



## ODUN VE ODUN KÖKENLİ MALZEMELERDE İŞLEME MEKANİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Ali ÇAKMAK

Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orman Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye

Sorumlu yazar: [alicakmak@ktu.edu.tr](mailto:alicakmak@ktu.edu.tr)

Ali ÇAKMAK: <https://orcid.org/0000-0002-0827-022X>

**Please cite this article as:** Çakmak, A. (2022) Odun ve odun kökenli malzemelerde işleme mekaniklerini etkileyen faktörler, *Turkish Journal of Forest Science*, 6(2), 629-649.

### ESER BİLGİSİ / ARTICLE INFO

Derleme / Review

Geliş 25 Ağustos 2022 / Received 25 August 2022

Düzeltilmelerin gelişi 15 Ekim 2022 / Received in revised form 15 October 2022

Kabul 18 Ekim 2022 / Accepted 18 October 2022

Yayımlanma 31 Ekim 2022 / Published online 31 October 2022

**ÖZET:** Odun ve odun kökenli malzemeler mobilya, doğrama ve yapı endüstrilerinde çeşitli makinelerde işlenerek kullanılmaktadır. İşleme mekaniklerine dayalı çeşitli kesme kuvvetleri ortaya çıkmaktadır. Kesme gücü ve güç tüketimi faktörlerinin kesme kuvvetlerine bağlı olduğu belirtilmektedir. Kesiş sürecinin analizinde özellikle kesme kuvvetleri ana çıktı olarak kullanılmakta olup, kesişte etkili faktörlerin daha iyi anlaşılmasında fiziko-mekanik kesiş modelleri oldukça önemlidir. Odun ve odun kökenli malzemelerin fiziksel ve teknolojik özellikleri, makinede işleme koşulları ve kesici aletlerin mekanik durumu işleme mekaniklerini etkileyen faktörler olarak belirtilmektedir. Titreşim, ses, sıcaklık ve işleme kusurları yanında kesme gücü ile yüzey ve yonga kalitesi genellikle göz önünde bulundurulmamaktadır. İşlemede en düşük güç tüketimi ile düzgün yüzeyler elde edilebilmesi bakımından verimli ve ekonomik çalışmalar ile uygun işleme koşullarının belirlenmesi, malzeme ve kesici geometrisi ile işleme mekaniklerine dayandırılmaktadır. Bu çalışmada, odun ve odun kökenli malzemelerin işlenmesinde işleme mekaniklerini etkileyen faktörler tartışılmıştır. Kesme kuvvetleri, kesme gücü ve bunların ölçüm yöntemleri ile kesici ve işleme geometrisi incelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Odun, odun kökenli malzemeler, işleme mekanikleri, kesme kuvveti

### FACTORS AFFECTING MECHANICS OF MACHINING IN WOOD AND WOOD-BASED MATERIALS

**ABSTRACT:** Wood and wood-based materials are used by being processed in various machines in furniture, joinery and construction industries. Various cutting forces arise based on mechanics of machining. It is stated that the cutting power and power consumption factors depend on the cutting forces. The cutting forces are especially used as the main output in the analysis of the cutting process and physico-mechanical cutting models are very important in understanding the cutting factors. Vibration, noise, temperature and machining defects as well as cutting power, surface and chip quality are usually not considered. Determination of optimal

machining conditions with efficient and economical works are based on material, tool geometry and mechanics of machining in terms of obtaining smooth surfaces with the lowest power consumption in machining. In this research, the factors affecting the mechanics of machining in the processing of wood and wood-based materials are discussed. Cutting forces, cutting power and their measurement methods with tool and machining geometry were investigated.

**Keywords:** Wood, wood-based materials, mechanics of machining, cutting force

## GİRİŞ

Yenilenebilir ve büyük bir kaynak olan odunun ekonomik önemi ve işleme makinelerindeki teknolojik gelişmelerle yüzey kalitesi yüksek ürünler elde edilebilmektedir. Bunun yanında, kesici ve güç tüketimi maliyetlerinin azaltılması bakımından işleme mekaniklerinin (kesme kuvvetleri ve kesme gücü) önemi giderek artmaktadır. Günümüzde, odun ve odun kökenli malzemelerin (lif levha-MDF, yonga levha, yönlendirilmiş yonga levha-OSB, kontrplak, kontratabla, ahşap levha vb.) işlenmesinde enerji verimliliği, makine endüstrisindeki yenilikler ile birlikte işlemenin bir fonksiyonu olarak kabul edilmektedir (Aguilera ve Martin, 2001).

Genellikle iyi işlenebilirlik düzgün yüzeyler elde edilmesinin yanında kesicilerin uzun ömürlü olması, kesme kuvvetlerinin ve işleme maliyetlerinin düşük olmasını da ifade etmektedir (Csanády ve Magoss, 2013; Durkovic vd., 2018). İşleme kalitesi ile kesme kuvvetleri arasında doğru orantılı bir ilişki bulunduğu ve işlemede yüzey kalitesi artışı için daha fazla güç gerektiği ortaya konulmaktadır (Koch, 1964; Koch 1972; Kollmann vd., 2012).

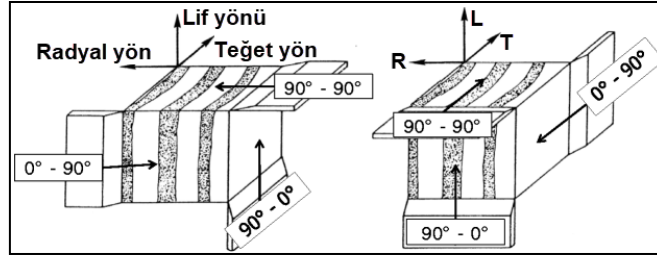
Odunun işlenmesinde bir yonga parçasının elde edilebilmesi için kesici aletin odunun mekanik direncinden daha fazla bir kesme kuvveti uygulaması gerekmektedir. İşleme mekanikleri malzemelerin fiziksel ve teknolojik özelliklerinden, kesici aletlerin mekanik durumundan ve makine işleme koşullarından etkilenmektedir (Kivimaa, 1950; Hernández vd., 2014, Fekiač vd., 2022). Özellikle odundaki fiziksel ve mekanik değişimler en uygun kesici aletler ile makine işleme koşullarının kullanılmasını zorlaştırmaktadır. En düşük güç tüketimi ve en iyi yüzey kalitesinin sağlanabilmesi bakımından optimum işleme koşullarının uygulanması kesme gücü ve kesici alet körelmesinin azaltılmasında oldukça önemlidir. Günümüzde gelişmiş bilgisayar destekli makineler kullanılsa da kesme ve besleme hızları gibi bazı parametrelerin optimum kullanılmadığı belirtilmektedir. Özellikle odun ve yapay kaplamalı levhaların işlenmesinde malzeme kalitesi ve kesici aletlerin keskinliği göz önünde bulundurularak düşük besleme hızları uygulanmaktadır. Bu durum da işleme süresinin ve üretim maliyetinin artmasına neden olmaktadır (Koch, 1964; Woodson ve Koch, 1970; Gawroński, 2013).

Kesme gücü ile güç tüketiminin ölçülmesi, kesici körelmesi, işleme kusurlarının oluşumu ve işleme verimliliği ile kalitesini etkileyen faktörler konusunda önemli bilgiler sağlamaktadır (Koch, 1972; Aguilera ve Martin 2001; Kollmann vd., 2012; Salca, 2015; Yao ve Boh, 2019). Bu kapsamda, parametrelerin işleme mekanikleri üzerindeki etkisinin bilinmesi işletme maliyetlerini azaltarak enerji verimliliğini ve karlılığı arttıracaktır (Costes ve Larricq, 2002; Gürleyen ve Subaşı, 2009; Marchal vd., 2009; Yao ve Boh, 2019).

Bu çalışmada, odun ve odun kökenli malzemelerde işleme ve kesici geometrisi açıklanarak, işleme mekaniklerini etkileyen faktörler tartışılmıştır.

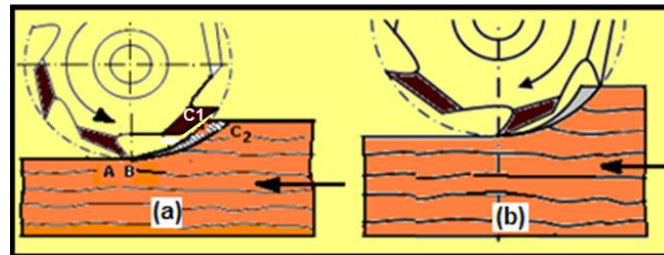
## İŞLEMENİN TANIMI VE İŞLEME YÖNTEMLERİ

Odun ve odun kökenli malzemelerde işleme, genel olarak kesici aletler kullanılarak katma değerli malzemeler üretilmesi olarak tanımlanmaktadır. Ancak işleme gerçek bir kesme ile değil bıçağın uyguladığı kuvvet etkisiyle malzemelerde meydana gelen yapısal yıkımlanmalarla sağlanmaktadır. Temel olarak odunun işlenmesinde çevresel kesiş (peripheral cutting) ve dikgen kesiş (orthogonal cutting) yöntemleri uygulanmaktadır. Şekil 1’de belirtildiği gibi dikgen kesiş yönteminde kesici, hareket yönü ve malzeme yüzeyine dik olup, malzeme yüzeyine paralel kesiş yapılmaktadır (Koch, 1964; Koch, 1972; Porankiewicz, 2014).



Şekil 1. Odunun dikgen kesiş yöntemiyle işlenmesinde bıçak ve lif yönlerine göre kesme açıları (Kivimaa, 1950)

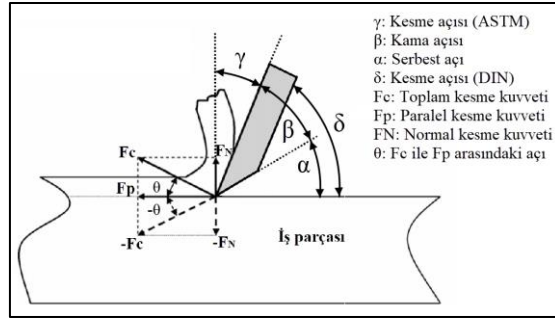
Çevresel kesiş yönteminde sabit veya monte edilmiş bir kesici aletle parça yüzeylerinde belirli aralıklarda iç bükey izler oluşturacak şekilde kesiş yapılmaktadır. Freze ile planya ve kalınlık makinelerinde çevresel kesiş yöntemi kullanılmaktadır (Davis, 1962; Koch, 1972; Davim, 2011; Csanády ve Magoss 2013). Besleme yönünde (aşağı kesiş) ve besleme yönüne karşı (yukarı kesiş) kesiş olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Besleme yönüne karşı kesimde kesme ve besleme yönleri birbirine karşıt olup, kesişin kontrollü yapılabilmesi ve iş güvenliği bakımından geleneksel ve modern makinelerde; besleme yönünde kesimde ise kesme ve besleme yönleri aynı olup, sabit iş parçalarının işlendiği bilgisayarlı makinelerde uygulanmaktadır (Şekil 2) (Davim, 2011; Csanády ve Magoss, 2013; Çakmak ve Malkoçoğlu, 2017).



Şekil 2. İşleme yöntemleri (a. Besleme yönüne karşı yukarı kesiş, b. Besleme yönünde aşağı kesiş) (AB: kazıma alanı, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>: yonga oluşumu)

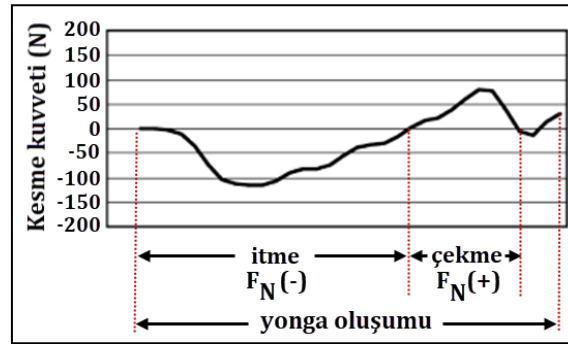
İşleme yöntemlerine göre en fazla yonga kalınlığı besleme yönüne karşı yukarı kesimde kesicinin parça yüzeyinden çıkarak kesişin bittiği kısımda, besleme yönünde aşağı kesimde ise kesişin başladığı anda oluşmaktadır. Besleme yönüne karşı yukarı kesişin avantajları kesici aletin keskinliğini daha uzun süre koruması, düşük güç gereksinimi ve yüksek kapasite; dezavantajları ise düşük yüzey kalitesi ve iş parçasının geri fırlatılma tehlikesi olarak belirtilmektedir (Keturakis ve Juodeikienė, 2007; Söğütü, 2010; Davim 2011; Csanády ve Magoss, 2013). Besleme yönünde aşağı kesişin avantajları ise düşük güç gereksinimi, yüksek yüzey kalitesi ve yüksek besleme hızı olup, dezavantajları olarak toplam güç tüketiminin yüksek olması, kesici aletin kısa sürede körelmesi ve iş parçasının çekme etkisinde kalması olarak belirtilmektedir (Koch, 1964; Aguilera vd., 2001; Söğütü, 2010).





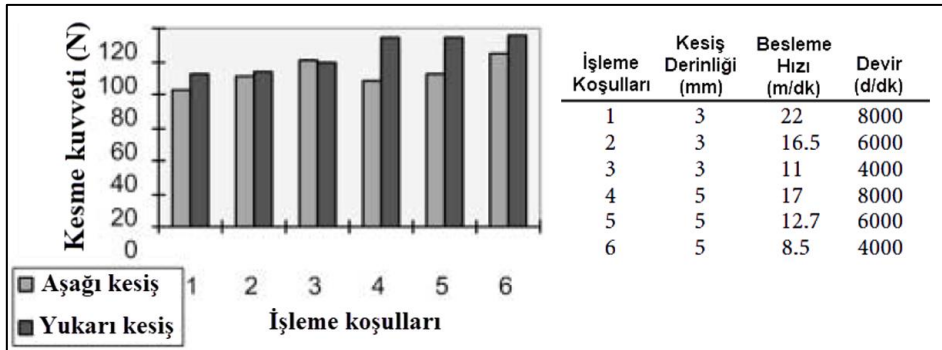
Şekil 4. Kesici Geometrisi ve Etkili Kesme Kuvvetleri (Woodson ve Koch, 1970; Aknouche vd., 2009)

Normal kesme kuvveti kesiş sırasında pozitif (çekme etkisi) veya negatif (itme etkisi) yönde olup, en yüksek değerine yonga oluşumu tamamlandığında ulaşmaktadır. Normal kesme kuvvetlerinin özellikle yüzey kalitesi üzerine etkisi oldukça önemli olup (Şekil 5), artışı ile yüzey kalitesi azalmaktadır (Porankiewicz vd., 2011; Iskra ve Hernández 2012; Naylor vd., 2012).



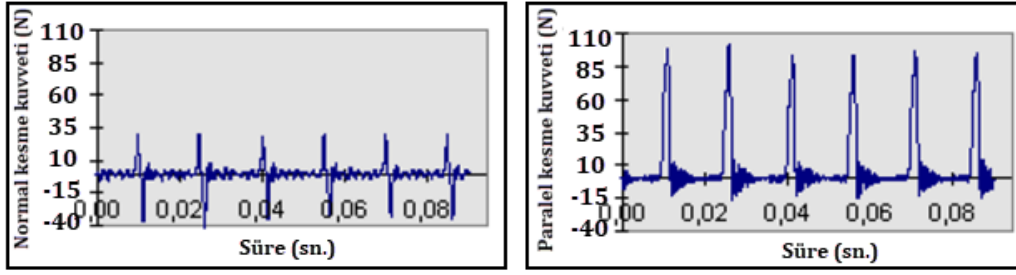
Şekil 5. Yonga Oluşumu Süresinde Normal Kesme Kuvvetlerinin Değişimi (Palmqvist, 2003)

Yapılan çalışmalarda yukarı kesişte normal kesme kuvvetlerinin aşağı kesişe göre daha yüksek olduğu (Şekil 6), kesme açısı azaldıkça negatif kesme kuvvetlerinin de azaldığı, pozitif kesme kuvvetlerinin ise kademeli olarak arttığı belirtilmiştir (McKenzie, 1961; Annamalai, 2003; Palmqvist, 2003; Tschätsch ve Reichelt, 2009).



Şekil 6. Kayın Ağaç Türü Odununun Dikey Freze Makinesinde Çeşitli Koşullarda İşlenmesinde Kesim Yönteminin Kesme Kuvvetine Etkisi (Aguilera vd., 2001)

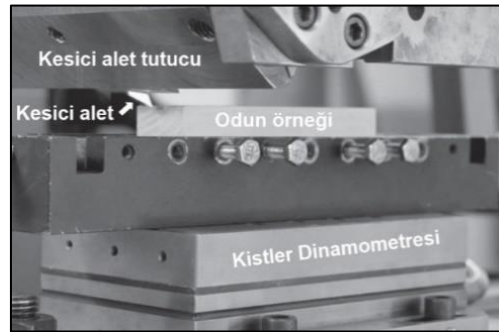
Paralel kesme kuvvetlerinin normal kesme kuvvetine göre genellikle daha yüksek olduğu ortaya konulmaktadır (Şekil 7) (Woodson ve Koch, 1970; Palmqvist, 2003; Gonçalves ve Néri 2005; Tschätsch ve Reichelt, 2009).



Şekil 7. İşlemede Kesme Kuvvetlerinin Zamanla Değişimi (Palmqvist, 2003)

Bunların yanında, birim uzunlukta uygulanan kuvvet  $N/mm$ , birim alanda uygulanan kuvvet  $kp/cm^2$  yada  $N/mm^2$ , spesifik kesme enerjisi ise birim hacimdeki yonga miktarının uzaklaştırılması için gereken enerji miktarı olarak  $J/cm^3$ ,  $kJ/cm^3$  yada  $Ws/cm^3$  şeklinde ifade edilmektedir (Gordon ve Hillery, 2003; Boucher vd., 2004; Gonçalves ve Néri, 2005; Tschätsch ve Reichelt, 2009; Porankiewicz vd., 2011; Iskra ve Hernández, 2012).

Ahşap veya metal malzemelerin işlenmesinde kesme kuvvetlerinin ölçümü temaslı ve temassız yöntemlerle yapılmaktadır. Temaslı ölçümler gerinim ölçerler ve piezo elektrik sensörler ile temassız ölçümler ise Eddy Akım Ayırıştırıcısı (ECT) ile yapılmaktadır. Gerinim ölçerler düşük maliyetli olsa da özellikle ahşabın işlenmesindeki çok düşük kesme kuvvetlerinin ölçümünde kuvvet sinyalleri ile titreşimleri net bir şekilde ayıramaması, sıcaklık ve rutubete karşı hassas olması ve kablo bağlantılarının karmaşık olması nedenleriyle verimli değildir. Piezoelektrik dinamometre yöntemi ise metal ve ahşap endüstrisinde yaygın olup, özel sensörler ve bilgisayar programları kullanılarak yarı statik ve dinamik mekanik ölçümler yüksek hassasiyetle ( $\pm 0.01$  N/s) yapılabilmektedir (Şekil 8) (Helfrick ve Cooper, 1990; Pastacı, 2003; Ross, 2010; Nacar, 2012; Caceres vd., 2018).



Şekil 8. Kesme Gücünün Piezo-Elektrik Dinamometre Yöntemi İle Ölçülmesi (Caceres vd., 2018)

Günümüzde CNC freze makineleri ile entegre kullanılabilen kesme gücü ölçüm aletleri geliştirilmiştir (Şekil 9) (Marchal vd., 2009; Goli vd., 2010; Porankiewicz vd., 2011; Iskra ve Hernández, 2012; Naylor vd., 2012).



Şekil 9. CNC Frezeler İçin Özelleştirilmiş Kesme Kuvveti Ölçme Cihazları (Kistler, 2019)

## Kesme Gücü

Bir elektrik cihazının birim zamanda yaptığı iş gücü olarak tanımlanmakta olup, birimi Watt (W)'tır. Odunun işlenmesinde kesme gücü makinede uygulanan akım (I-amper) ve gerilim (U-volt) ile doğru orantılıdır (Helfrick and Cooper 1990, Pastacı 2003, Tumanski 2006, Nacar 2012). Kesme gücü güç tüketiminin en önemli faktörlerinden biri olup, kesme gücüne dayalı olarak Eşitlik-5 ya da Eşitlik 6'ya göre hesaplanabilmektedir (Aguilera vd., 2001; Kováč ve Mikleš, 2010; Cristóvão, 2013; Kubš vd., 2017).

$$P_c = F_c \times V_c = \left( \frac{kc \times bc \times e \times Vf}{60 \times Vc} \right) \times Vc \quad (5)$$

$$P_c = N \times Z \times F \times \sqrt{ae \times D} \quad (6)$$

Eşitliklerde “P<sub>c</sub>” kesme gücünü (Watt), “F<sub>c</sub>” kesme kuvvetini (Newton), “V<sub>c</sub>” kesme hızını (m/sn), “kc” birim alandaki kesme kuvvetini (N/mm<sup>2</sup>), “bc” kesiş genişliğini (mm), “e” kesiş derinliğini (mm), “Vf” besleme hızını (m/dk), “N” deviri (d/dk), “Z” kesici sayısını (adet), “F” ortalama kesme kuvvetini (N), “ae” kesiş derinliğini (mm) ve “D” kesici alet çapını (mm) ifade etmektedir.

Güç ölçümü, doğru akım devrelerinde wattmetre ya da ampermetre-voltmetre kullanılarak, alternatif akım devrelerinde ise aktif gücün görünür güce bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Wattmetreler alternatif ve doğru akımlarda (1-3 fazlı) doğrudan güç ölçen aletler olup, güç birimleri kilowatt (kW) veya Watt (W) olarak belirtilmektedir (Şekil 10). Üç fazlı akım devrelerindeki toplam güç ölçümü dengeli tek bir fazda yapılan ölçümün 3 ile çarpılması ile hesaplanabilmektedir (Annamalai, 2003; Pastacı, 2003; Nacar, 2012).



Şekil 10. Çeşitli Kesme Gücü ve Enerji Tüketimi Ölçüm Cihazları

Alternatif akım devrelerindeki güç bir veya üç fazlı olarak üretilen elektrik sayaçları kullanılarak ölçülmektedir. Bunlar, bağlı olduğu devrenin gücünü wattmetre gibi ölçerken, geçen sürede değişen güçlerin zamanla çarpımları toplanarak birim zamandaki güç tüketimi (kWh, Wh veya MWh) hesaplanmaktadır (Helfrick ve Cooper, 1990; Pastacı, 2003; Tumanski, 2006; Nacar 2012).

## İŞLEME MEKANİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Odununun fiziksel ve teknolojik özellikleri (odun türü, yoğunluk, rutubet, yıllık halka sayısı, yaz odunu katılım oranı, büyüme hızı ve odun kusurları), makine işleme koşulları (devir, besleme hızı, kesiş yönü ve kesiş derinliği) ve kesici aletlerin mekanik durumu (kesici türü, sayısı ve keskinliği/körelme durumu, kullanım süresi, kesme ve kama açısı, serbest açı) işleme mekaniklerini etkileyen faktörler olarak belirtilmektedir (Weck ve Hennes, 1998; Meausoone vd., 2000; Marchal vd., 2009; Albert, 2010; Naylor ve Hackney, 2013).

### ***Odun ve Odun Kökenli Malzemelerin Fiziksel ve Teknolojik Özellikleri***

Odun kökenli levha tipi malzemeler ile metallere göre daha heterojen bir malzeme olan odunun fiziksel ve teknolojik özellikleri işleme mekaniklerini etkileyen en önemli faktörlerden biri olarak belirtilmektedir. Özellikle ağaç türlerinin anatomik yapıları ile rutubet miktarları kesici ve makine işleme koşullarının seçiminde oldukça önemlidir (Kopač ve Šali, 2003; Çakmak ve Malkoçoğlu, 2019; Yao ve Boh, 2019).

### ***Odun ve Odun Kökenli Malzemelerin Yapısal Özellikleri***

Genellikle odun türü yoğunluğu arttıkça yüzey kalitesi bakımından odunun daha iyi işlenebildiği, ancak kesme gücünün de arttığı belirtilmektedir (Aguilera ve Martin, 2001; Eyma vd., 2004; Eyma vd., 2005; Ross, 2010; Cristóvão, 2013; Kminiak ve Kubš, 2016; Tiryaki vd., 2016). İşlemede kuvvet gereksinimi ile yoğunluk genellikle doğru orantılı olup, yüksek yoğunluktaki odunlar düşük olanlara göre daha fazla kuvvet gerektirmektedir (Franz, 1958; McKenzie, 1961; Axelsson vd., 1993; Marchal vd., 2009; Cristóvão, 2013; Sedlecký ve Gašparík, 2017). Yoğunluk ile kesme gücü ilişkisi her zaman doğru orantılı değildir. Dar yıllık halkalı ve yavaş büyüyen iğne yapraklı ağaç türü odunlarının işlenmesinde yoğunlukla ilişkili olarak kesme gücü de artmaktadır (Kurtoğlu, 2005; Marchal vd., 2009; Sedlecký ve Gašparík, 2017).

Andrade vd. (2022) CNC freze makinesinde işlemede odun yoğunluğu arttıkça spesifik kesme enerjisinin ( $J/cm^3$ ) de arttığını bildirmişlerdir. Sedlecký ve Gasparik (2017) yoğunluğu  $0.432 \text{ gr/cm}^3$  olan doğu ladini ahşap levhasında yoğunluğu  $0.750 \text{ gr/cm}^3$  olan MDF'ye göre daha düşük kesme gücü değerleri elde etmişlerdir. Chuchala vd. (2014) odun yoğunluğu ile kesme gücü arasındaki ilişkinin önem düzeyi çok yüksek olmasa da aralarında açıkça bir korelasyon olduğunu ortaya koymuşlardır. Gürleyen ve Subaşı (2009) ağaç türü odunlarının yatay freze makinesinde sabit kesiş derinliğinde (2 mm) işlenmesinde güç tüketimi değerlerini sırasıyla en yüksek sapsız meşe, yalancı akasya, adi dişbudak ve doğu kayını ağaç türlerinde elde etmişlerdir. Zımparalamada ise MDF'de ladin ağaç türünden, akçaağaçta sarıçam ağaç türünden daha yüksek kesme gücü değerleri ortaya çıkmıştır (Loredana ve Anne-Marie, 2015; Tiryaki vd., 2017).

İşlemede düşük yoğunluktaki odun türlerinde parçalanma miktarı yüksek yoğunluktaki türlere göre daha fazla olup, diğer faktörlerle birlikte kesme gücünü artırıcı etki göstermektedir. İşlemede bazı ağaç türlerinin yoğunluğu düşük olmasına karşın yoğunluğu yüksek türlere göre daha yüksek kesme gücü değerleri elde edilmesinde ağaç türlerinin karakteristik yapılarındaki farklılıkların (sert budaklar, reçine, silisyum vd. ekstraktif maddeler, dar veya geniş yıllık halkalar, lif sapmaları vb.) etkili olabileceği belirtilebilir (Gürleyen ve Subaşı 2009; Çakmak, 2021).

### ***Isıl İşlem***

Isıl işlemle modifiye edilmiş ağaç malzemelerin işlenmesinde ısıl işlem sıcaklığındaki artışın kesme gücünü azalttığı (Mandić vd., 2011; Kubš vd., 2017) ve kesiş derinliği arttıkça kesme gücünün arttığı (Krauss vd., 2016; Özşahin ve Singer 2019) belirtilmektedir. Kesme gücündeki azalmanın odundaki ligninin bozunarak odun sertliğindeki azalmadan kaynaklanabileceği ortaya konulabilir.

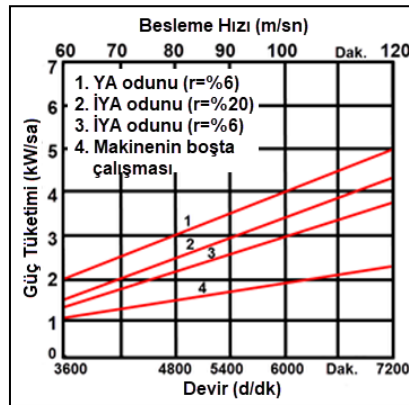


### Rutubet Miktarı

Rutubet miktarı ile kesme kuvveti ve kesme gücü arasındaki ilişki karmaşık olup, ağaç türlerinin anatomik yapısı, kesici geometrisi ve işleme koşullarına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Genellikle literatürde odun rutubet miktarı arttıkça güç gereksiniminin de arttığı belirtilmektedir. Guedes vd. (2020) farklı rutubet miktarlarında çeşitli ağaç türü odunlarının CNC frezede işlenmesinde rutubet miktarı ile spesifik kesme enerjisi ( $\text{kJ}/\text{cm}^3$ ) arasında doğrusal bir ilişki olmadığını ve ağaç türü odun yoğunluğunun spesifik kesme enerjisini arttırdığını belirtmişlerdir. Bazı çalışmalarda; rutubet miktarı ve kesme kuvveti arasında dalgalı bir ilişki olduğu ve %5-30 rutubet miktarlarında kesme gücünün arttığı, daha yüksek rutubet miktarlarında ise azaldığı belirtilmektedir (Lemaster ve Stewart, 1994; Porankiewicz vd., 2011; Nasir ve Cool, 2018). Axelsson vd. (1993) ise bu ilişkinin doğrusal olduğunu, kesiş yönü, ağaç malzeme sıcaklığı ve ağaç türünün kesme kuvvetlerini etkilediğini ifade etmektedir.

Ağaç malzemelerin çeşitli devir ve besleme hızlarında işlenmesinde iğne yapraklı ağaçlarda (İYA) %20 rutubet miktarında %6'ya göre güç gereksiniminin yapraklı ağaçlardan (YA) daha fazla arttığı (Şekil 11) belirtilmektedir (Lemaster ve Stewart, 1994; Marchal vd., 2009; Porankiewicz vd., 2011; Nasir ve Cool, 2018).

Yüksek rutubetli odunun işlenmesinde genellikle işleme kusurlarının olduğu, %6 rutubette %12'ye göre, %25 rutubette ise %20'ye göre yaklaşık %50'nin üzerinde hatasız işleme yapılabileceği ifade edilmektedir (Davis ve Nelson, 1954; Davis 1962; Kurtoğlu, 2005)



Şekil 11. Odun Rutubetleri, Devir ve Besleme Hızları İle Güç Tüketimi İlişkisi (Davis ve Nelson, 1954)

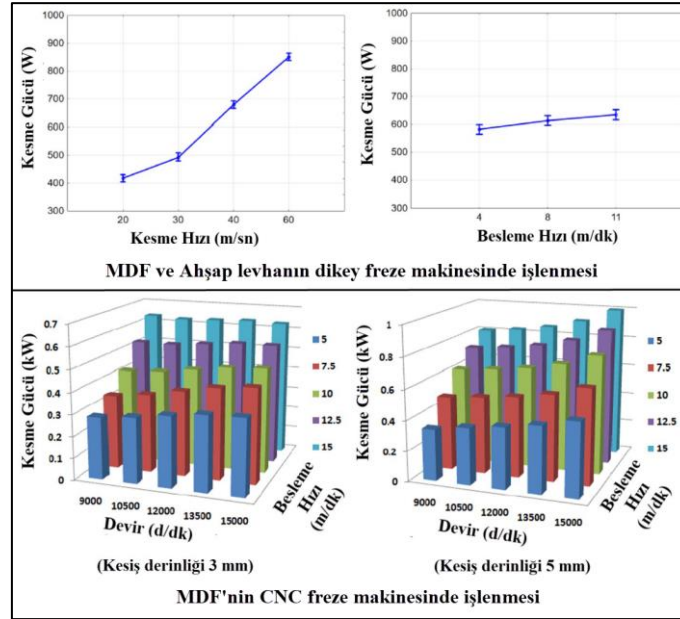
Odunun rutubeti arttıkça sertliği azalmaktadır. İşlemede kesicilerin oluşturduğu kuvvetle odun içerisindeki su sıkışmakta ve yongalar birim hacmini arttırmaktadır. Bu da bıçak boşluklarında sıkışmaya ve kesicilerin daha kısa sürede körelmesine neden olmaktadır. (Koch, 1964; Stewart, 1974; Aknouche vd., 2009; Gisip, 2015). Odunun viskoelastik yapıda olması nedeniyle rutubeti arttıkça daha fazla enerji absorbe ederek yoğunluğun da artması ile birlikte kesme gücünü olumsuz etkilemektedir (Davis, 1962; Stewart, 1980; Kopač ve Šali, 2003).

### Makine İşleme Koşulları

Devir, besleme hızı, kesiş yönü, kesiş derinliği ve genişliği gibi faktörler geleneksel ve modern işleme makinelerindeki en temel işleme koşulları olup, işleme mekaniklerini etkilemektedir.

### Besleme Hızları ve Devir

Odun ve odun kökenli malzemelerin çeşitli makinelerde işlenmesinde besleme hızı ve devir arttıkça kesme gücünün artışı ile birlikte verimin de arttığı (Şekil 12) ortaya konulmaktadır (Gürleyen ve Subaşı, 2009, Barcık vd., 2010; Kubš vd., 2017; Durkovic vd., 2018; Koleda vd., 2019; Gürgen vd., 2022, Svoreň vd., 2022).



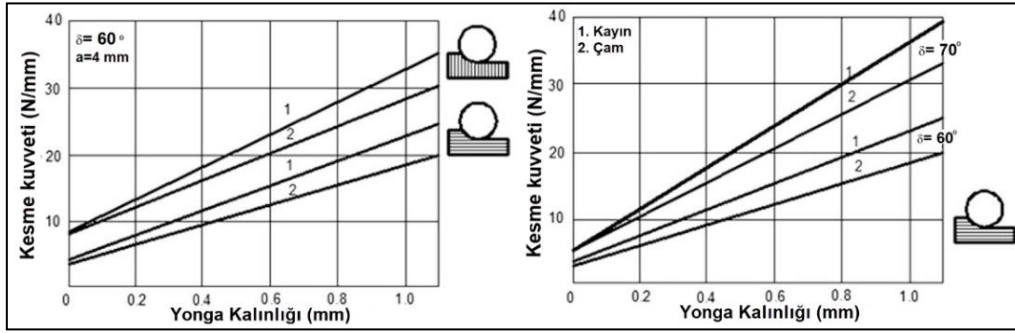
Şekil 12. Çeşitli Odun ve Odun Kökenli Malzemelerin İşlenmesinde Devir, Kesme ve Besleme Hızlarının Kesme Gücüne Etkisi (Racasan vd., 2011; Sedlecký ve Gašparík, 2017)

Çakıroğlu vd. (2022) çeşitli ağaç türü odunlarının CNC freze makinesinde işlenmesinde besleme hızının toplam enerji tüketimine etkisinin devirden daha fazla olduğunu ve besleme hızı arttıkça işlem süresinin azalması ile birlikte toplam enerji tüketiminin de azaldığını bildirmişlerdir. Su ve Wang, (2002) bazı ağaç türü odunlarının CNC frezede sabit devirde (12000 d/dk) işlenmesinde besleme hızı ve kesiş derinlikleri arttıkça spesifik kesme enerjisinin ( $Wsn/cm^3$ ) azaldığını belirtmişlerdir. Devir azaldıkça ve besleme hızı arttıkça kesme gücünün artmasına karşın işlem süresinin kısalması ile toplam enerji tüketiminin azaldığı ortaya konulmuştur (Su ve Wang, 2002; Kubš vd., 2016; Bal ve Dumanoğlu, 2019). Daire testere makinesinde emprenyeli odun örneklerinin işlenmesinde besleme hızı artışının kesme gücünü arttırdığı ve emprenyenin yüksek besleme hızında bir etkisinin olmadığı (Licow vd., 2020), kontrplakta ise besleme hızı artışının kesme gücünü önemli derecede arttırdığı (Fekiač vd., 2022) belirtilmektedir. Delik açma işlemlerinde 3000 d/dk'dan daha düşük devirler ile düşük besleme hızlarında kesme kuvvetlerinin azaldığı (Palanikumar ve Valarmathi, 2016), bir başka çalışmada devir ve besleme hızı arttıkça kesme kuvvetinin arttığı (Javorek vd., 2013) belirtilmiştir. Odunda bant zımparalama işlemlerinde ise genellikle besleme hızı ve zımpara numarası arttıkça güç tüketimi azalmaktadır (Loredana ve Anne-Marie, 2015; Tiryaki vd., 2017).

Kesme gücü ile ilgili farklı sonuçlar elde edilmesinde ölçüm parametrelerinin, kesici türü ve geometrisinin ve işlem sürelerinin etkili olabileceği belirtilebilir (Su ve Wang, 2002; Barcık vd., 2010; Darmawan vd., 2011b; Çakmak ve Malkoçoğlu, 2019).



dirençle karşılaşıldığından genellikle güç gereksinimini arttırdığı belirtilmektedir (Şekil 14) (McKenzie, 1961; Naylor ve Hackney, 2013; Durkovic vd., 2018).



Şekil 14. Ağaç Türü, Lif Yönü ve Yonga Kalınlığı İle Kesme Açısının ( $\delta$ ) Kesme Kuvvetine Etkisi (Csanády ve Magoss, 2013)

Farklı yoğunluklardaki ağaç malzemelerin daire testerede işlenmesinde yukarı kesişte aşağı kesişe göre daha yüksek güç tüketimi değerleri elde edilmiştir. Ayrıca dikgen kesiş yönteminde kesiş ve lif açıları  $90^\circ-0^\circ$ 'de  $90^\circ-90^\circ$ 'ye göre daha düşük kesme gücü ve körelme değerleri ortaya çıkmıştır (Cristóvão, 2013). En yüksek kesme gücü değerlerinin sırasıyla  $90^\circ-90^\circ$ ,  $90^\circ-0^\circ$  ve  $0^\circ-90^\circ$ 'deki kesişlerde elde edildiği bildirilmektedir (Gordon ve Hillery, 2003; Kopač ve Šali, 2003).

CNC freze makinesinde liflere dik yönde işlemede odunda spesifik kesme enerjisinin daha yüksek olduğu (Andrade vd., 2022), MDF'de ise lif yönüne göre daha yüksek kesme gücü değerleri elde edildiği (Racasan vd., 2011) belirtilmiştir. Kesiş yönüne göre lif açısı azaldıkça kesme gücü değerlerinin de azaldığı ortaya konulmuştur (Hernández vd., 2014). Daire testelerde pozitif kesme açılarının kesme gücünde daha etkili olduğu ve liflere dik yönde işlemede kesme açıları azaldıkça kesme gücünün arttığı bulunmuştur (Kováč ve Mikleš, 2010). Bazı çalışmalarda ise lif yönünde işlemede daha yüksek kesme gücü değerleri elde edilmiştir (Racasan, 2018; Çakmak, 2021).

Spesifik kesme kuvvetinin liflere paralel yönde liflere dik yönde işlemeye göre daha düşük olduğu ve liflere paralel yönde DIN (Deutsches Institut für Normung)'e göre kesme açısı arttıkça arttığı belirtilmektedir (Marchal vd., 2009; Goli vd., 2010; Porankiewicz vd., 2011; Naylor ve Hackney, 2013; Durkovic vd., 2018) Kullanılan malzeme ve kesici tipi ile makine işleme koşullarının ve parçalanmaya bağlı yonga hacim artış faktörünün kesici boşluklarında sıkışmasının kesme gücü değerlerinde farklılıklara neden olabileceği söylenebilir.

### **Kesici Aletlerin Mekanik Durumu**

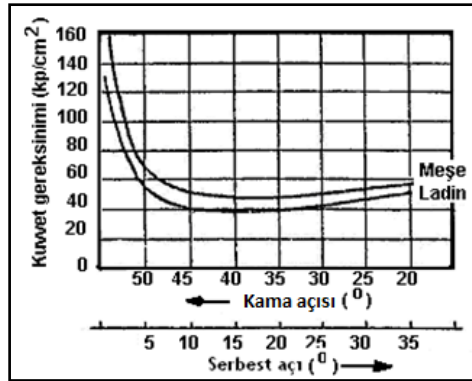
Odun ve odun kökenli malzemelerin çeşitli makinelerde işlenmesinde kesici türü ve sayısı, bıçakların keskinliği ve kullanım süresi, kama ve kesme açısı ile serbest açının kesme kuvvetleri ve kesme gücü üzerinde etkili olduğu belirtilmektedir (Mendoza, 1989; Barcık vd., 2010; Tiryaki vd., 2016; Kubš vd., 2017; Sedlecký ve Gašparík, 2017). Kesişte açığa çıkan enerji kesici alet üzerinde etkili kuvvetlere bağlıdır (Kováč ve Mikleš, 2010; Hernández vd., 2014; Kazlauskas vd., 2017; Yao ve Boh, 2019).

### **Kesme ve Kama Açıları ile Serbest Aç**

Odun ve odun kökenli malzemelerin işlenmesinde kesici geometrisinin uygun seçilmemesi kesiş direncinin, kesme kuvvetlerinin ve kesici körelme hızının artmasına, yüzey kalitesinin ve makine kullanım süresinin azalmasına neden olarak işleme verimliliğini düşürmektedir (Kováč ve Mikleš, 2010; Gisip, 2015; Çakmak ve Malkoçoğlu, 2019).

Li vd. (2022) yonga levhaların CNC freze makinesinde işlenmesinde kesme açısındaki artışın enerji tüketimi ve kesme gücünü azaltarak güç verimliliğini düşürdüğünü belirlemiştir. Kesme açısı arttıkça paralel kesme kuvvetlerinin (Hernández vd., 2014) ve toplam kesme gücünün (Kubš vd., 2017) arttığı ortaya konulmaktadır. Ancak başka bir çalışmada ise kesme gücü üzerinde en etkili faktörün kesiş derinliği olduğu, kesme açısının ise istatistiksel olarak etkili olmadığı belirtilmektedir (Durkovic vd., 2018). Diğer işleme koşullarının seçiminin bunun üzerinde etkili olabileceği söylenebilir.

Tüm kesicilerin geometrisi kama ilkesine dayanmaktadır. Kama ilkesi, bir cisme uygulanan kuvvetin etkinliğinin artırılması olarak tanımlanmaktadır. Buna göre kama açısının azalması kesilecek malzeme özelliklerine göre değişmekle birlikte bıçağa karşı direnç kuvvetinin de azalmasını sağlamaktadır. Bıçakların ve malzemelerin direnci de düşünülerek sert ağaçlar için yüksek, yumuşak ağaçlar için ise düşük kama açıları önerilmektedir. En uygun kama açısı 40°, serbest açı ise 15° olarak belirtilmektedir (Şekil 15). ASTM (American Society for Testing and Materials)'ye göre düşük kesme açılarında işlemede güç tüketiminin arttığı ortaya konulmaktadır (Kivimaa, 1950; McKenzie, 1961; Koch, 1964; Axelsson vd., 1993; Cristóvão, 2013).



Şekil 15. Meşe ve Ladin Odunlarının İşlenmesinde Kama Açısı ve Serbest Açılı İle Kuvvet Gereksinimi İlişkisi (Koch, 1964)

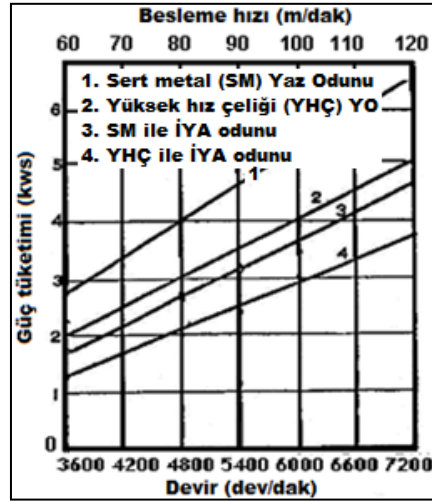
Kama açısının artması serbest açılı azaltarak kesici boşluklarında yonga yığılmalarına neden olup kesme gücünü arttırmaktadır. Sert ağaç malzemelerde düşük kama açısı kullanılması kesiş kolaylaştırarak kesme gücünü azaltsa da bıçağın dayanımı ile yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilemektedir (Kurtoğlu, 2001; Kurtoğlu, 2001; Kurtoğlu, 2005; Coşoreanu ve Cismaru, 2014; Stanojevic vd., 2017).

### **Kesici Sayısı, Kesici Çapı ve Türü**

Kesici çapı artışı ile kesme gücünün arttığı (Koch, 1964; Aguilera ve Martin, 2001), toplam enerji tüketiminin ise azaldığı belirtilmektedir (Çakiroğlu vd., 2022). Bu durumun kesici çapı

artışı ile çevresel hızın artmasına neden olarak kesme gücünü arttırdığı, toplam enerji tüketiminin azalmasının ise işlem süresinin kısalması ile ilişkili olduğu düşünülebilir.

Kesici türüne göre işlemede ise yüksek hız çeliğinde semente karbüre göre daha düşük kesme gücü değerleri elde edilmiştir (Kováč ve Mikleš, 2010). MDF'nin CNC freze makinesinde aynı çaptaki kesicilerle işlenmesinde, spiral (helezonlu) tip kesicilerde düz tip kesicilere göre daha yüksek kesme gücü değerleri elde edildiği (Racasan vd., 2011), helezon açısının artması ile kesme gücünün arttığı (Darmawan vd., 2011a) ve sert metal (SM) bıçakların yüksek hız çeliğine (YHÇ) göre yaklaşık 1/3 oranında daha fazla kesme gücü gerektirdiği (Şekil 16) ortaya konulmaktadır (Koch, 1964; Kováč ve Mikleš, 2010).



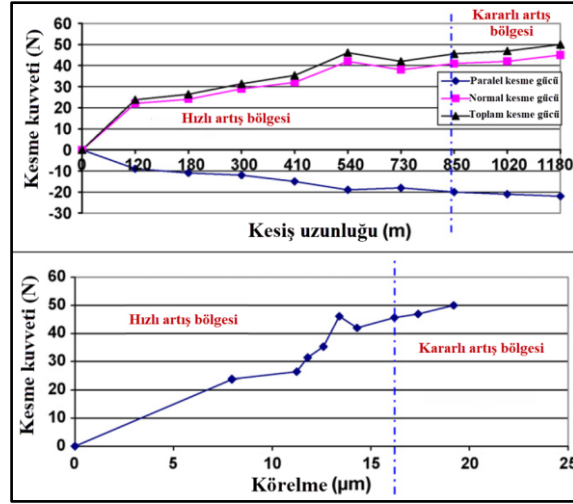
Şekil 16. Yapraklı ve İğne Yapraklı Ağaç Türü Odunlarında Kesici Türü Ve Güç Tüketimi İlişkisi (Koch, 1964)

Kesici alette kullanılan kesici sayısının doğrudan güç tüketimi ile ilişkili olduğu ve kesici sayısı arttıkça kesme gücünün de arttığı ortaya konulmaktadır (Burdurlu ve Baykan, 1998; Kminiak vd., 2016; Tiryaki vd., 2016; Yao ve Boh, 2019). Kesiş katılan kesicilerin artışı ile kesiş izi uzunluklarının azalmasının kesme gücü artışına neden olabileceği belirtilebilir.

### **Kesici Körelmesi**

Kesici körelmesinin kesme gücüne etkisi konusunda yapılan araştırmalarda, meşe ağaç türü odunu ile MDF'nin CNC frezede işlenmesinde kesiş süresi ve bıçağın kesiş uzunluğunun (takım yolu mesafesi) arttıkça körelmenin arttığı (Tratar vd., 2014; Kazlauskas vd., 2017), bununla birlikte kesme gücünün de belirli bir seviyeye kadar hızlı bir şekilde artarak daha sonra kararlı (stabil) hale geldiği (Şekil 17) belirtilmektedir (Aknouche vd., 2009).

Diğer işleme koşullarına da bağlı olarak keskinliğini uzun süre koruyabilen bıçakların kullanılması kesme gücünü arttırmaktadır (Kurtoğlu, 2005; Marchal vd., 2009; Sedlecký ve Gašparík, 2017). Özellikle, silis oranı yüksek olan tropik ağaç türü odunlarının yeni bilenmiş kesicilerle işlenmesinde kesicilerin daha kısa sürelerde körleştiği belirtilmektedir. Keskin olmayan veya körelmiş bıçaklarla işlemede kesme gücünün etkisi hafif veya yumuşak iğne yapraklı ağaç odunlarında yapraklı ağaçlara göre daha belirgin olmaktadır (McKenzie, 1961; Koch, 1964; Mori, 1970). Gornik Bučar vd. (2013) odun kompozit malzemelerin delme işlemlerinde körelmenin delik eksenini etrafında oluşan torku ve kesme gücünü arttırdığını bildirmişlerdir.



Şekil 17. Kesici Körelmesi İle Kesiş Uzunluğunun Kesme Kuvvetine Etkisi (Aknouche vd., 2009)

Genel olarak keskinliğini daha uzun süre koruyabilen kesici türlerinde güç tüketiminin daha fazla olması körelen bıçaklarda odunda kesme işlemi yerine malzemeyi kopartarak parçalaması ile açıklanabilir.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

İşleme mekanikleri odun veya odun kökenli malzemelerin fiziksel ve teknolojik özellikleri, makine işleme koşulları ve kesici aletlerin mekanik durumundan etkilenmektedir.

Malzemelerin yoğunluğu ve rutubeti ile işlemede besleme hızı, devir ve kesiş derinliği arttıkça kesme gücü artmaktadır. Yoğunluğu yüksek malzemelerde ASTM'ye göre gereğinden daha düşük kesme açıları ve daha yüksek kama açıları kullanılmaması, liflere dik yönde işlemede ise kesme gücünün azaltılması bakımından kesme açısı yüksek bıçaklar kullanılması önerilebilir. Rutubet miktarı %30'a kadar olan malzemelerde rutubet miktarı arttıkça parçalanma da artacağından kesici boşluğu daha fazla olan bıçaklar kullanılabilir. Ayrıca, ağaç malzemelerin işlenmesinde kesme gücü ile toplam güç tüketiminin azaltılması bakımından ısı işlem yapılması önerilebilir.

Kesici sayısı artışının kesme gücünü doğrudan arttıracığı düşünülmemelidir. Özellikle geleneksel planya veya kalınlık makinelerinde tüm bıçakların kesişe aynı anda katılması bakımından uçuş yüksekliklerinin eşit miktarda olması sağlanmalı ve körelmiş bıçaklar kullanılmamalıdır. Böylece enerji kayıplarının önlenerek daha ekonomik çalışmalar yapılabileceği belirtilebilir.

Düşük devir ve besleme hızlarında işlemede kesme kuvvetleri ve kesme gücü değerleri azalsa da yüzey kalitesi düşmektedir. Optimal enerji verimliliği bakımından düşük devir, yüksek besleme hızları ve kesiş derinliği ile yüksek kesme açıları önerilebilir. Ancak, aynı kesiş uzunluğundaki işlemlerde de farklı kesme gücü ve yüzey kalitesi değerleri elde edilebilmektedir. Bu nedenlerle özellikle heterojen bir malzeme olan odunun ve odun kökenli malzemelerin işlenmesinde en uygun makine koşulları ve kesici aletler seçilerek işleme mekaniklerinin belirlenmesi verimli ve ekonomik çalışmalar yapılabilmesi bakımından oldukça önemlidir.

## FİNANSAL DESTEK BEYANI

Çalışma için herhangi bir maddi destek alınmamıştır.

## ETİK KURUL ONAYI

Bu çalışma için etik kurul onayı gerekmemektedir.

## KAYNAKLAR

- Aguilera, A. & Martin, P. (2001). Machining qualification of solid wood of *Fagus sylvatica* L. and *Picea excelsa* L.: Cutting forces, power requirements and surface roughness, *Holz als Roh-und Werkstoff*, 59(6), 483-488.
- Aguilera, A., Meausoone, P. & Martin, P. (2001). Wood material influence in routing operations: the MDF case. *J Holz als roh-und werkstoff*, 58(4): 0278-0283.
- Aknouche, H., Outahyon, A., Nouveau, C., Marchal, R., Zerizer, A. & Butaud, J-C. (2009). Tool wear effect on cutting forces: In routing process of Aleppo pine wood, *Journal of Materials Processing Technology*, 209(6), 2918-2922.
- Albert, A. (2010). *Understanding CNC routers*, Canada FPIInnovations Forintek Division, First Edition.
- Andrade, A. C., Brito, T. R., da Silva, J. R. M., Ferreira, S. C., Junior, A. A. C. & Lima, J. T. (2022). *Influence of basic wood density on the specific cutting energy*, Research, Society Development, 11(7).
- Annamalai, S. (2003). *An investigation of high-speed machining on CNC routers used for upholstered furniture manufacturing*, Department of Industrial Engineering, North Carolina State University, Raleigh.
- Axelsson, B., Lundberg, Å. & Grönlund, J. (1993). Studies of the main cutting force at and near a cutting edge, *Holz als Roh-und Werkstoff*, 51(1), 43-48.
- Bal, B. C. & Dumanoğlu, F. (2019) Surface roughness and processing time of a medium density fiberboard cabinet door processed via CNC router, and the energy consumption of the CNC router, *BioResources*, 14(4), 9500-9508.
- Barčík, Š., Kminiak, R., Řehák, T. & Kvietková, M. (2010). The influence of selected factors on energy requirements for plain milling of beech wood, *Journal of Forest Science*, 56(5), 243-250.
- Berkel, A. (1972). *Wood Machining Technology*, Faculty of Forestry of İstanbul University., Vol. 183, İstanbul.
- Boucher, J., Méausoone, P.-J. & Perrin, L. (2004). Effects of diamond tool edge direction angle on cutting forces and tool wear during milling of medium density fibreboard and particleboard, *2nd International Symposium on Wood Machining*, 399-407, Vienna, Austria.
- Burdurlu, E. & Baykan, İ. (1998). *Ağaç işlerinde kesme teorisi ve endüstriyel mobilya üretimi makineleri*, Hacettepe Üniversitesi Yayınları, Ankara.
- Caceres, C. B., Uliana, L. & Hernández, R. E., (2018). Orthogonal cutting study of wood and knots of white spruce, *Wood Fiber Science*, 50(1), 55-65.
- Chuchala, D., Orłowski, K. A., Sandak, A., Sandak, J., Pauliny, D. & Barański, J. (2014). The effect of wood provenance and density on cutting forces while sawing Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), *BioResources*, 9(3), 5349-5361.



- Coşoreanu, C. & Cismaru, I. (2014). Complex ornament machining process on A CNC router, *Pro Ligno*, 10(1).
- Costes, J.-P. & Larricq, P. (2002). Towards high cutting speed in wood milling, *Annals of Forest Science*, 59(8), 857-865.
- Cristóvão, L. (2013) Machining properties of wood: tool wear, cutting force and tensioning of blades, *Doctoral Dissertation*, Department of Engineering Sciences and Mathematics, Luleå Tekniska Universitet, Skellefteå, Sweden.
- Csanády, E. & Magoss, E. (2013). *Mechanics of wood machining*, Springer Int. Pub., Berlin.
- Çakıroğlu, E.O., Demir, A., Aydın, İ. & Büyüksarı, Ü. (2022). Prediction of optimum CNC cutting conditions using artificial neural network models for the best wood surface quality, low energy consumption, and time Savings, *BioResources*, 17(2), 2501-2524.
- Çakmak, A. (2021). Bazı ağaç türü odunlarının bilgisayarlı freze makinesinde işlenmesinde optimal parametrelerin yapay sinir ağları ile araştırılması, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Çakmak, A. & Malkoçoğlu, A. (2017). Mobilya Endüstrisinde CNC freze makinelerinde işlemede yaygın olarak kullanılan malzemeler, *International Multidisciplinary Congress of Eurasia*, Roma/İtalya, 180-191.
- Çakmak, A. & Malkoçoğlu, A. (2019). Importance of saw blade geometry and technic conditions in machining of wood materials in circular saw machines, *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(2), 114-124.
- Darmawan, W., Rahayu, I., Nandika, D. & Marchal R. (2011a) Wear characteristics of wood cutting tools caused by extractive and abrasive materials in some tropical woods, *Journal of Tropical Forest Science*, 23(3), 345-353.
- Darmawan, W., Gottlöber, C., Oertel, M., Wagenführ, A. & Fischer, R. (2011b). Performance of helical edge milling cutters in planing wood, *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(4), 565-572.
- Davim, J. P. (2011). *Wood machining*. Wiley, London.
- Davis, E. M. (1962) *Machining and related characteristics of United States hardwoods*, US Dept. of Agriculture.
- Davis, E. & Nelson, H. (1954). *Machining tests of wood with the molder*, Forest Products Research Society, Madison, USA.
- Durkovic, M., Mladenovic, G., Tanovic, L. & Danon, G. (2018). Impact of feed rate, milling depth and tool rake angle in peripheral milling of oak wood on the cutting force, *Maderas Ciencia y tecnología*, 20(1), 25-34.
- Eyma, F., Méausoone, P.-J. & Martin, P. (2004). Study of the properties of thirteen tropical wood species to improve the prediction of cutting forces in mode B, *Annals of Forest Science*, 61(1), 55-64.
- Eyma, F., Méausoone, P. J., Larricq, P. & Marchal, R. (2005). Utilization of a dynamometric pendulum to estimate cutting forces involved during routing, *Annals of Forest Science*, 62(5), 441-447.
- Fekiač, J., Svoreň, J., Gáborík, J. & Němec, M. (2022). Reducing the energy consumption of circular saws in the cutting process of plywood, *Coatings*, 12(1), 55.
- Franz, N. C. (1958). *An analysis of the wood cutting process*, University of Michigan: Ann Arbor, USA.
- Gawroński, T. (2013). Optimisation of CNC routing operations of wooden furniture parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(9), 2259-2267.
- Gisip, J. (2015). Improvement of wood-based machining operations on a CNC router through extending tool life, *Doctoral Dissertation*, North Carolina State University in Forest Biomaterials, Raleigh, North Carolina.

- Goli, G., Fioravanti, M., Marchal, R., Uzielli, L. & Busoni, S. (2010). Up-milling and down-milling wood with different grain orientations—the cutting forces behaviour, *European Journal of Wood and Wood Products*, 68(4), 385-395.
- Gonçalves, R. & Néri, A. C. (2005). Orthogonal cutting forces in juvenile and mature *Pinus taeda* wood, *Scientia Agricola*, 62(4), 310-318.
- Gordon, S. & Hillery, M. (2003). A review of the cutting of composite materials, *Journal of Materials: Design Applications*, 217(1), 5-45.
- Gornik Bučar, D., Merhar, M. & Gospodarič, B. (2013). Influence of tool wear on the quality of the newly formed surface in the drilling of wood composites, *24th International Scientific Conference*, Zagreb.
- Guedes, T. O., Moreira da Silva, J. R., Hein, P. R. G. & Ferreira, S. C. (2020). Cutting energy required during the mechanical processing of wood species at different drying stages, *Maderas Ciencia y tecnología*, 22(4), 477-482.
- Gürgen, A., Çakmak, A., Yildiz, S. & Malkoçoğlu, A. (2022). Optimization of CNC operating parameters to minimize surface roughness of *Pinus sylvestris* using integrated artificial neural network and genetic algorithm, *Maderas Ciencia y tecnología*, 24(1), 1-12.
- Gürleyen, L. & Subaşı, S. (2009). The Compulsions Which the Hard Tree Materials Show Against to The Cutters and Machine in Planning Process, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 24(2), 209-219.
- Helfrick, A. D. & Cooper, W. D. (1990). *Modern electronic instrumentation and measurement techniques*, Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ.
- Hernández, R. E., Llavé, A. M. & Koubaa, A. (2014). Effects of cutting parameters on cutting forces and surface quality of black spruce cants, *European Journal of Wood Products*, 72(1): 107-116.
- İlhan, R., Burdurlu, E. & Baykan, İ. (1990). *Ağaç işlerinde kesme teorisi ve mobilya endüstrisi makineleri*, Bizim Büro Basımevi, Ankara.
- Iskra, P. & Hernández, R. E. (2012). Analysis of cutting forces in straight-knife peripheral cutting of wood, *Wood and Fiber Science*, 44(2), 134-144.
- Javorek, L., Pasteirovic, M. & Lalik, J. (2013). Relationship between cutting conditions and force/moment parameters during drilling, *Pro Ligno*, 9(4), 382-389.
- Kazlauskas, D., Jankauskas, V., Bendikienė, R., Keturakis, G. & Mačėnaitė, L. (2017). Wear of cemented tungsten carbide (WC) router cutters during oak wood milling, *Mechanika*, 23(3), 469-472.
- Keturakis, G. & Juodeikienė, I. (2007). Investigation of milled wood surface roughness, *Material and Science*, 13(1), 47-51.
- Kistler, G. (2019). *Analyzing and Optimizing Cutting Processes: Cutting Force Measurements in Research and Development*, Kistler Group Catalogue.
- Kivimaa, E. (1950). *Cutting force in woodworking*, Valtion Teknillinen Tutkimuslaitoksen Julkaisuja, Helsinki.
- Kminiak, R. & Kubš, J. (2016). Cutting power during cross-cutting of selected wood species with a circular saw, *BioResources*, 11(4), 10528-10539.
- Kminiak, R., Siklienka, M. & Sustek, J. (2016). Impact of tool wear on the quality of the surface in routing of MDF boards by milling machines with reversible blades, *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen res Publica Slovaca*, 58(2), 89.
- Koch, P. (1964). *Wood Machining Processes; A Volume in the Wood Processing Series*, The Ronald Press Company, New York.
- Koch, P. (1972). *Utilization of the Southern Pines: Processing*, US Department of Agriculture Forest Service, Southern Forest Experiment Station, Asheville.

- Koleda, P., Barčík, Š., Svoreň, J., Naščák, Ľ. & Dobřík, A. (2019). Influence of cutting wedge treatment on cutting power, machined surface quality, and cutting edge wear when plane milling oak wood, *BioResources*, 14(4), 9271-9286.
- Kollmann, F. F. & Côté Jr., W.A. (1968). *Principles of wood science and technology*, Vol. I. Solid Wood, Springer-Verlag, 592, Berlin.
- Kollmann, F. F., Kuenzi, E. W. & Stamm, A. J. (2012). *Principles of wood science and technology: II wood-based materials*, Springer Science & Business Media.
- Kopač, J. & Šali, S. (2003). Wood: an important material in manufacturing technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 133(1-2), 134-142.
- Kováč, J. & Mikleš, M. (2010). Research on individual parameters for cutting power of woodcutting process by circular saws, *Journal of Forest Science*, 56(6), 271-277.
- Krauss, A., Piernik, M. & Pinkowski, G. (2016). Cutting Power during Milling of Thermally Modified Pine Wood, *Drvna Industrija*, 67(3), 215-222.
- Kubš, J., Gaff, M. & Barčík, Š. (2016). Factors affecting the consumption of energy during the milling of thermally modified and unmodified beech wood, *BioResources*, 11(1), 736-747.
- Kubš, J., Gasparik, M., Gaff, M., Kaplan, L., Cekovska, H., Jezek, J. & Sticha, V. (2017). Influence of Thermal Treatment on Power Consumption during Plain Milling of Lodgepole Pine (*Pinus contorta* subsp. murrayana), *BioResources*, 12(1), 407-418.
- Kurtoğlu, A. (2001). Odunun işleme özellikleri, *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 31(2), 179-199.
- Kurtoğlu, A. (2005). *Ağaç işleme tekniği ve makineleri ders notları*, İstanbul Orman Fakültesi Yayınları, İstanbul.
- Lemaster, R. L. & Stewart, J. S. (1994). Wood Machining and tooling research programs research summary, *3rd International Symposium*, Wood and Paper Science, North Carolina State University, Raleigh.
- Li, R., Yao, Q., Xu, W., Li, J. & Wang, X. (2022). Study of Cutting Power and Power Efficiency during Straight-Tooth Cylindrical Milling Process of Particle Boards, *Materials*, 15(3), 879.
- Licow, R., Chuchala, D., Deja, M., Orłowski, K. A. & Taube, P. (2020). Effect of pine impregnation and feed speed on sound level and cutting power in wood sawing, *Journal of Cleaner Production*, 272(1), 1-10.
- Loredana, M. R., Anne-Marie, B. L. (2015). Research on power consumption for sanding process with abrasive brushes to solid spruce and MDF panels, *Procedia Engineering*, 100, 1495-1504.
- Malkoçoğlu, A. & Özdemir, T. (2006). The machining properties of some hardwoods and softwoods naturally grown in Eastern Black Sea Region of Turkey, *Journal of Materials Processing Technology*, 173(3), 315-320.
- Mandić, M., Todorović, N., Popadić, R. & Danon, G. (2011). Influence of wood properties and technological parameters of processing on cutting power in milling of thermally modified beechwood, *Bulletin of the Faculty of Forestry of Univerzitet u Beogradu*, 104, 109-124.
- Marchal, R., Mothe, F., Denaud, L-E., Thibaut, B. & Bleron, L. (2009). Cutting forces in wood machining—Basics and applications in industrial processes. *COST Action E35*, 63(2), 2004–2008.
- McKenzie, W. M. (1961). *Fundamental aspects of the wood cutting process*, University of Michigan, Michigan.

- Meausoone, P., Aguilera, A. & Martin, P. (2000). Couple Tool Material method for cutting conditions: A new approach of optimisation, *International Symposium on Wood Machining Properties of Wood and Wood Composites*, 105-116, Vienna, Austria.
- Mendoza, B. A. (1989). Power consumption and planing quality of coconut lumber (*Cocos nucifera* L.) as affected by density and some machining variable, *Doctoral Thesis*, Philippines University, Los Banos.
- Mori, M. (1970). An analysis of cutting work in peripheral milling of wood. II. The cutting force, power and energy requirements in up-milling parallel to wood grain, *Journal of the Japan Wood Research Society*, 16(1), 1-9.
- Nacar, M. (2012). *Elektrik-Elektronik ölçme tekniği*, Ofset Matbaacılık, Ankara.
- Nasir, V. & Cool, J. (2018). A review on wood machining: characterization, optimization, and monitoring of the sawing process, *Wood Material Science and Engineering*, 15(1) 1-16.
- Naylor, A., Hackney, P., Perera, N. & Clahr, E. (2012). A predictive model for the cutting force in wood machining developed using mechanical properties, *BioResources*, 7(3), 2883-2894.
- Naylor, A. & Hackney P. (2013). A review of wood machining literature with a special focus on sawing, *BioResources*, 8(2), 3122-3135.
- Özşahin, Ş. & Singer, H. (2019). Development of an artificial neural network model to minimize power consumption in the milling of heat-treated and untreated wood, *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 19(3), 317-328.
- Palanikumar, K. & Valarmathi, T. (2016). Experimental investigation and analysis on thrust force in drilling of wood composite medium density fiberboard panels, *Experimental Techniques*, 40(1), 391-400.
- Palmqvist, J. (2003). Parallel and normal cutting forces in peripheral milling of wood, *Holz als roh-und Werkstoff*, 61(6), 409-415.
- Pastacı, H. (2003) *Elektrik ve elektronik ölçmeleri*, Nesil Matbaacılık, İstanbul.
- Porankiewicz, B., Marklund, B., Grönlund, A. & Axelsson, B. (2011). Main and normal cutting forces by machining wood of *Pinus sylvestris*, *BioResources*, 6(4), 3687-3713.
- Porankiewicz, B. (2014). Wood machining investigations: Parameters to consider for thorough experimentation, *BioResources*, 9(1), 4-7.
- Racasan, S., Taran, N. & Spirchez, C. (2011). Regarding the cutting power on processing with CNC machine tools, *International Conference of Wood Science and Engineering in the Third Millennium-ICWSE*, Brasov, Romania, 279-282.
- Racasan, S. (2018). Study regarding the optimization of milling parameters for a minimal power consumption, *Pro Ligno*, 14(4): 124-130.
- Ross, R. J. (2010) *Wood handbook: wood as an engineering material*, United States Department of Agriculture Forest Service, Vol. 190, Madison, Wisconsin.
- Salca, E. A. (2015). Optimization of wood milling schedule—A case study, *Dimensions*, 2000, 160.
- Sedlecký, M. & Gašparík, M. (2017). Power consumption during edge milling of medium-density fiberboard and edge-glued panel, *BioResources*, 12(4), 7413-7426.
- Söğütlü, C. (2010). The Effect of Some Factors on Surface Roughness at Planing Process of Cedar Wood, *Journal of Polytechnic*, 13(3), 177-181.
- Stanojevic, D., Mandic, M., Danon, G. & Svrzic, S. (2017). Prediction of the surface roughness of wood for machining, *Journal of Forestry Research*, 28(6), 1281-1283.
- Stewart, H. A. (1974). A comparison of factors affecting power for abrasive knife planing of hardwoods, *Forest Products Journal*, 12(3), 175-182.

- Stewart, H. A. (1980). Some surfacing defects and problems related to wood moisture content, *Wood Fiber Science*, 12(3), 175-182.
- Su, W.-C. & Wang, Y. (2002). Effect of the helix angle of router bits on chip formation and energy consumption during milling of solid wood, *Journal of Wood Science*, 48(2), 126-131.
- Svoren, J., Naščák, L., Barčík, Š., Koleda, P. & Stehlík, Š. (2022). Influence of circular saw blade design on reducing energy consumption of a circular saw in the cutting process, *Applied Sciences*, 12(3).
- Tiryaki, S., Malkoçoğlu, A. & Özşahin, Ş. (2016). Artificial neural network modeling to predict optimum power consumption in wood machining, *Drewno*, 59(196), 109-125.
- Tiryaki, S., Özşahin, Ş. & Aydın, A. (2017). Employing artificial neural networks for minimizing surface roughness and power consumption in abrasive machining of wood, *European Journal of Wood and Wood Products*, 75(3), 347-358.
- Tratar, J., Pusavec, F. & Kopac, J. (2014). Tool wear in terms of vibration effects in milling medium-density fibreboard with an industrial robot, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(11), 4421-4429.
- Triboulot, P., Kremer, P., Martin, P. & Leban, J. M. (1991). Planing of Norway spruce with very varied ring width, *Holz als Roh-und Werkstoff*, 49(5), 181-184.
- Tschätsch, H. & Reichelt, A. (2009). *Cutting force measurement in machining*, Applied Machining Technology, Springer, Berlin, Heidelberg, 353-359.
- Tumanski, S. (2006). *Principles of electrical measurement*, RC press, Taylor & Francis Group, New York.
- Weck, M. & Hennes, N. (1998). Why don't machine tools cut faster?, *Manufacturing Engineering*, 121(3).
- Woodson, G. & Koch, P. (1970). *Tool forces and chip formation in orthogonal cutting of loblolly pine*, U.S. Department of Agriculture Forest Service, 26, New Orleans.
- Yao, T. X. & Boh, T. K. (2019). Energy reduction by optimizing sharpness angle and feed per knife in wood planing operation, *International Journal of Agriculture*, 8, 40-47.
- Zhu, Z., Buck, D., Guo, X., Xiong, X., Xu, W. & Cao, P. (2022). Energy efficiency optimization for machining of wood plastic composite, *Machines*, 10(2), 104.