

Kayaç Kesme Teorilerinin Tarihsel Gelişimi: Kama Uçlu Keskiler *Historical Evolution of Rock Cutting Theories: Chisel Cutters*

Serdar Yaşar^{1*}, Ali Osman Yılmaz¹

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon

*Sorumlu Yazar: seyasar@ktu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada kısaca kazı makinelerinden, kazı makinelerinde kullanılan kesici uçlardan, kayaç kesme deneylerinden ve keski için geliştirilen kesme teorilerinden bahsedilmiştir. Bu keski arasında, insanın kullandığı ilk el aletlerinde olan ve kaya/kömür ve metal kesme makinelerinde kullanılan ilk keski olan kama tipi keski için geliştirilen kesme teorilerinden bahsedilmiştir. Bu kapsamda ilk metal kesme teorisi olarak kabul edilen Merchant'ın teorisinden, ardından Potts ve Shuttleworth'un bu teoriyi kömür kesme için uyarlamasından bahsedilmiştir. Ardından, Evans'ın kömür kesme mekaniği hakkındaki çalışmalarına ve son olarak ta Nishimatsu'nun kaya kesme teorisine yer verilmiştir. Bunlara ek olarak kama tipi keski üzerinde yapılmış diğer çalışmalara (sayısal modelleme ve kırılma mekaniği) da kısaca değinilmiştir. Geliştirilmiş olan kesme teorileri farklı yaklaşımlarla kaya kesme olayını ele almışlardır ve her tip kayada aynı performansı sergileyememektedir. Kömür gibi nispeten dayanımı düşük kayalarda Evans'ın teorisi gerçeğe daha yakın sonuçlar verirken, dayanımı yüksek kayalarda Nishimatsu'nun teorisi daha gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir. Bundan dolayı, şu açıkça görülmektedir ki, kayaç-keski etkileşiminin daha iyi açıklanabilmesi için daha fazla kayaç kesme deneyine, kırılma mekaniği ve sayısal modelleme gibi yöntemlerin yardımına daha çok ihtiyaç duyulmaktadır.

Anahtar kelimeler: Kazı Mekaniği, Mekanize Kazı, Kayaç Kesme Teorileri.

Abstract

In this study, rock cutting machines, rock cutting tools, laboratory tests and theories which were developed for explanation of rock cutting with given tools were briefly mentioned. Among these tools, rock cutting theories for chisel cutters were given which were the first hand tools of mankind and first cutting tools which were used in rock/coal and metal cutting machinery. With this regard, first metal cutting theory of Merchant and adaptation of this theory to coal cutting by Potts and Shuttleworth were presented. Then Evans' studies about coal cutting were supplied. Finally, rock cutting theory of Nishimatsu was given. In addition to these, other works (fracture mechanics and numerical modelling) in regard to rock cutting with chisel cutters were given. Developed cutting theories handled the problem from different perspectives and they could not show same performance for all kinds of rocks. Evans' theory gives more reasonable results for relatively low strength rocks like coal. In contrast, for high strength rock, it has been seen that Nishimatsu's rock cutting theory is more satisfactory. Therefore, it is clear that for a better understanding of basic tool-rock interaction, more rock cutting tests, application of fracture mechanics and numerical modelling is vulnerable.

Key words: Rock Cutting Mechanics, Mechanized Excavation, Rock Cutting Theories.

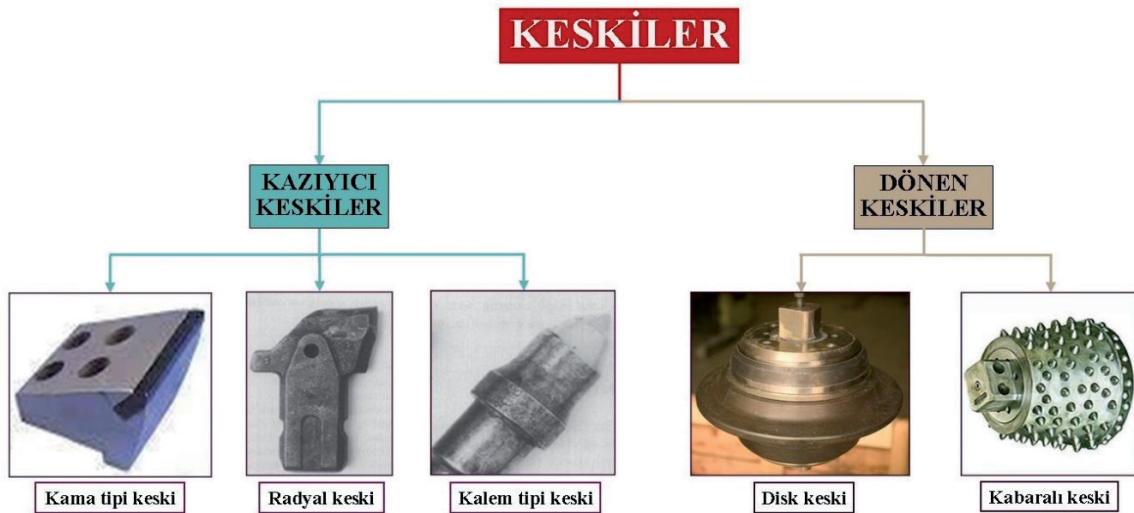
1. Giriş

Tünel ve galeri gibi yeraltı yapılarının açılmasında kullanılan iki temel yöntem vardır. Bunlar delme & patlatma ve mekanize kazıdır. Mekanize kazı, kaya ya da zeminin, makinenin kesici kafa/ünitesinde belirli bir diziliş ile yerleştirilen keskiçiler yardımı ile kazılmasına verilen addır. Açıklık ne amaçla ya da ne tür bir makineyle açılıyorsa açılışın, kazı prensibi aynıdır.

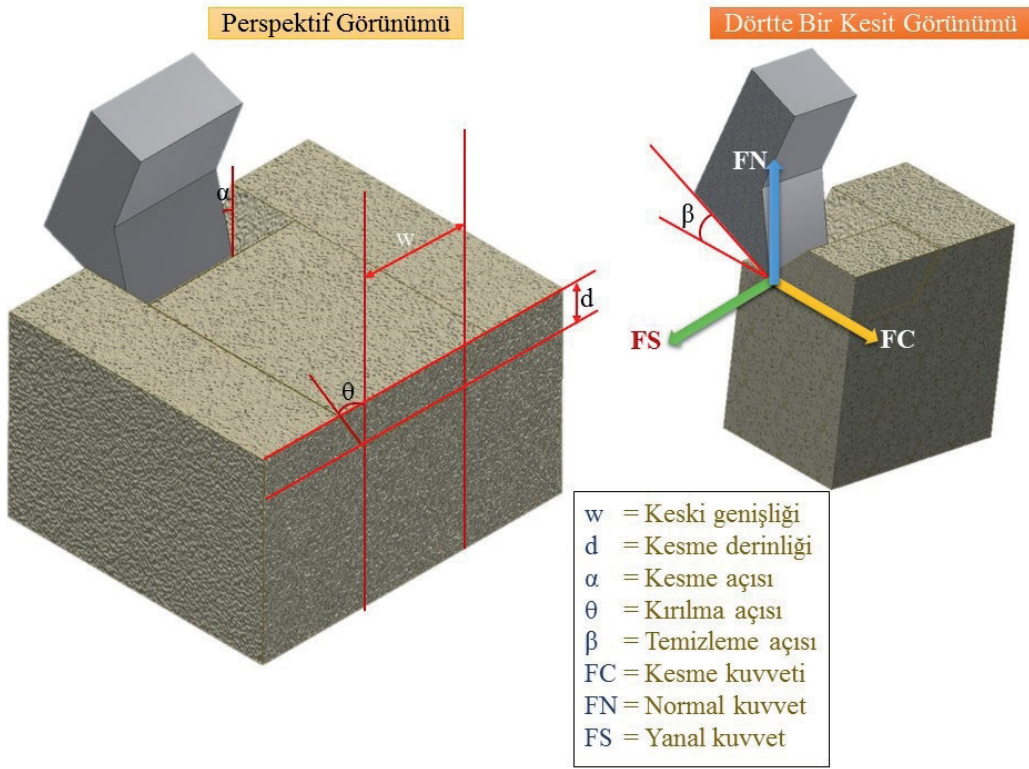
Mekanize kazı fikri ilk olarak 1761 yılında Michael Meinziçs tarafından kömürün kazılması amacıyla ortaya atılmıştır. Ancak birçok makine ile kazı denemesi olmasına rağmen, basınçlı hava bu makinelerde başarılı bir şekilde kullanılabana kadar bu fikir başarıya ulaşmamıştır. İlk başarılı kazı makinesi olarak, William Firth'in 1861 yılında İngiltere'de ürettiği "Iron Man" gösterilebilir (Stack, 1995). Bu tarihten sonra çok sayıda kazı makinesi tasarlanmış, patentlenmiş ve üretilmiştir. Ancak birçok uygulamada başarıya ulaşamamıştır.

II. Dünya Savaşı'nın ardından artan kömür ihtiyacının karşılanabilmesi için mekanize kazının payı konvansiyonel yöntemlere oranla giderek artmıştır. Diğer yandan, güvenlik ve zaman sınırlamalarından dolayı, özellikle de şehirleşmenin yoğun olduğu bölgelerin altında açılan tüneller mekanize olarak açılmaya çalışılmaktadır ve bu çaba giderek artmaktadır. Ancak mekanize kazı ile konvansiyonel yöntem arasında karar verme işlemi çok önemli ve detaylı olarak incelenmelidir. 1950'li yıllara kadar kazı makineleri, kazılacak ortamının kazı işlemine karşı davranışı bilinmeden üretilmiştir. Ancak ortamın davranışı tam anlamıyla bilinemediği için sıklıkla başarısız ve verimsiz kazı operasyonlarıyla karşılaşmıştır ve bu sorunlar bu konu üzerinde araştırmaların yapılması gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu konudaki araştırmalar 20. yüzyılın ortalarında "kazı mekaniği" biliminin doğmasına önayak olmuştur.

Kazı mekaniği, kazı sırasında kaya ya da zemin ile keski arasındaki ilişkileri inceleyen bir bilim dalıdır ve amacı kaya ya da zeminin mekanize kazıya uygunluğunun araştırılmasıdır. Kazı mekaniği ayrıca makine seçimi, performans tahmini ve fizibilite gibi konularını kapsamaktadır (Bilgin vd., 2014). Makine ile kazı sırasında, keskilere üç boyutta kuvvetler etkimektedir. Bunlar kesme kuvveti (FC), normal kuvvet (FN) ve yanıl kuvvettir(FS). Kazı makinelerinde kullanılan keskiçiler Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 2'de ise kama tipi keski ile kayaç kesmenin şematik görünümü ve kesme işlemi ile ilgili parametreler verilmiştir.



Şekil 1. Kazı makinelerinde kullanılan keskiçiler



Şekil 2. Kama tipi keski ile kayaç kesmenin şematik görüntüsü

Keskiye gelen kuvvetlerin bulunması, kazı mekaniğinin ana uğraş alanıdır. Bu sayede makinenin tork ihtiyacı ve makinenin kesici kafa/ünitesinin sahip olması gereken kesme gücü hesaplanabilmektedir (Bilgin vd., 2014).

Keski kuvvetlerinin bulunmasında sıklıkla başvurulan iki yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler teorik ve deneysel yöntemlerdir. Keski kuvvetlerinin deneysel olarak bulunabilmesi için kayaç kesme deneyleri geliştirilmiştir. Bu deneyler tam boyutlu ve küçük boyutlu kesme deneyleri olarak iki gruba ayrılabilir. Bu deneyleri birbirinden ayıran, deneyde kullanılan keski ve kayaç numuneleridir. Tam boyutlu kayaç kesme deneyinde gerçek boyutlu keski ve büyük kayaç blokları kullanılırken, küçük boyutlu kesme deneyinde ise indeks keski ve küçük boyuttaki kayaç numuneleri kullanılmaktadır. Kayaç kesme deneyleri keski kuvvetlerinin bulunmasının en kesin yöntemidir ancak bu deney setleri çok sınırlı sayıda araştırma merkezinde bulunmaktadır.

Daha önce de değinildiği gibi kazı mekaniği biliminin doğmasına ve gelişmesine madenlerdeki makineleşme ihtiyacı önyak olmuştur. 20. yüzyılın ortalarında İngiltere’de kurulan National Coal Board (NCB) araştırmacılar bu bilim dalının doğmasına ve büyük bir gelişim sağlamasına ön ayak olmuşlardır. NCB’daki araştırmacılar kömür kesme işlemini laboratuvar koşullarında gerçekleştirerek kömür kesme olayını teorik olarak açıklamaya çalışmışlardır. İlk kontrollü kömür kesme deneyleri 1950’lerde NCB’da yapılmıştır (Evenden ve Edwards, 1985).

Keski kazı prensibine göre ikiye ayrılmaktadırlar. Bunlar kazıyıcı kazıyıcı (drag cutters) ve dönen keski (roller cutters) olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu iki keski grubunun kazı prensibi aynı gibi görünse de arada bir takım farklılıklar bulunmaktadır. Kazıyıcı keski önündeki kayaya batarak parça koparırlar ve ardından kayaya tekrar batarak parça koparmaya devam ederler. Bu döngü kazı bitene kadar devam eder. Dönen keski kayaya batar ve

altındaki parçayı ezerek kazı işlemini devam ettirir. Tüm keskinlerin kazı mekanizması farklılık göstermektedir. Araştırmacılar tarafından farklı keskinler için analitik ya da yarı ampirik kesme teorileri önerilmiştir. Bu çalışmanın konusu olan kama tipi keskinler için Evans (1958) ve Nishimatsu (1972) tarafından kesme teorileri önerilmiştir. Kalem tipi keskinlerin kesme mekanizmasının açıklanması biraz daha zaman almıştır ve ilk kazı mekaniği teorisi Evans (1984) tarafından önerilmiştir ve bu teori Gökten (1997) tarafından modifiye edilmiştir. Ayrıca Gökten (2005) bu teoriyi asimetrik kazı koşulları için yarı ampirik bir yaklaşımla tekrar modifiye etmiştir. Diğer yandan dönerek kazı prensibine göre kesme yapan disk keskinler için de farklı araştırmacılar tarafından kesme teorileri önerilmiştir (Roxborough ve Phillips, 1975; Roxborough, 1978; Rostami ve Ozdemir, 1993; Rostami vd., 1996).

Kama tipi el aletleri insanoğlunun kullandığı ilk araç-gereçlerdendir. Ayrıca metal ve kömür kesme mekaniği ile ilgili ilk çalışmalar da kama tipi keskinler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kama tipi keskinlerde kazı problemi iki boyutlu bir mekanik problemine basitleştirilebilmektedir. Yani kesme kuvvetinin keskin genişliği boyunca eşit olarak dağıldığı varsayılmaktadır ve ayrıca keskin genişliği kesme derinliğinden çok fazla olduğundan dolayı kama tipi keskinin kazı problemi düzlem germe (düzlem şekil değiştirme) problemi olarak ele alınabilmektedir. Bu basitleştirmeler ve varsayımlar, kama tipi keskinlerin kazı mekaniğinin diğer keskinlerin kazı mekanizmasından daha erken gelişim göstermesine ön ayak olmuştur.

Bundan dolayı bu çalışmada, geçmişten günümüze kama tipi uçlarla metal kesme ile başlayarak, kömür ve kayaç kesme teorilerinden bahsedilecektir. Sırası ile Merchant'ın metal kesme teorisine, Potts ve Shuttleworth'un Merchant'ın metal kesme teorisini kömür kesmeye uygulamasına, Evans'ın kömür kesme teorisine ve Nishimatsu'nun kayaç kesme teorisine değinilecektir.

2. Kama tipi Keskinler için Kesme Teorileri

2.1. Merchant (1945) Metal Kesme Teorisi

1943 yılına kadar metal kesme ile ilgili 4000'den fazla çalışma olmasına (Boston, 1945) ve bu tarihe kadar farklı araştırmacıların metal kesme mekaniği üzerine çalışmalar yapmasına rağmen Merchant'ın teorisi ilk metal kesme teorisidir ve bu nedenle önemini hiçbir zaman yitirmemiştir. Birçok teori onun teorisinin üstüne kurulmaya çalışılmıştır. Merchant, metal kesme işlemindeki parça (chip) oluşumunu inceleyerek, parçanın denge konumuna göre teorisini geliştirmiştir. Keskin genişliği kesme derinliğine nazaran çok büyük olduğundan dolayı keskinin kayaca batması bir düzlem germe problemi olarak kabul edilmiştir ve problem iki boyutta incelenmiştir. Merchant teorisini iki temel varsayım üzerine kurmuştur. Birincisi malzemenin Coloumb yenilme kriterine uyduğunu kabul etmiştir. İkinci olarak ta düzlem gerilmenin sabit olduğu ve yenilme kriterinin sağlandığı varsayılmıştır (Merchant, 1944). Şekil 3'te Merchant'ın kesme teorisindeki kuvvetlerin dağılımını gösterilmektedir. Bu şekildeki sembolleri açıklamak gerekirse: $F'C$ maksimum kesme kuvveti, $F'N$ maksimum normal kuvvet, d kesme derinliği, R bileşke kuvvet, β keskinin ön yüzeyi ile yatay kayaç yüzeyinin yaptığı açı, ϕ sürtünme açısı, α kesme açısı ve ψ ise kesme düzleminin açısıdır. Yukarıda söz edilen iki varsayım ve kuvvet ve gerilmelerin dengesi göz önünde bulundurularak $F'C$ ve $F'N$ şu şekilde verilmektedir.

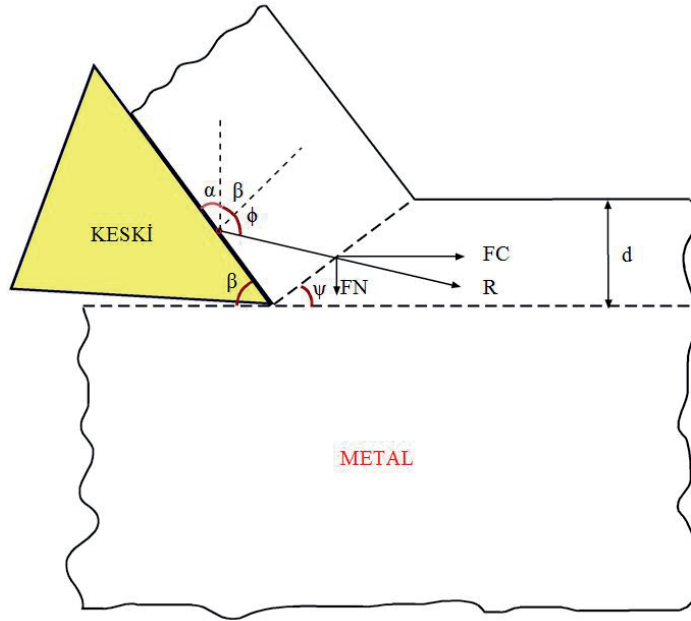
$$F'C = \sigma_s d w \frac{\cos(\phi - \alpha)}{\sin \psi \cos(\psi + \phi - \alpha)} \quad (1)$$

$$F'N = F'C \tan(\phi - \alpha) \quad (2)$$

Burada;

- $F'C$ = Maksimum kesme kuvveti, N,
 $F'N$ = Maksimum kesme kuvveti, N,
 σ_s = Kömürün kesme dayanımı, MPa,
 d = Kesme derinliği, mm,
 w = Keski genişliği, mm'dir.

Merchant kesme teorisinde metallerin plastik deformasyonlarını göz önünde bulundurmıştır. Plastik akma, yarı statik bir durumdur ve ancak metallerde ve sıkıştırılmış zeminlerde gözlemlenir (Evans, 1962). Bundan dolayı, bu kabuller metal kesme için geçerli olarak sayılabilir.



Şekil 3. Merchant'ın metal kesme teorisinin şematik gösterimi

2.2. Potts-Shuttleworth (1958) Uyarlaması

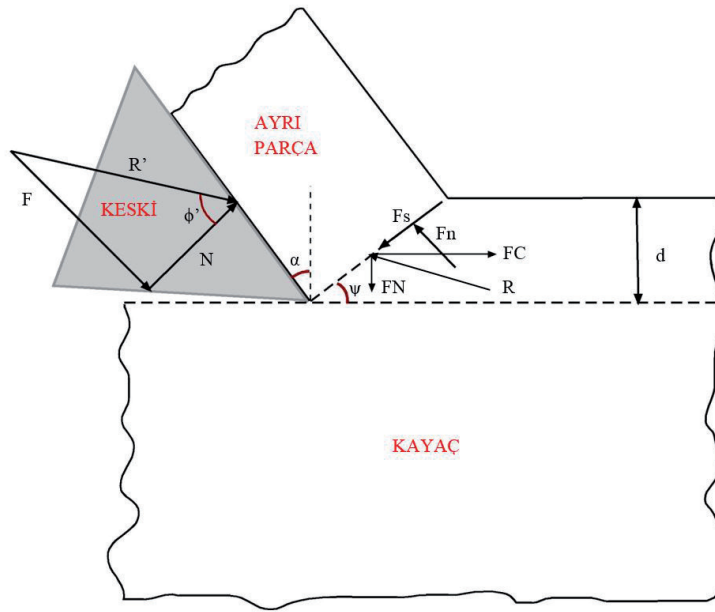
Potts ve Shuttleworth (1958), Merchant'ın metal kesme teorisini modifiye ederek kömür kesme işlemine uyarlamışlardır. Kopan parçanın anlık yenilme anındaki denge durumunun bir düzlem boyunca ilerlediği ve iki kuvvet takımının etkisinin altında olduğu söylenebilir. İlk kuvvet takımı keskinin etkisinden dolayı oluşmaktadır, diğer kuvvet takımı ise kayacın kendinden kaynaklanmaktadır ve bu kuvvetler kendi içinde dengededir. Bu uyarlamada da gerilme durumu düzlemsel olarak kabul edilmiştir. Aynı şekilde, bu teoride yenilmenin keskinin ucundan başlayarak bir düzlem boyunca ψ açısı ile devam ettiği varsayılmaktadır (Whittaker vd., 1992). Bu teoride de kayacın plastik akma ile birlikte yenildiği kabul edilmiştir. Şekil 4'te Potts ve Shuttleworth'un uyarlamasının şematik gösterimi bulunmaktadır.

Potts ve Shuttleworth (1958) uyarlamasını Merchant'ın metal kesme teorisinden ayıran en önemli özellik, metal kesme işlemindeki parçanın kazı boyunca sürekli olarak oluşturulmasıdır. Kayaç kesme işleminde parça ya da pasa oluşumu bundan çok uzaktır. Kesilen kayaç parçası büyük ya da küçük parçalar halinde yerinden sökülmemektedir. Metal kesmede ise kesilen metal parçası kesme işlemi devam edene kadar yekpare olarak elde edilmektedir. Potts-Shuttleworth'ün teorisinde hesap edilen kesme kuvveti koparılabilecek en büyük parçanın koparılması için gereken kuvvetin hesabıdır. Bu teoriye göre kesme kuvveti şu şekildedir:

$$F'C = \sigma_s d w \frac{\cos(\phi - \alpha)}{\sin \psi \cos(\psi + \phi - \alpha)} \quad (3)$$

Burada;

- $F'C$ = Maksimum kesme kuvveti, N,
 σ_s = Kömürün kesme dayanımı, MPa,
 d = Kesme derinliği, mm,
 w = Keski genişliği, mm,
 ψ = Kesme düzleminin açısı,
 α = Kesme açısı,
 ϕ = Keski ile kayaç arasındaki sürtünme açısı'dır.



Şekil 4. Potts-Shuttleworth'un kayaç kesme teorisinin şematik gösterimi

2.3. Evans (1958) Kömür Kesme Teorisi

Kömür kesme için ilk teori Evans tarafından ortaya atılmıştır. Evans, NCB'daki uzun araştırmaları neticesinde bu teoriyi ortaya atmıştır. Deneysel çalışmalar süresince, kama uçlu keski-kayaların kömüre batmaları ve keski batarken kömürde oluşturduğu kırılma paternleri detaylı olarak incelenmiştir. Şekil 5'te keski kayaca batarken oluşan kırılma paterni ve Evans (1958) tarafından basitleştirilmiş kırılma modeli görülmektedir. Bu modele göre çekme kırılması keskinin ucundan başlayarak dairesel bir ABC hattı boyunca gelişmektedir. Dairesel yayın merkezi O' noktasındadır ve minimum iş hipotezine göre yayın açısının kesme açısına eşit olduğu kabul edilmektedir. Parçaya etki eden bileşke kuvvetin (R), keskinin ucuna dik olduğu kabul edilmiştir. Evans'ın teorisinde de gerilme durumu düzlem germe olarak kabul edilmektedir.

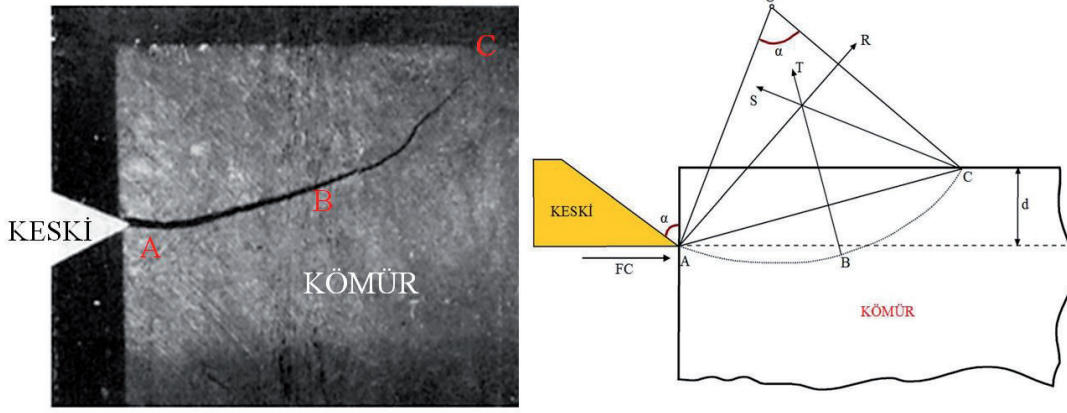
Merchant'ın kesme teorisinden farklı olarak bu teoride, kömürün çekme gerilmesinin aşılması sonucu yenildiği kabul edilmektedir. Kömürün kazı şekil incelendiğinde metalden farklı olarak, kesilmeden ziyade patlayarak koparıldığı görülmektedir. Bu da gevrek kırılmaya (patlama) işaret etmektedir. Evans teorisini ilk kez 1958 yılında sundu ancak teori yıllar içinde değişikliklere uğradı ve 1984 yılında son halini almıştır (Evans, 1962, 1965, 1984; Evans ve Pomeroy,

1966). Kömür kesme sırasında keskiye yatay yönde gelen kuvvet aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$F'C = \frac{2\sigma_t d w \sin \frac{1}{2}(\frac{\pi}{2} - \alpha)}{1 - \sin \frac{1}{2}(\frac{\pi}{2} - \alpha)} \quad (4)$$

Burada;

- F'C = Maksimum kesme kuvveti, N,
 σ_t = Kömürün çekme dayanımı, MPa,
d = Kesme derinliği, mm,
w = Keski genişliği, mm,
 α = Kesme açısı'dır.



Şekil 5. Kömür kesme deneyindeki kırılma paterni ve Evans kömür kesme teorisinin şematik gösterimi

2.4. Nishimatsu (1972) Kayaç Kesme Teorisi

Nishimatsu (1972), ilk kayaç kesme teorisi olarak kabul edilebilir. Buraya kadar sözü edilen teoriler sırasıyla metal ve kömür kesme üzerine oluşturulmuştur. Bu çalışmada ise Nishimatsu, kayaç kesmenin mekanizması üzerine çalışmalar yapmıştır. Nishimatsu'nun kayaç kesme modeli Merchant'ın metal kesme mekanizmasına benzemektedir. İki teoride de kesme olayı malzemenin kesme dayanımının aşılması ile gerçekleşmektedir. Nishimatsu bu teoriyi dört temel varsayım üzerine kurmuştur. Bunlar:

- Kayaç kesme, gevrek bir kırılma işlemidir ve kesme işlemi sırasında plastik deformasyon gözlemlenmemektedir,
- Kayaç kesme düzlem germenin etkisi altındadır,
- Kırılma işlemi, doğrusal Mohr zarfı ile açıklanmaktadır,
- Kesme hızının, kesme işlemine ve kesme mekaniğine herhangi bir etkisi yoktur (Whittaker vd., 1992).

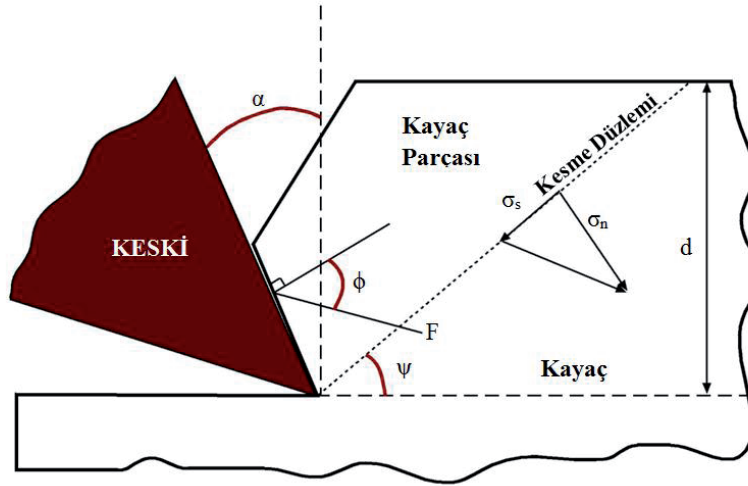
Bu dört varsayımı temel alarak Nishimatsu, kesme kuvveti ve normal kuvvetin bulunabilmesi için aşağıdaki formülleri önermiştir. Bu teoriyi diğerlerinden ayıran bir farklılık gerilme dağılım faktörü (n) diye bir sabit tanımlanmış ve bağıntıya eklenmiştir. Gerilme dağılım faktörü, kesme açısına bağlı olarak değişmektedir.

$$F'C = \frac{2 \sigma_s d w \cos i \cos (\phi - \alpha)}{(n + 1)(1 - \sin(i + \phi - \alpha))} \quad (5)$$

$$n = 11,3 - 0,18\alpha \quad (6)$$

Burada;

- $F'C$ = Maksimum kesme kuvveti, N,
 σ_s = Kömürün kesme dayanımı, MPa,
 d = Kesme derinliği, mm,
 w = Keski genişliği, mm,
 i = İçsel sürtünme açısı,
 ϕ = Kayaç ile keski arasındaki sürtünme açısı,
 n = Gerilme dağılım faktörü,
 α = Kesme açısı'dır.



Şekil 6. Nishimatsu'nun kayaç kesme modeli

3. Değerlendirme ve Sonuçlar

Bu çalışmada farklı araştırmacıların kama uçlu keski mekanizmasının açıklanması için geliştirdikleri kaya kesme teorilerinden bahsedilmiştir. İlk kesme teorisi Merchant'ın metallerin kama keski ile kesilmesini açıklayan teorisidir. Metal kesme işlemi kayaç kesmeden biraz daha farklı gelişmektedir. Metal kesmede plastik deformasyon gerçekleşirken ve tam anlamıyla bir kesme işlemi gerçekleşirken kayaç kesme de elastik kırılma ya da patlama meydana gelmektedir. Evans (1958) kesme teorisini bu temele oturtmuştur ve kömürün kesilmekten ziyade kırıldığını gözlemleyip teorisini oluşturmuştur. Aynı şekilde Nishimatsu (1972) kayaç kesmede plastik deformasyon görülmediğini iddia ederek teorisini şekillendirmiştir. Şüphesiz ki bu iki teorisinin kazı mekaniği açısından önemi yadsınamaz, muhtemelen en fazla kullanılan ve referans verilen kayaç kesme teorileri Evans ve Nishimatsu'nun teorileridir. Ancak uzun zaman boyunca yapılan sayısız kayaç kesme deneyi sonucunda belli kayaçlar için farklı kesme teorilerinin daha doğruya yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Örneğin orta ve yüksek dayanımdaki kayaçların kazısında oluşan keski kuvvetleri Nishimatsu (1972) ile daha doğru tahmin edilmektedir (Bilgin vd., 2014). Bu iki teori problemi ele alış biçiminden

birbirinden ayrılmaktadır. Temel farkı yaratan unsur ise keskinin hareketidir. Evans (1958)'ın problemi ele alış biçimi dikkatli incelendiğinde, keskinin sivri ucunun kömüre batarak ilerlediği ve üst tarafta kalan kömür parçasını yukarı iterek dairesel kesme hattı boyunca çekme gerilmeleri oluşturduğu açıkça görülmektedir. Parçanın kopma işleminin ise bu dairesel hat boyunca oluşan çekme gerilmelerinin kayacın çekme dayanımını aşmasıyla gerçekleştiği iddia edilmiştir. Nishimatsu (1972)'nin problemi ele alış biçimi Evans (1958)'ten farklı gerçekleşmiştir. Nishimatsu keskinin kesme yüzünün önündeki kayaca batmadan ziyade bir basınç etkisi yaratacak şekilde düzlemsel bir kırılma hattı oluşturduğunu ileri sürmüştür. Bu teoride basıncın gerilme durumu basma gerilmesidir ve bu yenilmenin düzlemsel Mohr-Coloumb zarfını sağladığı varsayılmıştır. Buraya kadar verilen bilgilere de dayanarak, kullanılacak olan teori seçilirken keskinin şekli de önemli bir yer teşkil etmektedir. Kesme açısı (α) negatif ya da sıfıra yakın olan keskinde Nishimatsu teorisi, açısının büyük olduğu durumlarda Evans teorisinin kullanılması daha mantıklı görünmektedir. Ayrıca daha önce bahsedildiği gibi kullanılacak olan kayacın dayanım özellikleri de diğer önemli husustur. Kömür, kaya tuzu ya da evaporitler gibi kayalarda Evans'ın teorisinin, dayanımı daha yüksek olan kayalarda ise Nishimatsu teorisinin kullanılması daha gerçeğe yakın sonuçlar verebilecektir.

Bunlara ek olarak Bilgin vd. (2012), bir tünel açma makinesi üzerindeki disk keskinin yerine kama tipi keskinin yerleştirilmesinin etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca, karmaşık şekilli kama tipi keskin için kesme kuvvetinin bulunabilmesi için Evans (1958) teorisine keskinin aşınma miktarı, tepe açısı ve alt v açısı ile ilgili üç farklı keski parametresi ekleyerek eşitliği modifiye etmişlerdir.

Kayaç kesme teorilerine ek olarak farklı araştırmacılar kesme kuvvetlerinin kayaçların mekanik özelliklerinden bulunabilmesi için ampirik yaklaşımlar geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımlar tek bir kesme durumuna özel olarak geliştirildikleri için kesme kuvvetini tahmin etme yetenekleri sınırlıdır. Bunun dışında farklı araştırmacılar kaya kesme işleminin daha detaylı açıklanabilmesi için kırılma mekaniği prensiplerini kullanmışlardır (Guo vd., 1992). Kırılma mekaniği prensipleri genellikle nümerik modellerdeki kırılma mekanizmasının modellenmesinde kullanılmaktadır. Farklı araştırmacılar kesme kuvvetinin bulunabilmesi için nümerik modelleme yöntemlerine başvurmuşlardır. Bu yöntemler sonlu elemanlar (Menezes vd., 2014), sonlu farklar (Huang vd., 1998), sınır elemanlar (Chen vd., 1998), ayırık elemanlar (Su ve Akcin, 2010) yöntemleridir. Görüldüğü gibi temel keski kayaç etkileşiminin açıklanabilmesi için çok farklı araştırmacılar farklı yöntemlere başvurmuşlardır ve başvurmaya devam etmektedirler. Kazı mekaniğinin daha iyi anlaşılabilmesi için kayaç kesme deneylerinin daha yaygınlaşması, sayısal modelleme çalışmalarında yeni yöntemlere başvurulması, kırılma mekaniğinin, elastisite ve plastisite teorisinin prensiplerinin kazı mekaniğinin içine daha çok sokulması gerekmektedir.

Kaynaklar

Bilgin, N., Copur, H., ve Balci, C., 2012. Effect of replacing Disc Cutters with Chisel Tools on Performance of a TBM in Difficult Ground Conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 27(1), 41–51.

Bilgin, N., Çopur, H., ve Balci, C., 2014. *Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries*, CRC Press, 366 s.

Boston, O., 1945. *A Bibliography on Cutting of Metals*. ASME, 547 s.

Chen, C. S., Pan, E. ve Amadei, B., 1998. Fracture Mechanics Analysis of Cracked Discs of Anisotropic Rock Using the Boundary Element Method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 35(2), 195–218.

Evans, I., 1958. Theoretical Aspects of Coal Ploughing, *Mechanical Properties of Non-Metallic Brittle Materials*. Butterworths, London, 451–468.

Evans, I., 1962. A Theory of the Basic Mechanics of Coal Ploughing, *International Symposium on Mining Research*, Missouri, 761-798.

Evans, I., 1965. The Force Required to Cut Coal with Blunt Wedges, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 2, 1–12.

Evans, I. ve Pomeroy, C. D., 1966. The strength, fracture and workability of coal, Oxford: Pergamon Press, 277 s.

Evans, I., 1984. A Theory of The Cutting Force For Point-Attack Picks, *International Journal of Mining Engineering*, 2, 63–71.

Evenden, M. P., ve Edwards, J. S., 1985. Cutting Theory and Coal Seam Assessment Techniques and Their Application to Shearer Design. *Mining Science and Technology*, 2, 253–270.

Goktan, R. M., 1997. A Suggested Improvement on Evans'Cutting Theory for Conical Bits. In *4th International Symposium on Mine Mechanisation and Automation*, 57 – 61.

Goktan, R. M., ve Gunes, N., 2005. A Semi-Empirical Approach to Cutting Force Prediction for Point-Attack Picks. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 105 (April), 257–263.

Guo, H., Aziz, N. I., ve Schmidt, L. C., 1992. Rock Cutting Study Using Linear Elastic Fracture Mechanics, *Engineering Fracture Mechanics*, 41, 771–778.

Huang, H., Damjanac, B. ve Detournay, E., 1998. Normal Wedge Indentation in Rocks with Lateral Confinement. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 31(2), 81–94.

Menezes, P. L., Lovell, M. R., Avdeev, I. V., Lin, J. S. ve Higgs, C. F., 2014. Studies on the Formation of Discontinuous Chips During Rock Cutting Using An Explicit Finite Element Model. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70, 635-648.

Merchant, M.E., 1944. Basic Mechanics of the Metal Cutting Process, *Journal of Applied Mechanics*, 66, 168-175.

Nishimatsu, Y., 1972. The Mechanics of Rock Cutting, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 9, 261-270.

Potts, E. L. J. ve Shuttleworth, P., 1958. A Study of Ploughability of Coal, With Special Reference to the Effects of Blade Shape, Direction of Planing to the Cleat, Planing Speed and the Influence of Water Infusion, *Transactions of Institution of Mining Engineers*, London, 117, 520-548.

Rostami, J. ve Ozdemir, L., 1993. A New Model for Performance Prediction of Hard Rock TBMs. In: Proceedings of Rapid Excavation and Tunnelling Conference, USA, 794–809.

Rostami, J., Ozdemir, L. ve Nilsen, B., 1996. Comparison between CSM and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction Models. In: Proceedings of Annual Technical Meeting of the Institute of Shaft Drilling and Technology (ISDT), Las Vegas, NV, pp. 11.

Roxborough, F.F., 1978. Fundamental Studies on the Mechanics of Cutting Rock with Disc. In: Third Australian Tunnelling Conference, Sydney, 43–47.

Roxborough, F.F. ve Phillips, H.R., 1975. Rock Excavation by Disc Cutter. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts 12, 361–366.

Stack, B., 1995. Encyclopedia of Tunnelling, Mining and Drilling Equipment, Volume 1, Mudén Publishing, Tasmania, 527 s.

Su, O. ve Akcin, N. A., 2011. Numerical Simulation of Rock Cutting Using the Discrete Element Method, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48, 434–442.

Whittaker, B. N., Singh, R.N. ve Sun, G., 1992. Rock Fracture Mechanics: Principles, Design and Applications. Elsevier, Amsterdam.