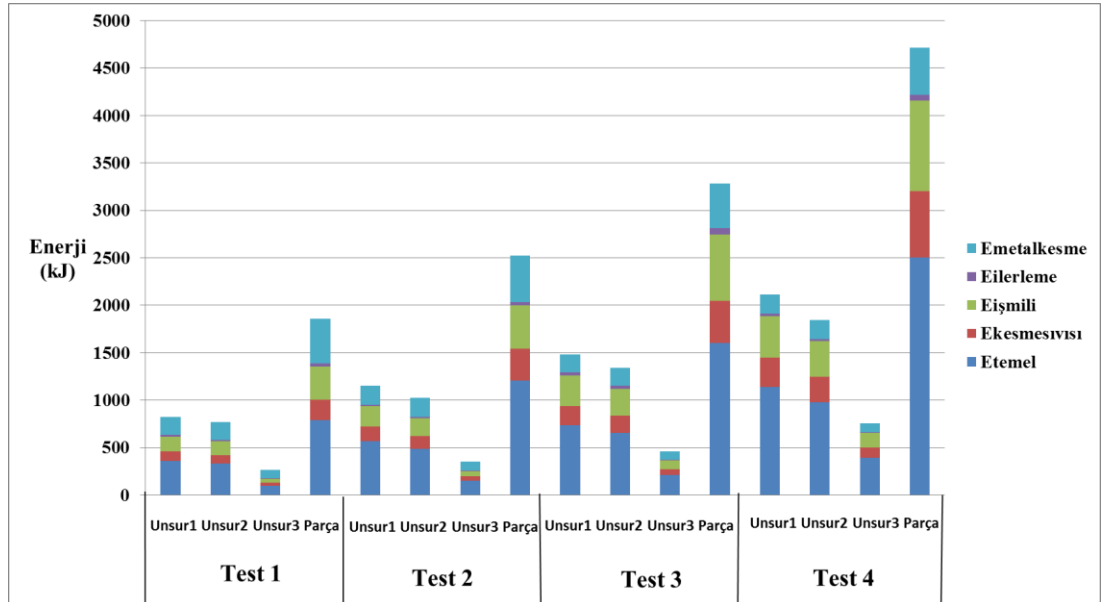
Şekil 5.9. Hesaplanan enerji tüketim değerlerinin toplam tüketime göre oranlarını gösteren sütun grafiği

Çizelge 5.12. Deneysel kesme süreleri kullanılarak hesaplanan enerji tüketim değerleri

		$E_{temel}$ (kJ)	$E_{kesme\ sıvısı}$ (kJ)	$E_{iş\ mili}$ (kJ)	$E_{ilerleme}$ (kJ)	$E_{yardımcı}$ (kJ)	$E_{metalkesme}$ (kJ)	$E_{toplam}$ (kJ)
TEST 1	Unsur 1	358,86	99,31	157,26	16,65	273,22	189,32	821,40
	Unsur 2	329,45	91,17	144,37	14,65	250,18	191,69	771,32
	Unsur 3	100,01	27,68	43,83	3,53	75,03	90,87	265,92
	Parça	788,32	218,15	345,45	34,82	598,43	471,88	1858,63
TEST 2	Unsur 1	564,77	156,29	215,71	14,52	386,52	198,15	1149,44
	Unsur 2	488,29	135,12	186,50	12,84	334,46	200,63	1023,38
	Unsur 3	152,96	42,33	58,42	3,13	103,88	95,11	351,95
	Parça	1206,02	333,74	460,64	30,50	824,87	493,89	2524,77
TEST 3	Unsur 1	735,38	203,50	322,25	33,30	559,05	189,32	1483,75
	Unsur 2	653,01	180,71	286,16	29,29	496,16	191,69	1340,86
	Unsur 3	211,79	58,61	92,81	7,06	158,48	90,87	461,14
	Parça	1600,18	442,82	701,22	69,65	1213,68	471,88	3285,74
TEST 4	Unsur 1	1135,42	314,20	433,67	29,04	776,92	198,15	2110,49
	Unsur 2	976,58	270,25	373,00	25,68	668,93	200,63	1846,13
	Unsur 3	300,03	83,03	114,00	6,27	203,30	95,11	598,44
	Parça	2412,03	667,48	920,67	60,99	1649,14	493,89	4555,06

Çizelge 5.13. Deneysel kesme süreleri kullanılarak hesaplanan enerji tüketim değerlerinin toplam tüketime göre yüzde oranları

		$E_{temel}$ (%)	$E_{kesmesivısı}$ (%)	$E_{iş\ mili}$ (%)	$E_{ilerleme}$ (%)	$E_{yardımcı}$ (%)	$E_{metalkesme}$ (%)
TEST 1	Unsur 1	43,69	12,09	19,15	2,03	33,26	23,05
	Unsur 2	42,71	11,82	18,72	1,90	32,44	24,85
	Unsur 3	37,61	10,41	16,48	1,33	28,22	34,17
	Parça	42,41	11,74	18,59	1,87	32,20	25,39
TEST 2	Unsur 1	49,13	13,60	18,77	1,26	33,63	17,24
	Unsur 2	47,71	13,20	18,22	1,25	32,68	19,60
	Unsur 3	43,46	12,03	16,60	0,89	29,52	27,02
	Parça	47,77	13,22	18,24	1,21	32,67	19,56
TEST 3	Unsur 1	49,56	13,72	21,72	2,24	37,68	12,76
	Unsur 2	48,70	13,48	21,34	2,18	37,00	14,30
	Unsur 3	45,93	12,71	20,13	1,53	34,37	19,71
	Parça	48,70	13,48	21,34	2,12	36,94	14,36
TEST 4	Unsur 1	53,80	14,89	20,55	1,38	36,81	9,39
	Unsur 2	52,90	14,64	20,20	1,39	36,23	10,87
	Unsur 3	52,20	14,44	19,94	0,83	35,21	12,59
	Parça	53,19	14,72	20,32	1,29	36,33	10,48



Şekil 5.10. Deneysel kesme süreleri kullanılarak hesaplanan enerji tüketim değerlerinin toplam tüketime göre oranlarını gösteren sütun grafiği

## 5.5. Deneysel Sonuçlar ve Enerji Tahmin Modeli Kullanarak Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Bu kısımda enerji tahmin modelinin tutarlılığını araştırmak amacıyla deneysel verilerin doğru olduğu kabulü yapılarak tahmin modeliyle hesaplanan enerji tüketim değerlerinin hata oranı hesaplanmıştır. Hata oranının hesaplamak için Denklem 5.1 kullanılmıştır.

$$Hata\ Oranı = \frac{|Tahmin-Deneysel|}{Deneysel} \times 100 \quad (5.1)$$

Takım yolu uzunluğu kullanılarak hesaplanan kesme süresi kullanılarak bulunan Çizelge 5.10 değerlerinin, Çizelge 5.5'teki deneysel değerlere göre hata oranı hesaplanmış ve hesaplanan hata oranları Çizelge 5.14'te verilmiştir.

Çizelge 5.14. Takım yolu uzunluğu kullanılarak hesaplanan kesme süreleri vasıtasıyla elde edilen enerji tüketim değerlerinin hata oranları

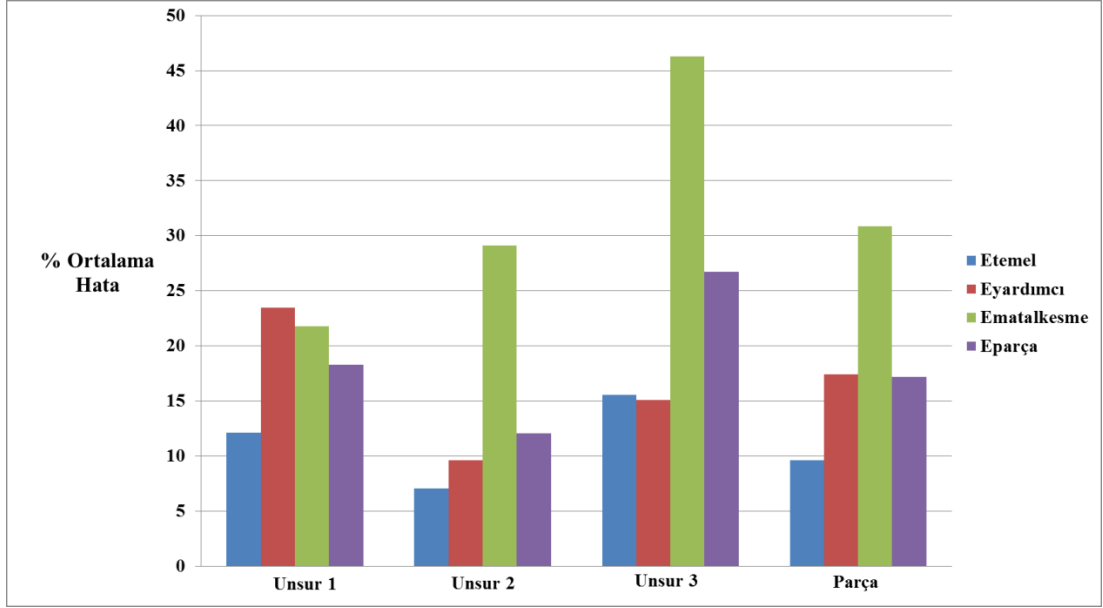
		$E_{temel}$ (% Hata)	$E_{yardımcı}$ (% Hata)	$E_{metalkesme}$ (% Hata)	$E_{toplam}$ (% Hata)
TEST 1	Unsur 1	14,19	10,20	19,74	14,59
	Unsur 2	12,28	5,54	29,48	16,27
	Unsur 3	18,60	22,18	39,41	29,29
	Parça	13,95	9,94	28,25	17,69
TEST 2	Unsur 1	8,02	26,84	17,61	16,92
	Unsur 2	0,44	19,63	23,94	12,76
	Unsur 3	11,78	14,13	45,49	26,36
	Parça	5,43	22,51	27,24	16,69
TEST 3	Unsur 1	16,78	31,18	24,53	23,86
	Unsur 2	10,99	11,65	35,32	16,47
	Unsur 3	23,22	21,56	51,13	32,56
	Parça	15,28	22,79	35,64	22,27
TEST 4	Unsur 1	9,44	25,70	25,12	17,84
	Unsur 2	4,43	1,56	27,79	2,73
	Unsur 3	8,63	2,45	49,05	18,66
	Parça	3,89	14,31	32,26	12,17

Deneysel kesme süreleri kullanılarak bulunan Çizelge 5.12 değerlerinin Çizelge 5.5'deki deneysel değerlere göre hata oranı hesaplanmış ve hesaplanan hata oranları Çizelge 5.15'de verilmiştir.

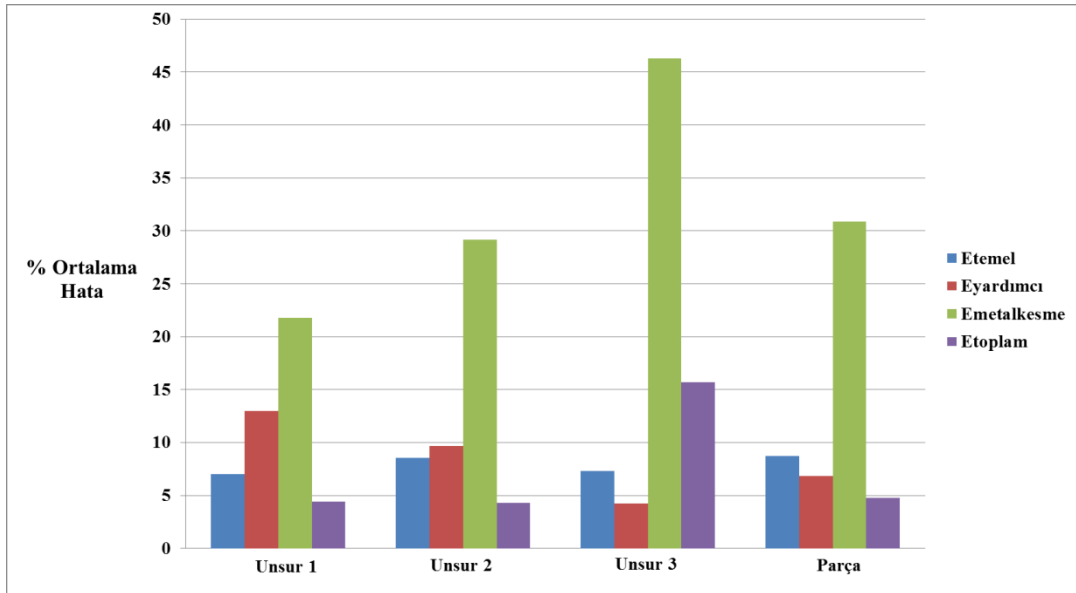
Çizelge 5.15. Deneysel kesme süreleri vasıtasıyla elde edilen enerji tüketim değerlerinin hata oranları

		$E_{temel}$ (% Hata)	$E_{yardımcı}$ (% Hata)	$E_{metalkesme}$ (% Hata)	$E_{toplam}$ (% Hata)
TEST 1	Unsur 1	7,24	10,55	19,74	0,46
	Unsur 2	7,04	13,80	29,48	3,52
	Unsur 3	7,63	1,35	39,42	16,10
	Parça	7,20	10,61	28,25	3,90
TEST 2	Unsur 1	7,69	14,90	17,61	5,72
	Unsur 2	7,18	13,73	23,94	7,56
	Unsur 3	6,19	2,73	45,49	16,13
	Parça	7,29	12,53	27,24	8,05
TEST 3	Unsur 1	6,56	13,33	24,53	6,45
	Unsur 2	7,65	5,54	35,32	2,35
	Unsur 3	7,49	7,90	51,13	12,97
	Parça	7,12	3,83	35,64	5,82
TEST 4	Unsur 1	6,58	13,14	25,12	5,12
	Unsur 2	12,42	5,67	27,79	3,74
	Unsur 3	7,87	14,19	49,05	6,91
	Parça	13,29	0,36	32,26	1,40

Çizelge 5.14 ve 5.15'teki veriler kullanılarak oluşturulan unsur ve parça başına ortalama hatayı gösteren sütun grafikleri sırasıyla Şekil 5.11 ve 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.11. Takım yolu uzunluğu kullanılarak hesaplanan kesme süreleri vasıtasıyla elde edilen enerji tüketim değerlerinin unsur ve parça başına düşen hata oranlarını gösteren sütun grafiği



Şekil 5.12. Deneysel kesme süreleri vasıtasıyla elde edilen enerji tüketim değerlerinin unsur ve parça başına düşen hata oranlarını gösteren sütun grafiği

## 6. STEP UNSURLARINI FREZELEMEN İÇİN OLUŞTURULAN FARKLI TAKIM YOLLARININ ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ VE ENERJİ TÜKETİMİ AZALTMA STRATEJİLERİ

BDÜ paket programları bir unsuru frezelemek için kullanıcıya birkaç takım yolu tipi seçeneği sunar. Kullanıcı bu tiplerden istediği şartları en iyi temsil eden alternatifi seçerek unsuru işlemek için gerekli takım yolunu oluşturur. Bu bölümdeki amaç STEP AP 224 kütüphanesinde tanımlı birkaç unsuru frezelemek üzere oluşturulan takım yollarının operasyon süresine ve toplam enerji tüketimine etkisini inceleyebilmektir. Testler her bir unsur için aynı kesme koşullarında yapılmıştır, böylelikle sadece takım yolunun etkisi incelenebilecektir. Ayrıca BDÜ paket programında kesme koşulları girildikten sonra otomatik olarak oluşturulan takım yoluna müdahale edilmemiştir.

Testler kapsamında STEP AP 224 kütüphanesinde tanımlı üç unsur üzerinde çalışılmıştır. Bu unsurlar sırasıyla dikdörtgensel açık cep (*rectangular open pocket*), dikdörtgensel kapalı cep (*rectangular closed pocket*) ve açık kanal (*open slot*) unsurlarıdır. Unsurların frezeleme operasyonu SECO'ya ait R-217.69-2020.0-06-4AN kodlu kesici uçlu freze takımıyla yapılmıştır. Kesici uç olarak da SECO'ya ait XOMX060204R-M05 F40M kodlu kesici uç kullanılmıştır. Kesici takımın ve kesici ucun teknik özellikleri sırasıyla Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Kesici takım teknik bilgileri [35]

Ürün Kodu	R-217.69-2020.0-06-4AN
$D_c$ (mm)	20
$z$	4
$K$ (°)	90
$\gamma_0$ (°)	-8,5
$max a_p$ (mm)	4
$f_z$ (mm)	0,06 - 0,11
$V_c$ (m/dak)	628 - 925

Çizelge 6.2. Kesici uç teknik bilgileri [35]

Ürün Kodu	XOMX060204R-M05 F40M
Kesici Uç Şekli	Pozitif Rombik
Uzunluk x Genişlik x Kalınlık (mm)	6,91 x 4,09 x 2,45
Kesme Kenarı Sayısı	2
$\gamma_0$ (°)	24
Boşaltma Açısı 1 $\alpha$ (°)	15
Boşaltma Açısı 2 $\alpha_2$ (°)	7

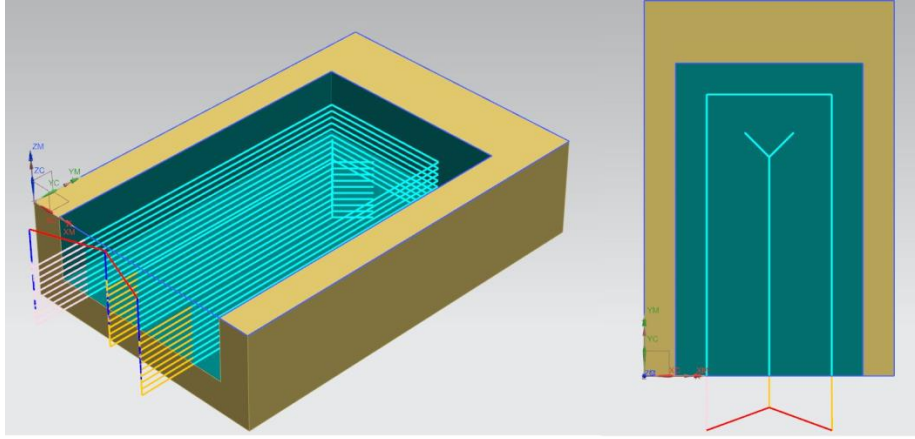
Üç unsur için Çizelge 6.3'te verilen kesme koşullarında kesim yapılmıştır.

Çizelge 6.3. Kesim koşulları

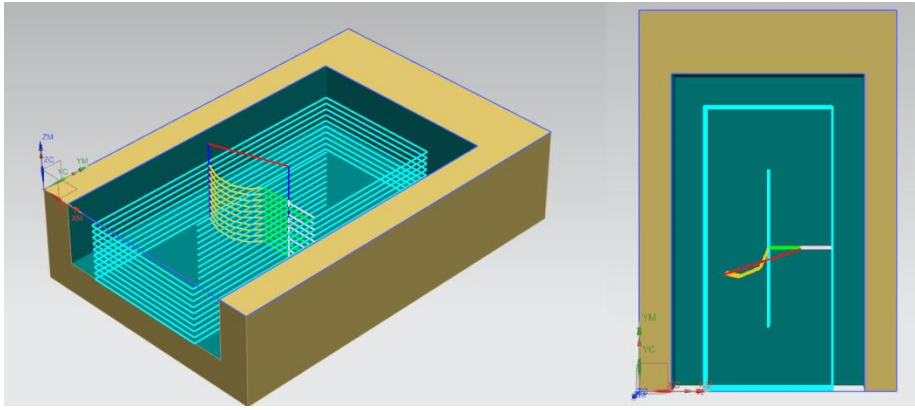
$a_p$ (mm)	$f_z$ (mm)	$n$ (RPM)	$V_f$ (mm/dak)	$\phi_s$ (°)
2	0,075	14000	5040	180

### 6.1. Dikdörtgenel Açık Cep İçin Yapılan Testler

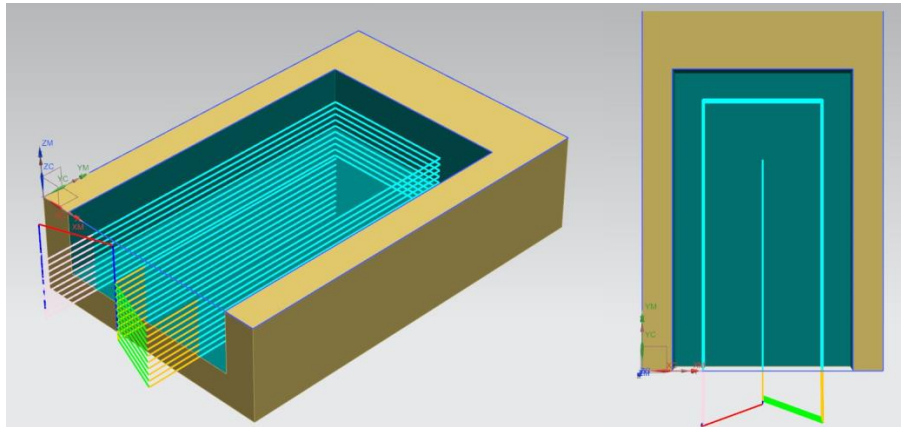
Dikdörtgenel açık cep unsurunu işlemek için NX 9.0 programı BDT modülünde 60x100x30 mm ölçülerinde prizmatik bir model oluşturulmuştur. Daha sonra program içerisinde BDÜ modülüne geçilip operasyon oluşturularak Çizelge 6.3'teki kesme koşulları ve kesici takıma ait özellikler girilmiştir. Daha sonra farklı takım yolu tipleri seçilerek alternatifler oluşturulmuştur. Oluşturulan bu programı tezgahta çalıştırmak adına yapılan işlemler 5. Bölüm'de Deneysel İşlem Basamakları kısmında anlatılanlarla aynıdır. BDÜ programı dikdörtgenel açık cep için 6 farklı takım yolu sunmuştur ve bunlar 'Parçayı takip et (*follow part*)', 'Periferi takip et (*follow periphery*)', 'Profil (*profile*)', 'Zig', 'Zig-Zag', 'Konturla Zig (*Zig With Contour*)' seçenekleridir. Bu seçenekler kullanılarak elde edilen takım yollarının izometrik ve üstten görünümüleri sırasıyla Şekil 6.1-6.6'da verilmiştir. Bu takım yolları kullanılarak elde edilen tüketilen toplam enerji ve kesim süresi değerleri de Çizelge 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.1. Parçayı takip et alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu

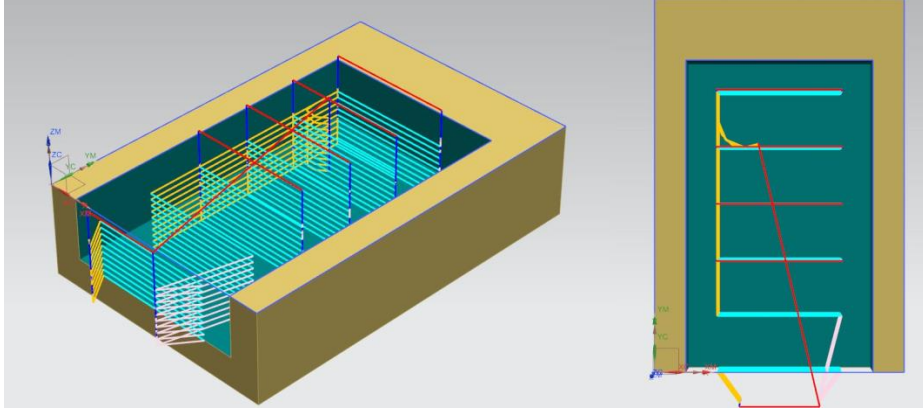


Şekil 6.2. Periferi takip et alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu

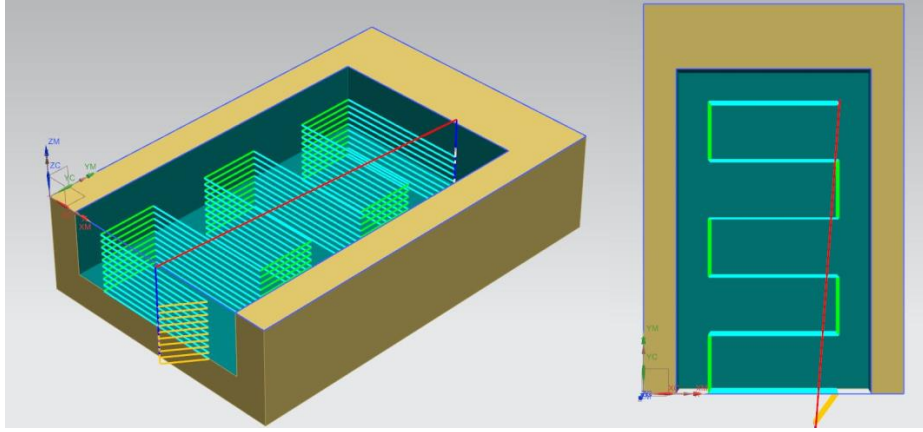


Şekil 6.3. Profil alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu

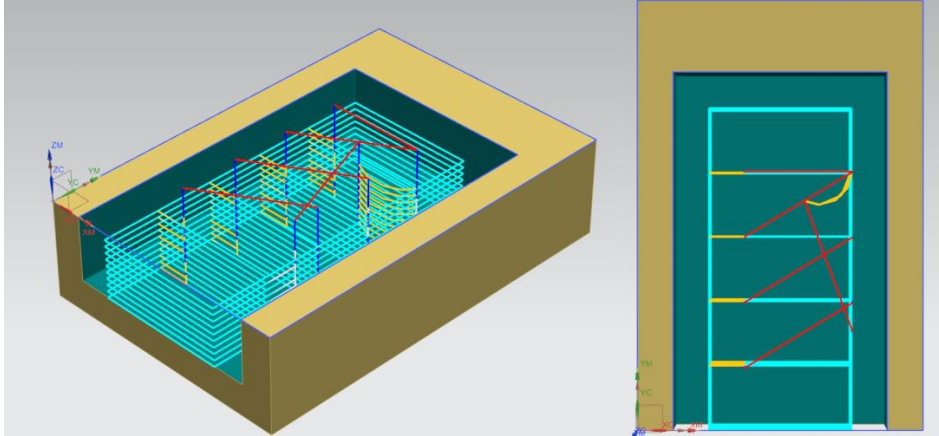




Şekil 6.4. Zig alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu



Şekil 6.5. Zig-Zag alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu



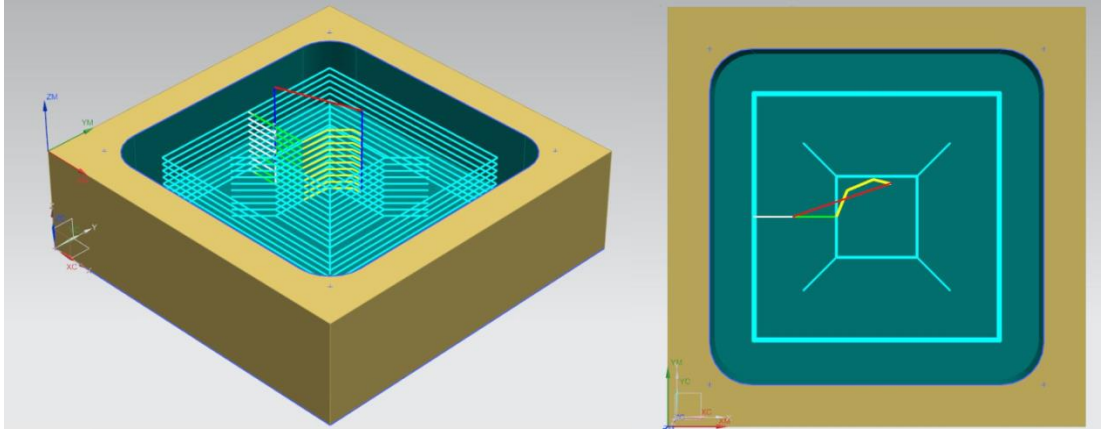
Şekil 6.6. Konturla Zig alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu

Çizelge 6.4. Dikdörtgensel açık cep testi sonuçları

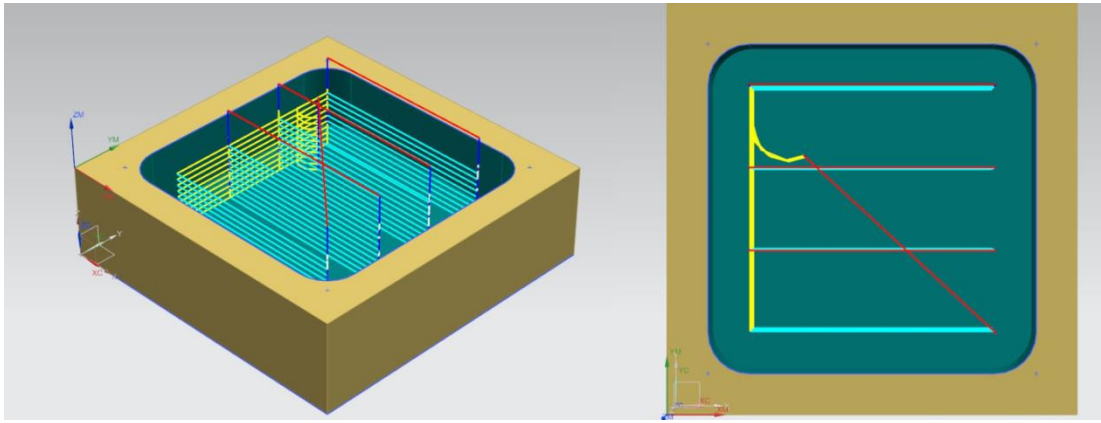
	Takım Yolu Tipi	$E_{dolukesim}$ (kJ)	$E_{boşkesim}$ (kJ)	$E_{metalkesme}$ (kJ)	$t_{metal kesme}$ (s)
Test 1	Parçayı Takip Et	1381,8	1033,255	348,545	115
Test 2	Periferi Takip Et	1157,54	870,34	287,2	96
Test 3	Profil	1267,871	925,718	342,153	120
Test 4	Zig	1208,855	977,165	231,69	110
Test 5	Zig-Zag	949,576	772,395	177,181	86
Test 6	Boşlukla Zig	1520,1725	1273,855	246,3175	152

## 6.2. Dikdörtgensel Kapalı Cep İçin Yapılan Testler

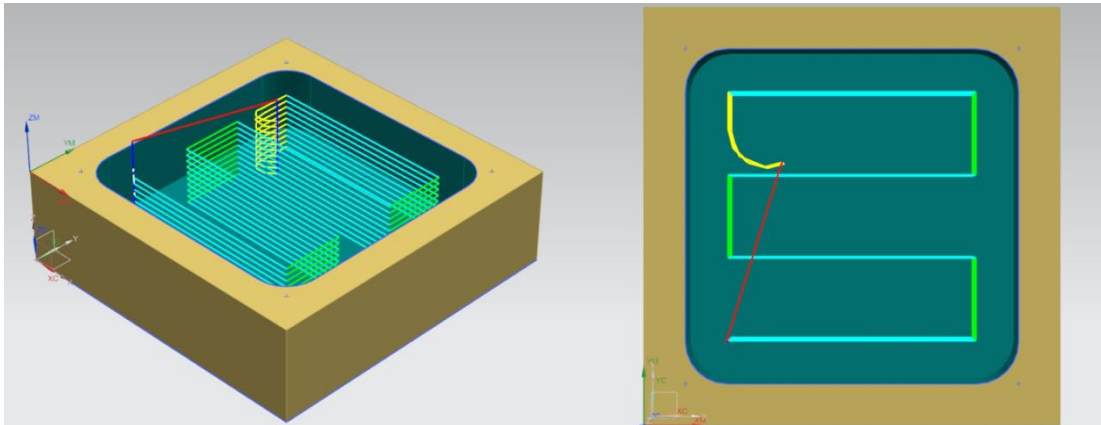
Dikdörtgensel kapalı cep unsurunu işlemek için NX 9.0 programı BDT modülünde 100x100x30 mm ölçülerinde prizmatik bir model oluşturulmuştur. Daha sonra program içerisinde BDÜ modülüne geçilip operasyon oluşturularak Çizelge 6.3'deki kesme koşulları ve kesici takıma ait özellikler girilmiştir. Daha sonra farklı takım yolu tipleri seçilerek alternatifler oluşturulmuştur. Oluşturulan bu programı tezgahta çalıştırmak adına yapılan işlemler 5. Bölüm'de Deneysel İşlem Basamakları kısmında anlatılanlarla aynıdır. BDÜ programı dikdörtgensel kapalı cep için 4 farklı takım yolu sunmuştur ve bunlar 'Parçayı takip et (*follow part*)', 'Zig', 'Zig-Zag', 'Konturla Zig (*Zig With Contour*)' seçenekleridir. Dikdörtgensel açık cepte oluşturulan 'Periferi takip et (*follow periphery*)' ve 'Profil (*profile*)' seçenekleri 'Parçayı takip et (*follow part*)' seçeneğiyle aynı takım yolunu oluşturduğu için ayrıca ele alınmamıştır. Bu seçenekler kullanılarak elde edilen takım yollarının izometrik ve üstten görünümüleri sırasıyla Şekil 6.7-6.10'da verilmiştir. Bu takım yolları kullanılarak elde edilen tüketilen toplam enerji ve kesim süresi değerleri de Çizelge 6.5'de verilmiştir.



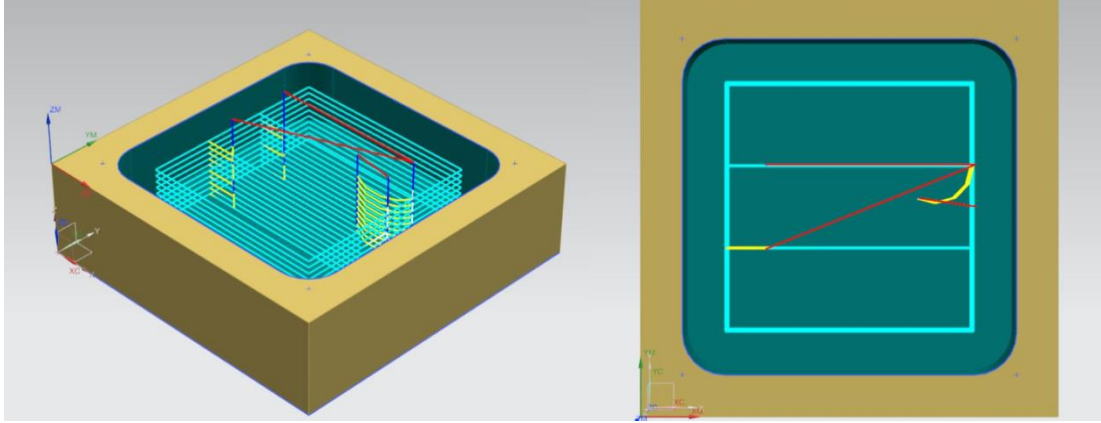
Şekil 6.7. Parçayı takip et alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu



Şekil 6.8. Zig alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu



Şekil 6.9. Zig-Zag alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu



Şekil 6.10. Konturla Zig alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu

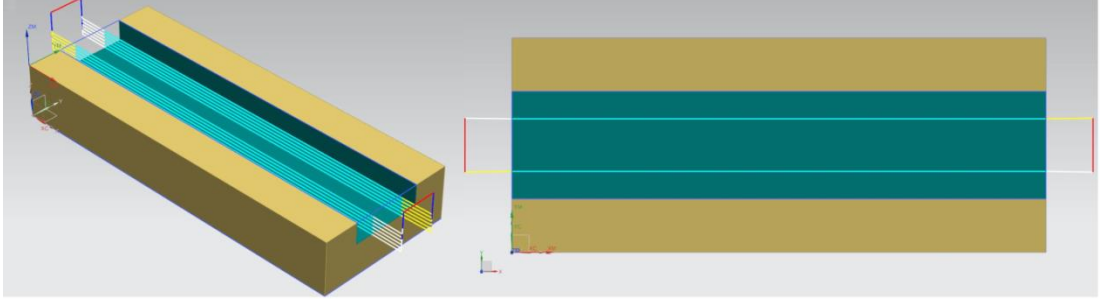
Çizelge 6.5. Dikdörtgenel kapalı cep testi sonuçları

	Takım Yolu Tipi	$E_{dolukesim}$ (kJ)	$E_{boşkesim}$ (kJ)	$E_{metalkesme}$ (kJ)	$t_{metal kesme}$ (s)
Test 1	Parçayı Takip Et	1149.52	863.12	286.405	82
Test 2	Zig	1071.37	798.79	272.585	84
Test 3	Zig-Zag	850.18	521.97	328.21	55
Test 4	Boşlukla Zig	1157.69	861.42	296.265	81

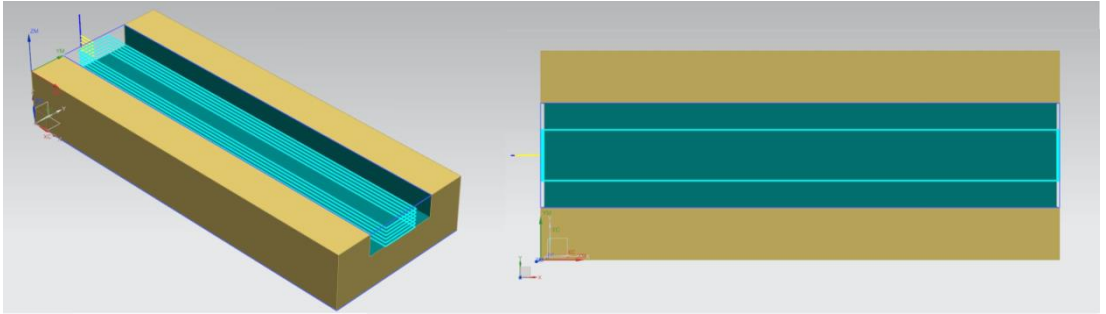
### 6.3. Açık Kanal İçin Yapılan Testler

Açık kanal unsurunu işlemek için NX 9.0 programı BDT modülünde 200x80x30 mm ölçülerinde prizmatik bir model oluşturulmuştur. Daha sonra program içerisinde BDÜ modülüne geçilip operasyon oluşturularak Çizelge 6.3'teki kesme koşulları ve kesici takıma ait özellikler girilmiştir. Daha sonra farklı takım yolu tipleri seçilerek alternatifler oluşturulmuştur. Oluşturulan bu programı tezgahta çalıştırmak adına yapılan işlemler 5. Bölüm'de Deneysel İşlem Basamakları kısmında anlatılanlarla aynıdır. BDÜ programı açık kanal için 5 farklı takım yolu sunmuştur ve bunlar 'Parçayı takip et (*follow part*)', 'Periferi takip et (*follow periphery*)' ve 'Profil (*profile*)' 'Zig' ve 'Zig-Zag' seçenekleridir. Diğer unsurlarda oluşturulan 'Konturla Zig' (*Zig With Contour*) seçeneği 'Parçayı takip et (*follow part*)' seçeneğiyle aynı

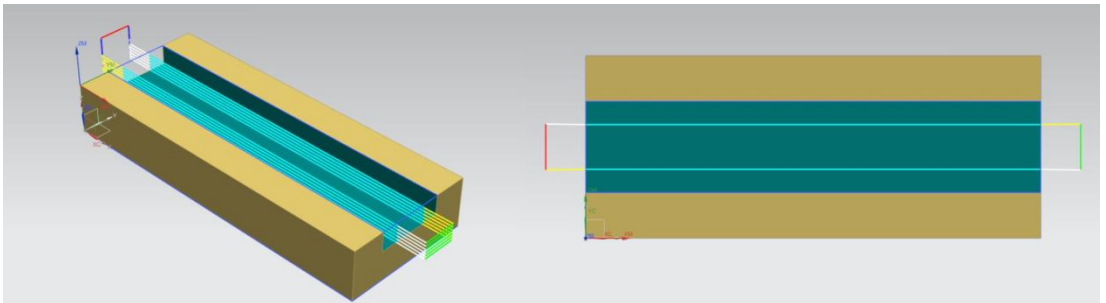
takım yolunu oluşturduğu için ayrıca ele alınmamıştır. Bu seçenekler kullanılarak elde edilen takım yollarının izometrik ve üstten görünümü sırasıyla Şekil 6.11-6.15'te verilmiştir. Bu takım yolları kullanılarak elde edilen tüketilen toplam enerji ve kesim süresi değerleri de Çizelge 6.6'da verilmiştir.



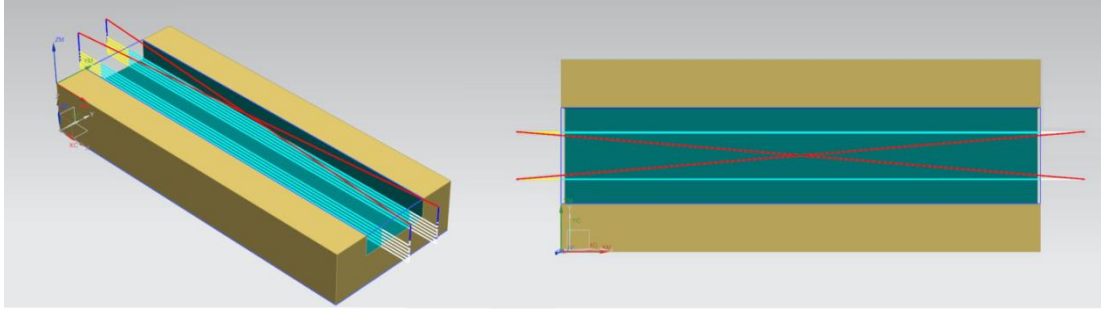
Şekil 6.11. Parçayı takip et alternatifini seçilerek oluşturulan takım yolu



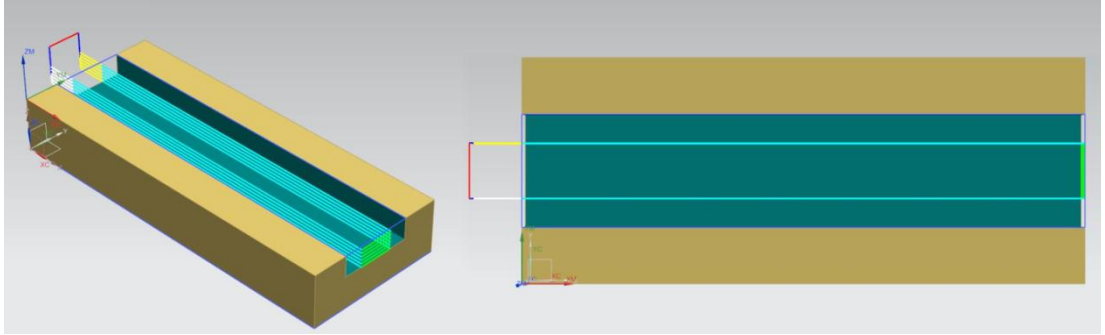
Şekil 6.12. Periferi takip et alternatifini seçilerek oluşturulan takım yolu



Şekil 6.13. Profil alternatifini seçilerek oluşturulan takım yolu



Şekil 6.14. Zig alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu



Şekil 6.15. Zig-Zag alternatifi seçilerek oluşturulan takım yolu

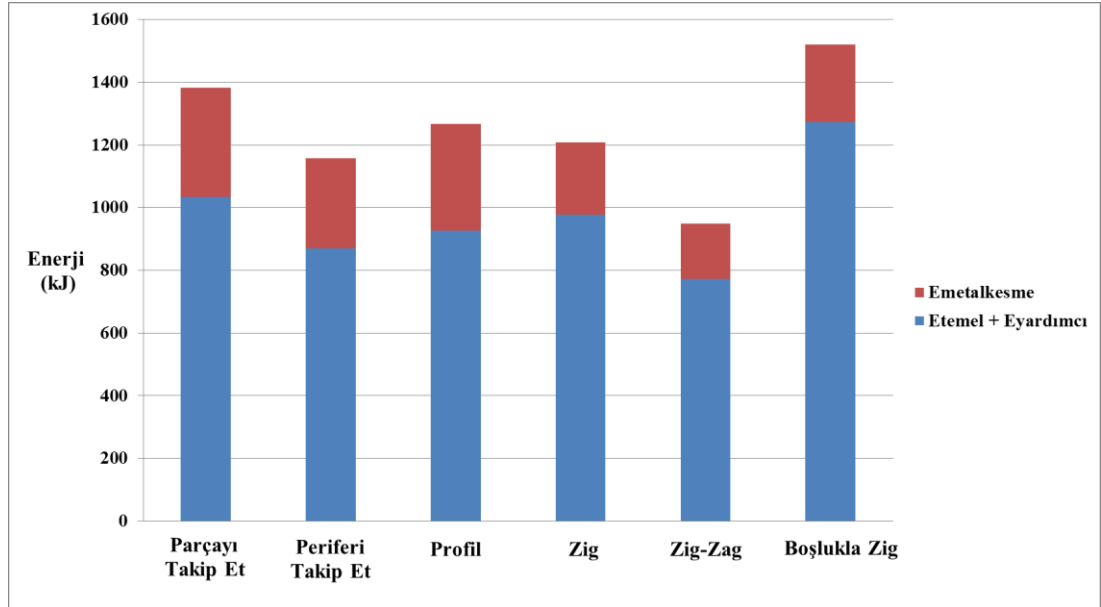
Çizelge 6.6. Açık kanal testi sonuçları

	Takım Yolu Tipi	$E_{dolukesim}$ (kJ)	$E_{boşkesim}$ (kJ)	$E_{metalkesme}$ (kJ)	$t_{metal kesme}$ (s)
Test 1	Parçayı Takip Et	583,180	409,600	173,580	43
Test 2	Periferi Takip Et	553,705	355,986	197,719	40
Test 3	Profil	572,645	393,815	178,830	41
Test 4	Zig	632,385	456,095	176,290	46
Test 5	Zig-Zag	550,285	352,560	197,725	39

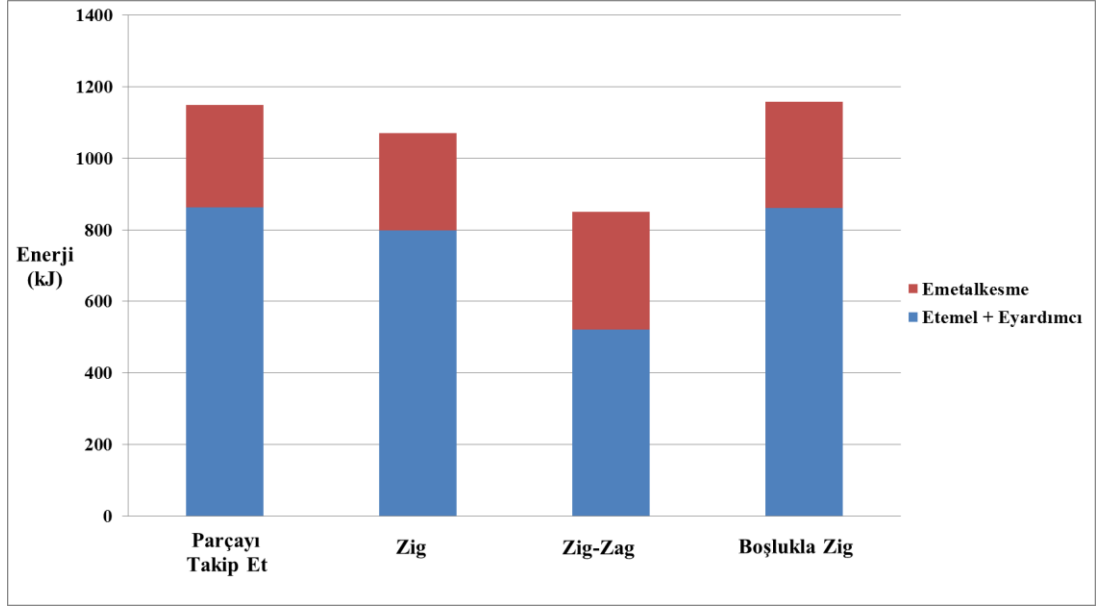
#### 6.4. Yapılan Test Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yapılan testler sonucu elde edilen veriler kullanılarak her bir unsur için oluşturulan farklı takım yollarının metal kesme ve yardımcı enerji dağılımını nasıl etkilediği oluşturulan sütun grafikleriyle incelenmiştir. Şekil 6.16'da dikdörtgensel açık cep unsuru, Şekil 6.17'de dikdörtgensel kapalı cep unsuru ve Şekil 6.18'de açık kanal unsuru için oluşturulan sütun grafikleri yer almaktadır.

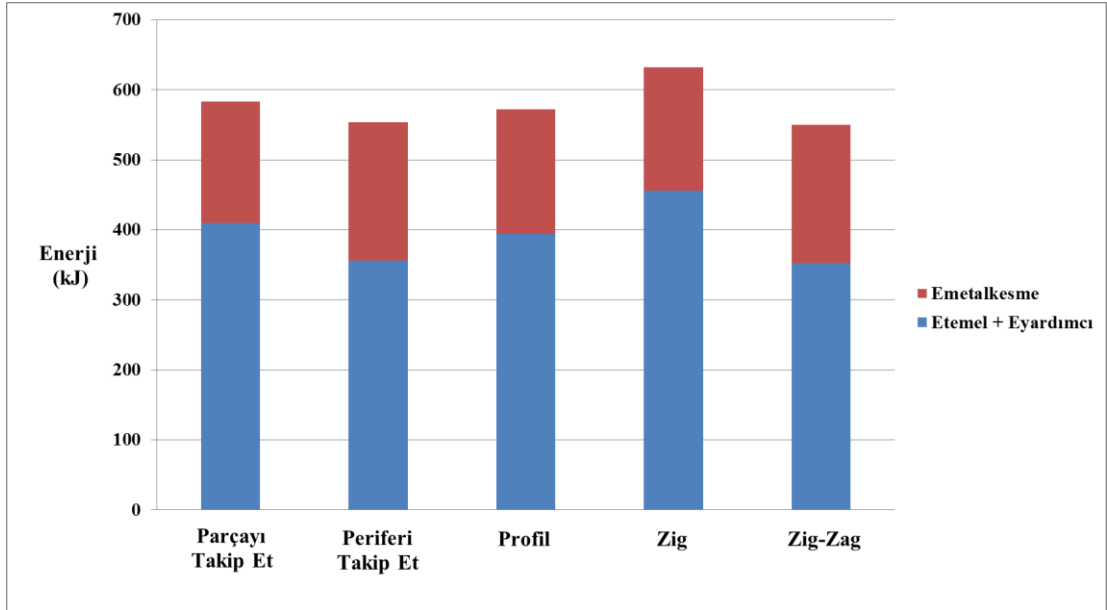
Dikdörtgensel açık cep unsuru için yapılan testler sonucunda Şekil 6.16'da görüldüğü gibi teorik olarak aynı hacimde talaşı kaldırmak için harcanan metal kesme enerjisi olması gerekirken aynı kalmamıştır. Burada yüksek ihtimalle takım yolundan kaynaklanan iş parçası – takım etkileşimine bağlı olarak kimi noktalarda beklenenden fazla güç çekilmiştir. Özellikle bir önceki pasosunda talaş bırakan takım yollarında rastlanan kalan talaşları da kesmek için harcanan ekstra güç buna bir örnektir. Unsurlar için yapılan tüm testler incelendiğinde genelde kesme süresi arttıkça temel ve yardımcı enerji tüketiminin beklendiği gibi arttığı görülmüştür.



Şekil 6.16. Dikdörtgensel açık cep unsuru enerji tüketimi sütun grafiği



Şekil 6.17. Dikdörtgenel kapalı cep unsuru enerji tüketimi sütun grafiği



Şekil 6.18. Açık kanal unsuru enerji tüketimi sütun grafiği



## 7. SONUÇLAR

Enerji tahmin modeli doğrulama çalışmaları kapsamında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda takım tezgahının enerji tüketiminde en büyük payın tezgahın bilgisayarı, aydınlatma işlemleri, ilerleme eksenlerini sabit tutmak için kullanılan servo motorları, soğutma üniteleri, kızak yağlama ünitesi gibi kalemlerden oluşan temel enerji tüketimine ait olduğu görülmüştür. Frezeleme operasyonu boyunca gerçekleşen temel enerji tüketimine ait ortalama anlık temel güç literatürde yapılan çalışmalarda genellikle sabit bir değer çıkmıştır. Fakat DMG DMU 65 monoBLOCK tezgahı kesime hazır durumda beklerken iki farklı değer ortalamasında anlık güç çekmektedir. Bu farkın ortam sıcaklığına bağlı olarak devreye giren elektronik aksamı soğutma ünitesinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Temel enerji tüketimindeki bu değişkenlik her ne kadar kimi zaman periyodik olarak gerçekleşse de genelde belirli zaman aralıklarıyla gerçekleşmemektedir. Bu yüzden yapılan deneysel çalışmalar esnasında soğutma ünitesinin devreye girmesiyle grafiklerde düzensizlikler görülmüştür. Bu bölümler tespit edilerek iki ortalama temel anlık güç değeri farkı verilere etki ettirilerek grafikler daha gerçekçi hale getirilmeye çalışılmıştır fakat bu düzensizlikler gerek deney sonuçlarına gerekse tahmin modelinin tutarlılığına olumsuz etki yapmıştır. Hatta model kullanılarak hesaplanan iş mili, ilerleme eksenleri ve kesme sıvısı ünitesi gibi metal kesme işleminin gerçekleşmesine yardımcı alt birimlerin tükettiği enerji değerlerinin de tutarlılığını etkilemektedir. Çünkü yardımcı alt birimlerce tüketilen enerji tezgahın boşa kesimi sonucu elde edilen deneysel veriler kullanılarak hesaplanmaktadır.

Tez kapsamında tahmini metal kesme enerjisi unsur hacmi bilgilerinden yararlanılarak zamandan bağımsız olarak unsur bazlı hesaplanırsa da temel ve yardımcı birimlerin enerji tüketimini hesaplamak için unsuru işlemek üzere oluşturulan takım yolundan yararlanılmaktadır. Tahmin modelinin yardımcı birimlerin harcadığı enerjisi tahminindeki tutarlılığını etkileyen en önemli husus, deneysel kesme süreleriyle takım yolu uzunluğunun ilerleme hızlarına bölünmesiyle elde edilen teorik kesme süreleri arasındaki farklılıklardır. Çünkü yardımcı birimlerin tükettiği enerji metal kesme sürelerinin alt birimlerin ortalama anlık güç değerleriyle

çarpılmasıyla elde edilmektedir. Teorik kesme süresi yalnızca kesim yapılan ilerleme sürelerini ele alıp parçaya dalma, pasolar arası geçiş, parçadan çıkma gibi pozisyonlama sürelerini hesaba katmadığından sıkıntı yaratmaktadır. Her ne kadar bu pozisyonlama uzunlukları BDÜ programlarında seçilen her takım yolu alternatifi için rastgele oluşturulsa da program içerisinde elle müdahale etmek de mümkündür. Eğer takım ilerleme yolu ve takım pozisyonlama yolu uzunluklarından yola çıkarak metal kesme süresini hesaplayan bir model oluşturulursa deneysel kesimlerdeki metal kesme süresine daha yakın bir kesme süresi değeri dolayısıyla daha tutarlı bir model elde edileceği sonucuna varılmıştır.

Deneysel çalışmalarla elde edilen metal kesme enerjileriyle model kullanılarak hesaplanan metal kesme enerjileri arasında büyük farklar gözlemlenmiştir. Deneysel anlık güç verilerini kaydeden enerji ölçerin örnekleme süresinin 1 sn. olması ölçüm işleminin hassasiyetini büyük oranda düşürmüştür. Çünkü en büyük anlık güç sapmaları metal kesme işlemi süresince gerçekleşmektedir. Testlerde kullanılan enerji ölçer ayrıca yaklaşık olarak her 7-8 saniyede bir 1 saniyede değil 2 saniyede bir ölçüm almaktadır. Bu da kullanılan enerji ölçerin hassasiyeti hakkında bilgi vermektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda kullanılan enerji ölçerler genellikle 1 saniyenin altında örneğin 500 ms ve 200 ms gibi örnekleme değerlerinde çalışmaktadır. Buna rağmen literatürde metal kesme özelinde bir hata oranı paylaşılmayıp toplam enerji tüketimi için hata oranları yer almaktadır. Ayrıca bu tez kapsamında yapılan tüm testler aynı kesici uç kullanılarak yapılmaktadır ve serbest yüzey aşınmasına bağlı olarak testlerde gerçekleşen enerji tüketim değerleri artabilmektedir. Çünkü özgül kesme enerjisi hesabı kesici uçun hiç aşınma gerçekleşmemiş hali için geçerlidir. Literatür araştırmaları bölümünde de anlatıldığı gibi serbest yüzey aşınmasına bağlı olarak metal kesme enerjisinde %25'lere varan artış tespit edilmiştir. Unsur 3 (açık kanal) için yapılan enerji tahmin modeli doğrulama testlerinde metal kesme enerjisinde çıkan hata oranları diğer unsurlara göre çok yüksek çıkmıştır. Unsur 3 (açık kanal) işlenirken takımın 180°'lik kesme açısıyla talaş kaldırmasının buna sebep olduğu düşünülmektedir. Seçilen takım her ne kadar kanal açma işlemleri için uygun olarak gösterilse de tavsiye edilen maksimum kesme genişliği 10 mm'dir. Bu da 20 mm'lik kesme açısında yapılan

operasyonda kesim yaparken daha çabuk aşınma dolayısıyla daha fazla enerji tüketimine sebep olmuştur.

Bir unsuru farklı takım yollarında işleyerek yapılan testler kapsamında iki sonuca varılmıştır. Birincisi kesme süresi arttıkça temel ve yardımcı enerji tüketimi arttığından toplam enerji tüketimi artmaktadır. İkincisi ise aynı kesme koşulları altında ve aynı takım ile bir unsuru frezelemek için harcanan metal kesme enerjisinin takım yoluna bağlı olarak değişkenlik göstermesidir. Bu fark Çizelge 6.4'de bulunan açık cep testi için yapılan deneysel test sonuçlarında açık olarak görülmektedir. Çizelge 6.6'da bulunan açık kanal testi için yapılan test sonuçlarında böyle bir fark olmamasının sebebi açık kanal için oluşturulan alternatiflerin birbirinden sadece parçaya dalma, çıkma ve pasolar arası geçiş esnasındaki takım yollarının farklı olması ve ilerleme eksenlerinde aldıkları yolların uzunluğunun aynı olmasıdır. Bu sonuçlardan yola çıkarak unsur bazlı metal kesme enerjisi belirlenirken unsur hacmini kullanarak yapılan hesaplamalara göre ilerleme ve pozisyonlama için oluşturulan takım yollarının uzunluğu kullanılarak yapılacak hesaplamaların daha tutarlı olacağı söylenebilir. Ayrıca bir unsuru işlemek üzere gerçekleştirilen frezeleme operasyonlarında yüzey kalitesi, takım ömrü, vs. gibi kaygılar daha arka planda kalıyorsa en kısa sürede parçayı işleyen takım yolunun daha az enerji tükettiği görülmüştür. İlerleme hızı ve kesme derinliği azaldıkça kesme süresi artmaktadır. Bu operasyonlarda kesme için harcanan ortalama anlık ortalama güç değerlerinin düşüp temel ve yardımcı enerji tüketiminin değişmemesinden ötürü kesme süresi arttıkça temel ve yardımcı enerji tüketiminin toplam enerji tüketimine yüzde oranı artmaktadır.

### **7.1. Gelecek için Önerilen Çalışmalar**

Tez kapsamında gerçekleştirilen tezgah enerji karakterizasyonu çalışmaları ve arkasından gerçekleştirilen enerji tahmin modeli doğrulama çalışmaları başka bir tezgahta ve örnekleme süresi daha kısa olan bir enerji ölçer kullanılarak tutarlılığı ölçülebilir. Tercihen DMG DMU 65 monoBLOCK tezgahından daha az kompleks mümkünse sadece 3-eksen frezeleme kabiliyetine sahip bir tezgahta yapılmalıdır. Bu

durumda daha tutarlı sonuçlar elde edilmesi beklenmektedir. Pozisyonlama hareketleri için oluşturulan takım yollarının uzunluğundan yararlanarak hesaplanan pozisyonlama süreleri kullanılarak toplam metal kesme süresini bulacak şekilde model güncellenebilir ve güncellenmiş modelin doğrulama testleri yapılabilir.

Ayrıca serbest yüzey aşınmasının etkilerini daha somut görebilmek amacıyla belirli bir unsur tekrar tekrar işlenerek değişen metal kesme enerjisi incelenebilir. Alüminyum yerine farklı malzeme işlenerek testler yapılarak oluşturulan modelin tutarlılığı incelenebilir. Farklı malzemelerde serbest yüzey aşınmasının etkisinin nasıl değiştiğini inceleyen testler yapılabilir.

Sunulan enerji tahmin modeli NX gibi bir BDT – BDÜ programına entegre edilerek tasarım yapan mühendisin yaptığı operasyon sonucunda ne kadar enerji tüketeceği bilgisine ulaşması sağlanabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), “World Energy Outlook 2013”, erişim adresi: <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2013/>, erişim tarihi: Temmuz 2014.
- [2] BP (British Petroleum), “Statistical Review of World Energy 2014”, erişim adresi: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2014/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf>, erişim tarihi: Haziran 2014.
- [3] Uluslararası Yenilenebilir Enerji Örgütü (IRENA), “REmap 2030 a Renewable Energy RoadMap”, erişim adresi: [http://irena.org/remap/REmap%20Summary%20of%20findings\\_final\\_links.pdf](http://irena.org/remap/REmap%20Summary%20of%20findings_final_links.pdf), erişim tarihi: Haziran 2014.
- [4] T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Petrol Piyasası Dairesi Başkanlığı (EPDK), “Petrol Piyasası Sektör Raporu 2013”, erişim adresi: [http://www.epdk.gov.tr/documents/petrol/rapor\\_yayin/2013\\_Petrol\\_Piyasasi\\_Sektor\\_Raporu.pdf](http://www.epdk.gov.tr/documents/petrol/rapor_yayin/2013_Petrol_Piyasasi_Sektor_Raporu.pdf), erişim tarihi: Temmuz 2014.
- [5] Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EÜAŞ), “Elektrik Üretim Sektör Raporu 2012”, erişim adresi: [http://www.enerji.gov.tr/yayinlar\\_raporlar/Sektor\\_Raporu\\_EUAS\\_2012.pdf](http://www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar/Sektor_Raporu_EUAS_2012.pdf), erişim tarihi: Temmuz 2014.
- [6] TMMOB, “Türkiye’nin Enerji Görünümü”, erişim adresi: [http://www.tr.boell.org/downloads/turkiyenin\\_enerji\\_gorunumu\\_oguz\\_turkiyil\\_maz\\_2012.pdf](http://www.tr.boell.org/downloads/turkiyenin_enerji_gorunumu_oguz_turkiyil_maz_2012.pdf), erişim tarihi: Temmuz 2014.
- [7] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Enerji Verimliliği”, erişim adresi: <http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=enerjiverimliliği&bn=217&hn=&id=587>, erişim tarihi: Nisan 2013.
- [8] “Türkiye’nin Enerji Verimliliği Haritası ve Hedefler” erişim adresi: <http://www.enver.org.tr/UserFiles/Article/eff9ce19-a1ec-4cef-862d-7b8a5951a149.pdf> erişim tarihi: Temmuz 2014.
- [9] T.C. Enerji Bakanlığı, “Dünya’da ve Türkiye’de Enerji Görünümü”, erişim adresi: [http://www.enerji.gov.tr/yayinlar\\_raporlar/Dunyada\\_ve\\_Turkiyede\\_Enerji\\_Gorunumu.pdf](http://www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar/Dunyada_ve_Turkiyede_Enerji_Gorunumu.pdf), erişim tarihi: Temmuz 2014.
- [10] Black, J.T., Kohser, R. A., DeGarmo’s Materials and Processes in Manufacturing, John Wiley & Sons Inc., USA, 2008.
- [11] Kordonowy, D.N., 2002, A Power Assessment of Machining Tools, Bachelor of Science Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA.
- [12] Dahmus, J.B., Gutowski, T.G., An Environmental Analysis Of Machining, In: The IMECE2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo, 1(10), 13-19, Anaheim, California USA, 2004.
- [13] Gutowski, T., Dahmus, J., Thiriez, A., Electrical Energy Requirements For Manufacturing Processes, The 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 1(2), Leuven, Belgium, 2006.

- [14] Rajemi, M.F., Mativenga, P.T., Aramcharoen, A., Sustainable Machining: Selection of Optimum Turning Conditions Based On Minimum Energy Considerations, *J. Clean. Prod.* 18, 1059-1065, 2010.
- [15] Mori, M., Fujishima, M., Inamasu, Y., Oda, Y., A Study On Energy Efficiency Improvement For Machine Tools, *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 60, 145-148, 2011.
- [16] Diaz, N., Redelsheimer, E., Dornfeld, D., Energy Consumption Characterization And Reduction Strategies For Milling Machine Tool Use, In: *The 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, 2(4), 263-267, Braunschweig, Germany, 2011.
- [17] Kara, S., Li, W., Unit Process Energy Consumption Models For Material Removal Processes, *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 60, 37-40, 2011.
- [18] He, Y., Liu, F., Wu, T., Zhong, F.-P., Peng, B., Analysis And Estimation Of Energy Consumption For Numerical Control Machining, *Proc. IMechE Part B J. Eng. Manuf.* 226, 255-266, 2012.
- [19] Draganescu, F., Gheorghe, M., Doicin, C.V., Models Of Machine Tool Efficiency And Specific Consumed Energy, *Journal of Materials Processing Technology* 141 (1), 9-15, 2003.
- [20] Avram, O.I., Xirouchakis, P., Evaluating The Use Phase Energy Requirements Of A Machine Tool System, *J. Clean. Prod.* 19, 699-711, 2011.
- [21] Neugebauer, R., Wabner, M., Rentzsch, H., Ihlenfeldt, S., Structure Principles Of Energy Efficient Machine Tools, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 4, 136-147, 2011.
- [22] Hu, S., Liu, F., He, Y., Hu, T., An On-Line Approach For Energy Efficiency Monitoring Of Machine Tools, *J. Clean. Prod.* 27, 133-140, 2012.
- [23] Hu, S., Liu, F., He, Y., Peng, B., Characteristics Of Additional Load Losses Of Spindle System Of Machine Tools , *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing* 4.7, 1221-1233, 2010.
- [24] Balogun, V.A., Mativenga, P.T., Modelling Of Direct Energy Requirements In Mechanical Machining Processes, *J. Clean. Prod.* 41, 179-186, 2013.
- [25] Ostaeyen, J.V., 2010, CO2PE! (Cooperative Effort on Process Emissions in Manufacturing)eTaxonomy, erişim adresi: [www.mech.kuleuven.be/co2pe!/taxonomy.php](http://www.mech.kuleuven.be/co2pe!/taxonomy.php), erişim tarihi: Temmuz 2014.
- [26] Kellens, K., Dewulf, W., Overcash, M., Hauschild, M.Z., Duflou, J.R., Methodology For Systematic Analysis And Improvement Of Manufacturing Unit Process Life Cycle Inventory (UPLCI) CO2PE! Initiative (Cooperative Effort On Process Emissions In Manufacturing), Part 2: Case Studies, *Int. J. Life Cycle Ass.* 17 (2), 242-251, 2012.
- [27] Aramcharoen, A., Mativenga, P.T., Critical Factors In Energy Demand Modelling For CNC Milling And Impact Of Toolpath Strategy, *Journal Of Cleaner Production*, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.04.065, 2014.
- [28] Uluer, U., Ünver, Ö., Akkuş, K., Kılıç, E., A Model For Predicting Theoretical Process Energy Consumption Of Rotational Parts Using STEP AP224 Features, in *20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, Singapore, 2013.
- [29] Jeswiet, J., Kara, S., Carbon Emissions and CESTM in Manufacturing, in *CIRP Annals – ManufacturingTechnology*, 57, 17-20, 2008.

- [30] Yoon, H.S., Lee, J.Y., Kim, M.S., Ahn, S.H., Empirical Power-Consumption Model For Material Removal İn Three-Axis Milling, Journal of Cleaner Production, doi:10.1016/j.jclepro.2014.03.061, 2014.
- [31] Shao, H., Wang, H. L., Zhao, X.M., A Cutting Power Model for Tool Wear Monitoring in Milling, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44 (14), 1503-1509.
- [32] Altıntaş R.S., Uluer, U., Ünver, Ö., Akkuş, K., Kılıç, E., 2013, A Theoretical Energy Consumption Prediction Model For Prismatic Parts Using STEP AP224 Features, Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Innovative Solutions, Berlin, Germany.
- [33] International Standards Organization, ISO 10303-224 Industrial Automation Systems and Integration - Product Data Representation and Exchange – Part 224: Application Protocol: Mechanical Product Definition for Process Planning Using Machining Feature, Geneva, Switzerland, 2006.
- [34] Amaitik, S.M., Kılıç, S.E., STEP-Based Feature Modeler For Computer-Aided Process Planning, in: International Journal of Production Research, 43(15), 3087-3101, 2005.
- [35] SECO Tools, MN2012 - Milling in: Machining Navigator Catalogue, erişim adresi:  
[https://www.secotools.com/CorpWeb/Downloads/seconews2\\_2011/MN/milling/Milling\\_2012\\_GB\\_LR\\_Ny.pdf](https://www.secotools.com/CorpWeb/Downloads/seconews2_2011/MN/milling/Milling_2012_GB_LR_Ny.pdf) erişim tarihi: Temmuz 2014.
- [36] Walter Tools, General Catalogue, erişim adresi:  
<http://www.waltertools.blaetterkatalog.de/gc2012/us/blaetterkatalog/pdf/complete.pdf>, erişim tarihi: Temmuz 2014.
- [37] Boothroyd, G., Knight, W. A., Fundamentals of Machining and Machine Tools, Taylor & Francis, USA, 2006.
- [38] DMG, DMU 65/85/105 monoBLOCK Ürün Kataloğu, erişim adresi:  
[http://tr.dmgmori.com/query/internet/v3/pdl.nsf/66a22038ed0f02bac12579a60056d506/\\$file/pmatr11\\_dmu\\_monoblock\\_series.pdf](http://tr.dmgmori.com/query/internet/v3/pdl.nsf/66a22038ed0f02bac12579a60056d506/$file/pmatr11_dmu_monoblock_series.pdf), erişim tarihi: Temmuz 2014.
- [39] Gumus, T.C., Hugi, C., Hengevoss, D., Kilic, S.E., Massard, G., Ozbayoglu, M., Ünver, H.O., Conceptualization Of A Web-Based Software Platform That Enables Cleaner Production And Industrial Symbiosis, Proceedings Of 16th Conference On Machine Design And Production UMTIK, Izmir, 1, 571-577, 2014.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ALTINTAŞ, Resul Sercan  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 30.07.1988, Ankara  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 (533) 334 47 17  
e-mail : rsaltintas@etu.edu.tr

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2014
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2011
Lise	Kaya Bayazıtöğlu YDAL	2006

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-	Roketsan Roket Sanayii ve Tic. A.Ş.	Mühendis
2011–2014	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi
2011	OTOKAR Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş.	Stajyer
2009	DORÇE Prefabrik A.Ş.	Stajyer
2008	Mikropor A.Ş.	Stajyer



## **Yabancı Dil**

İngilizce (ileri düzeyde), Almanca (temel düzeyde)

## **Yayınlar**

*Uluslararası Konferans Yayını*

Altıntaş R.S., Uluer, U., Ünver, Ö., Akkuş, K., Kılıç, E., 2013, A Theoretical Energy Consumption Prediction Model For Prismatic Partsusing STEP AP224 Features, Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Innovative Solutions, Berlin, Germany.