

# *Yüksek Basıncılı Su Jetleri ile Yapılan Kesme ve Parçalama Çalışmaları*

**The Information on Cutting and Fracturing Studies using High-  
Pressure Water Jets**

Nul i Ali AKÇIN(\*)

## ÖZET

Bu yazıda, yüksek basınçlı su jetleri ile yapılan kesme ve parçalama çalışmaları hakkında bilgi vermek amaçlanmıştır.

Yüksek basınçlı su jetleri; devamlı jetler, kesikli jetler ve sutopları olmak üzere üç grupta toplanmaktadır. Yüksek basınçlı su jetleri, önce laboratuvarında kayaçların, kömürün ve çeşitli malzemelerin kesilmesi ve parçalanmasında denenmiştir. Daha sonra, arazi ve sanayi uygulamalarına geçilmiştir. Yüksek basınçlı su jetleri delik delme, tünel açma, hidromekanik ve hidrolik kazı gibi arazi uygulamaları yanında sanayide de çeşitli çalışmalarda kullanılmaktadır. Özellikle, hidromekanik ve hidrolik kazı sistemlerinin kullanılmasıyla geliştirilen hidrolik kömür üretimi yöntemleri giderek yaygınlaşmaktadır.

## ABSTRACT

In this paper, information on cutting and fracturing studies using high-pressure water jets is given.

High-pressure water jets are combined into three groups; continuous jets, pulsed jets and water cannons. Initially, high-pressure water jets were employed for cutting and fracturing rocks, coal and various materials in the laboratory. Later, field and industrial applications have been emerged. High-pressure water jets are used in the industry for various purposes along with the field applications such as drilling, tunnelling, hydro-mechanical and hydraulic excavation. Especially, hydraulic coal mining methods which have been developed by the use of hydromechanical and hydraulic excavation systems are becoming more popular.

## 1. GİRİŞ

Suyun aşındırma etkisi eskiden beri çok iyi bilinmektedir. Bu en belirgin olarak akarsu kıyılarındaki görülmekte olan su araziye zamanla yavaş yavaş aşındırmaktadır. Su hızının normalden daha fazla olduğu taşkın zamanlarında aşındırmanın hızlandığı da bilinen bir olgudur. Suyun bu etkisi "Yüksek Basıncılı Su Jetlerinin" uygun konumlarda çeşitli malzemeler üzerine uygulanması ile çok daha iyi görülmektedir. Su jetleri, malzeme yüzeyine uzun bir süre tutulduğunda aşınma artmakta ve malzeme giderek parçalanmaktadır.

Su jetleri çok eski senelerden bu yana nispeten yumuşak zeminlerin ve kayaların kesilip kazılmasında kullanılmaktadır. Bunların kullanılmasıyla gelişen kesme ve kazı teknolojisi "Jet Kesme Teknolojisi" olarak bilinmektedir. Bu teknoloji son yirmi yılda hızlı bir gelişme göstermiştir. Su jetleriyle kesme ve kazı çalışmalarına geçilmeden önce, etkin bir su jeti elde etmek için birçok araştırma yapılmıştır. Etkin su jetleri elde edildikten sonra su jetleri, önce laboratuvarlarda çeşitli malzemelerin kesilmesi ve parçalanması çalışmalarında denenmiş ve daha sonra sanayi ve arazi uygulamalarına geçilmiştir.

## 2. YÜKSEK BASINÇLI SU JETLERİ

Herhangi bir pompadan veya basınç yükselticiden elde edilen yüksek basınçlı su, belirli çaptaki bir nozülden bir su demeti şeklinde ortama yayılırsa yüksek basınçlı bir su jeti elde edilmiş olur. Su demetinin ortama yayılış biçimi ve herhangi bir noktada ulaştığı basınç, nozül yapısına bağlıdır. Basınç altında nozülü terkeden su demeti yüksek bir hıza sahip olduğu için bunlar "Yüksek Hızlı Su Jetleri" olarak da bilinirler (Şekil 1).

Mühendislikte kullanılan su jetleri "daldırma" (submerged) ve "serbest" jetler olmak üzere iki

grupta toplanmaktadır. Atmosfer basıncındaki bir hava ortamı içine bırakılan sıvı demetleri serbest jetleri oluşturur. Serbest jetler akımın sürekli veya kesikli olmasına göre "devamlı jetler", "kesikli jetler" ve "sutopları" olmak üzere üç grupta toplanmaktadır. Daldırma jetleri ise bir sıvı jetinin, gene sıvı bir ortam içine bırakılmasıyla oluşur. Bunlar sualtı çalışmalarında yada su jetleriyle kuyu açma çalışmalarında görülmektedir(1,2).

### 2.1. Devamlı Jetler

Bu tür jetlerde sıvı akımı sürekli ve laminer karakterdedir. Jet uygulandığı sürece jetin basıncı, hızı ve malzeme yüzeyinde oluşturduğu kuvvet daima sabittir. Malzeme yüzeyindeki etkilenmenin derecesi bunlara bağlıdır. Impuls-Momentum'un tanımından herhangi bir yüzeye dik doğrultuda uygulanan su jetinin yüzeyde oluşturduğu kuvvet

$$F = p \cdot v^2 \cdot A \quad [1]$$

eşitliği ile, basınç ise

$$R = 1/2 \cdot p \cdot v^2 \quad [2]$$

eşitliği ile bulunabilir. Burada:

v : Su demetinin hızı (m/s)

A : Su demetinin kesit alanı (m<sup>2</sup>),

p : Suyun yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>),

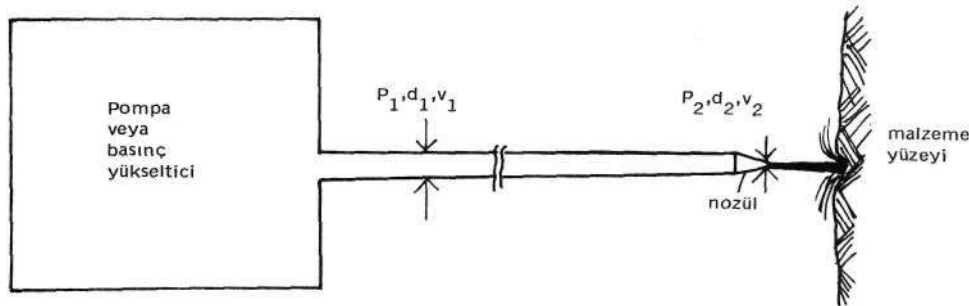
F : Yüzeyde oluşan kuvvet (N),

P : Yüzeyde oluşan basınç (N/m<sup>2</sup> Pascal)'dır.

Devamlı jetlerde nozülü terkeden sıvı kullanılış amacına göre ya sprey hale geçmekte ya da dağılmadan bir sıvı demeti şeklinde ortama yayılmaktadır. Sıvı demeti şeklindeki jetler kesme ve parçalamada çalışmalarında kullanılmaktadır(1,2,3,4).

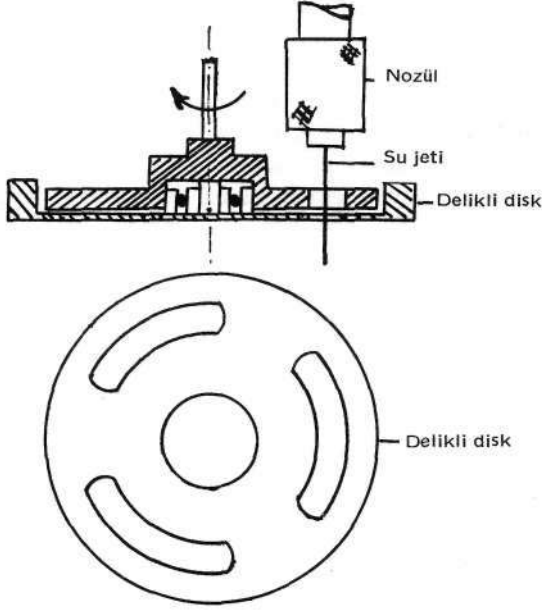
### 2.2. Kesikli Jetler

Kesikli jetlerde de sıvı akışı laminerdir. Fakat, sürekli değildir. Nozülden çıkan sıvı demeti bazı akım kesici düzeneklerle belirli aralıklarla kesilerek



Şekil 1. Yüksek basınçlı su jeti.

kesik-kesik verilmektedir. Sıvı akışını kesikli hale getirmek için sinüzoidal olarak açılıp kapanan bir valf, ya ileri-geri hareket eden bir piston, yada dönen yıldız bir tekerlek veya dönen delikli bir disk kullanılmaktadır (Şekil 2). Bu düzenekler yardımıyla akış periyodu milisaniye (ms) düzeyinde tutulabilmektedir(1,2,5).



Şekil 2. Diskli akım kesici.

Herhangi bir yüzeye bir su jeti kesikli olarak verildiğinde yüzeyde oluşan basınç

$$P = p \cdot v \quad [3]$$

eşitliği ile bulunmaktadır. Burada; c, m/s olarak kayada dalga yayılma hızıdır. Bu basınca "su çekici basıncı" da denilmektedir. Dalga yayılma hızı, su demetinin hızından daha büyük değerler aldığı için kesikli bir jetin oluşturduğu basınç aynı hızdaki devamlı bir jetin oluşturduğu basınçtan bir kaç kat daha yüksek olmaktadır. Bu nedenle, bu tür jetler malzemelerin kırılması ve parçalanmasında kullanılmaktadır.

### 2.3. Sutopları

Çok sert ve çok kalın malzemelerin kesilmesi veya parçalanması için jet hızının ve basıncının artırılması gerekmektedir. Çok yüksek hıza ve basınca ise ancak özel olarak yapılmış sutoplarıyla ulaşılabilmektedir. Bunlarla, malzeme yüzeyine aktarılan basınç pompadan elde edilen basınçtan çok daha yüksektir; 6100 MPa'lık bir basınçla 3500

m/s'lik bir jet hızına ulaşılabilmektedir(6). Sutopları da kesik-kesik verilirler ve parçalama çalışmalarında kullanılırlar.

### 2.4. Yüksek Basıncılı Su Jeti Donanımları

#### 2.4.1. Pompalar ve Basınç Yükselticiler

Pompalar; mekanik, hidrolik veya pnömatik olarak tahrik edilmektedir. Bugün için kullanılan pompaların büyük bir kısmı pistonlu tiptedir. Bunlarla 260 MPa basınca ulaşmak mümkündür. Yüksek basınçlar için özel olarak geliştirilen basınç yükselticiler kullanılmaktadır. Basınç yükselticilerle 1300, sutoplarıyla ise 6100 MPa'lık basınçlara ulaşılabilmektedir(6).

Sutoplarında, su özel olarak yapılan bir nozülün hızla bırakılmakta ve enerji doğrudan kinetik enerji şeklinde yüzeye aktarılmaktadır(6,7).

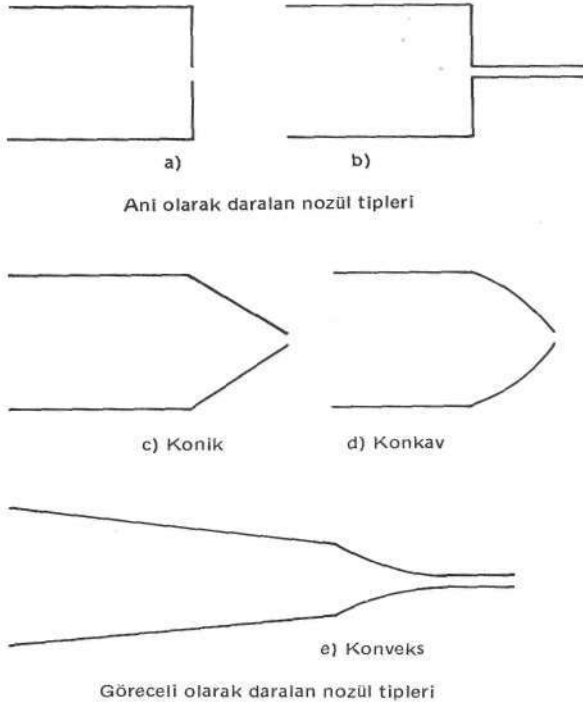
Su jetlerini sanayi ve arazi çalışmalarında kullanan ülkeler çalışma koşullarına ve teknik olanaklarına göre çeşitli pompa tasarımları geliştirmişlerdir.

#### 2.4.2. Nozüller

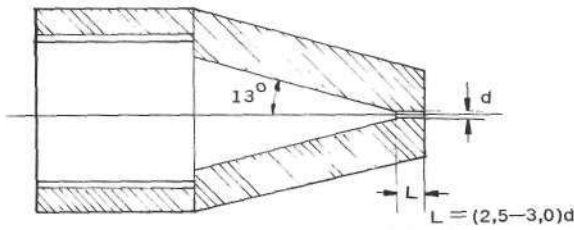
Nozüller, boru ve hortumla pompadan yada basınç yükselticiden getirilen basınçlı suyun hedefe fıskırtıldığı elemanlardır. Doğrudan borunun ucuna takıldıkları gibi uzaktan kumanda edilen monitörlere de takılırlar. Nozüllerin girişi ucuna takılacakları borunun çapındadır, sonra ani olarak yada göreceli olarak daralırlar. Daralma bölgesinin sonunda belirli bir çapla dışarıya açılırlar (Şekil 3) (8). Nozüller aşınmaya dayanıklı olan sentetik safir, tungsten karbit yada yüksek karbonlu çeliklerden yapılırlar.

Nozülü terk eden sıvı demetinin ortama dağılışı biçimi, hızı, basıncı ve çarptığı hedefde oluşturduğu basınç nozül tasarımına bağlıdır. Bu nedenle en uygun nozül tasarımını bulmak amacıyla bir çok araştırma yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda, 13" lik bir açıyla daralan ve daralma konisinin ucunda çıkış çapının 2,5-3,0 katı uzunluğunda düz bir kısım bulunan nozüllerin en iyi sonuçları verdiği gözlenmiştir (Şekil 4). Bu tasarım pratikte en yaygın olanıdır ve bir çok araştırmacı tarafından kullanılmıştır(4,5,9). Konik daralmanın iki kademeli yapılmasıyla etkileme uzaklığının da arttığı gözlenmiştir(10).

En uygun tasarımlı nozülle çalışıldığı zaman, devamlı bir su jetinin nozül çıkış çapının bir kaç



Şekil 3. Nozül tipleri(8).



Şekil 4. En uygun nozül tasarımı(9).

yüz katı uzunluğunda dağılmadan kalabildiği ve çapın yüz katı uzaklığındaki bir noktada çıkış basıncının % 90'ı düzeyinde bir basınca sahip olduğu gözlenmiştir(9). Dağılmayan kısmın uzunluğunu artırmak için suya çeşitli oranlarda "polyox" türü sürtünmeyi azaltıcı maddeler katılmaktadır(9,11).

#### 2.4.3. Yüksek Basınca Dayanıklı Boru ve Hortumlar

Pompadan veya basınç yükselticiden nozüllere veya monitörlere basınçlı su getirmede dikişsiz çelik çekme borular ve çelik tel örgülü hortumlar kullanılmaktadır. Boruların et kalınlıkları ve hortumlardaki çelik tel örgü sayısı basınca göre belirlenmektedir. Boru veya hortum bağlantıları mafsalı, çift kelepçeli veya çift taraflı geçme manşonludur. Ayrıca, boru bağlantıları için iyi kalite kaynaklama da yapılmaktadır.

### 3. YÜKSEK BASINÇLI SU JETLERİYLE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Yüksek basınçlı su jetleri kesme-parçalama ve hassas kesme çalışmalarında kullanılmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi su jetleri, önce laboratuvarlarda denenmiş ve elde edilen sonuçların ışığında sanayi ve arazi uygulamalarına geçilmiştir. Araştırmacılar, malzemelerin kesilmesi ve parçalanmasında basınç, gerilme, aşınma, çatlama, dalga yayılması ve çökme etkilerinin bir arada görüldüğünü bunun da kesme ve parçalama işleminin açıklanmasını güçleştirdiğini belirtmişlerdir. Ancak, bu işlemlerin açıklanmasında aşağıdaki etkenlerin gözlenmesinin yararlı olacağını vurgulamışlardır.

1. Su jeti ile ilgili etkenler  
basınç, nozül çapı, çıkış hızı, nozül tipi, debi
2. Malzeme ile ilgili etkenler  
malzemenin dayanım özellikleri, sertliği, yapısı ve dokusu, tane boyutu, süreksizlikleri vs.
3. Uygulama biçimi ile ilgili etkenler  
jet tipi, etkileme uzaklığı, geçiş hızı, geçiş sayısı, tabakalaşma düzleminin konumu vs.

Araştırmacılar bu etkenler arasında ilişkiler kurarak çeşitli kesme ve parçalama kuramları geliştirmişler ve kuramlarını bir çok malzeme üzerinde denemişlerdir. Kuramsal ve deneysel çalışmalarının sonuçlarını bir takım bağıntılar ve eğri uyarlamaları şeklinde vermişlerdir. Sonuçları verirken kısmen yada büyük ölçüde deneysel olarak elde ettikleri bazı yaklaşımlardan yararlanmışlardır.

Devamlı jetlerle yapılan çalışmalarda ya su jeti sabit, malzeme hareketli yada malzeme sabit, su jeti hareketlidir. Birinci durumda, malzeme sabit jetin karşısından belirli bir uzaklıkta belirli bir hızla geçirilmektedir. İkinci durumda ise su jeti, sabit malzeme karşısından geçirilmektedir. Her iki durumda da malzemede yukarıda sayılan etkenlere bağlı olarak bir kesme yarığı oluşmaktadır. Aynı yarık üzerinden su jetinin bir kaç kez geçirilmesiyle malzemenin parçalanması da sağlanmaktadır. Bazı durumlarda hem su jeti ve hem de malzeme sabit tutulmaktadır. Bu durumda, malzeme yüzeyinde, ilk anlarda hızla derinleşen ve genişleyen ve bir süre sonra derinleşmesi ve çukurlaşması yavaşlayan bir çukur oluşmaktadır. Daha sonra ise hiç bir etkilenme gözlenmemektedir.

Kesikli jetler ve sutopları malzemelerin parçalanmasında kullanılmaktadır. Bunlardan çıkan su demetleri malzeme yüzeyine bir kaç kez çarpıtılınca malzeme parçalanmaktadır.

### 3.1. Kesme-Parçalama Çalışmaları

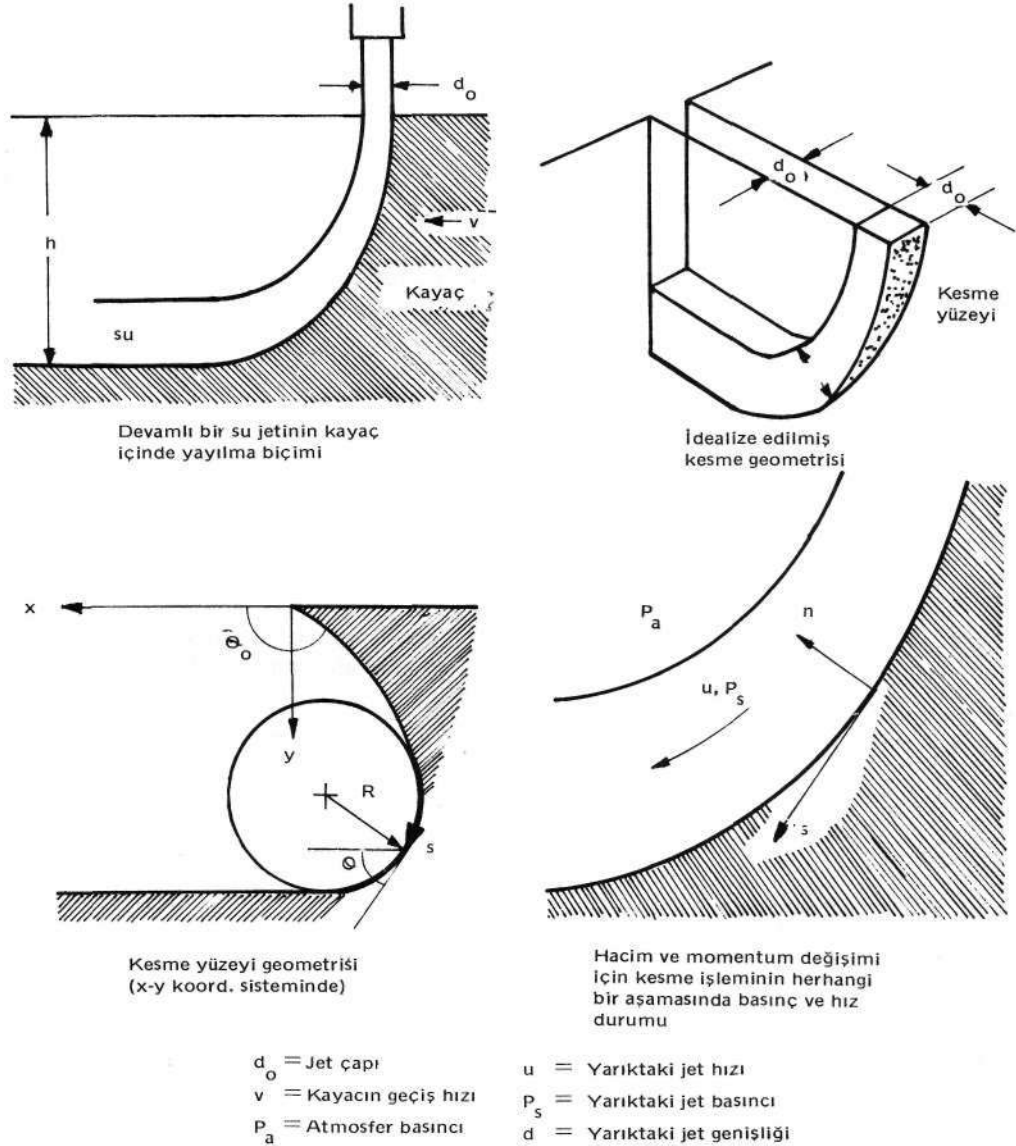
Kesme-parçalama çalışmaları kayaçların ve kömürün laboratuvarında kesilmesinden delik delme, tünel açma, hidrolik ve hidromekanik kazı vs'ye kadar olan geniş bir alanı kapsamaktadır.

#### 3.1.1. Kayaç Kesme Çalışmaları

Devamlı jetlerle kayaç kesme çalışması yapan araştırmacılar öncelikle etkileme uzaklığı, jet basıncı, jet hızı ve geçiş hızlarının kesme derinliğini

nasıl etkilediğini gözlemişlerdir. Kesme derinliğinin, basıncın artmasıyla arttığını ve geçiş hızının artmasıyla azaldığını belirlemişlerdir(12).

Crow, kesme geometrisini bir modelle idealize ederek kesme işlemini açıklamaya çalışmıştır. Bu modelde bir kayaçın yüzeyine dik olarak uygulanan  $d_o$  çapındaki bir jet kayaçta  $d$  genişliğinde bir yarık açmaktadır. Araştırmacı, açılan yarıkta oluşan hidrodinamik kuvvetleri, momentumun korunumu ve enerji denklemleri yardımıyla bulmuş ve bu kuvvetleri kayaçın kesme dayanımına eşitlemiştir. Sonuçta, kayaçın bu dayanımının yenilmesiyle kesme işleminin oluştuğunu ileri sürmüştür (Şekil 5) (13).

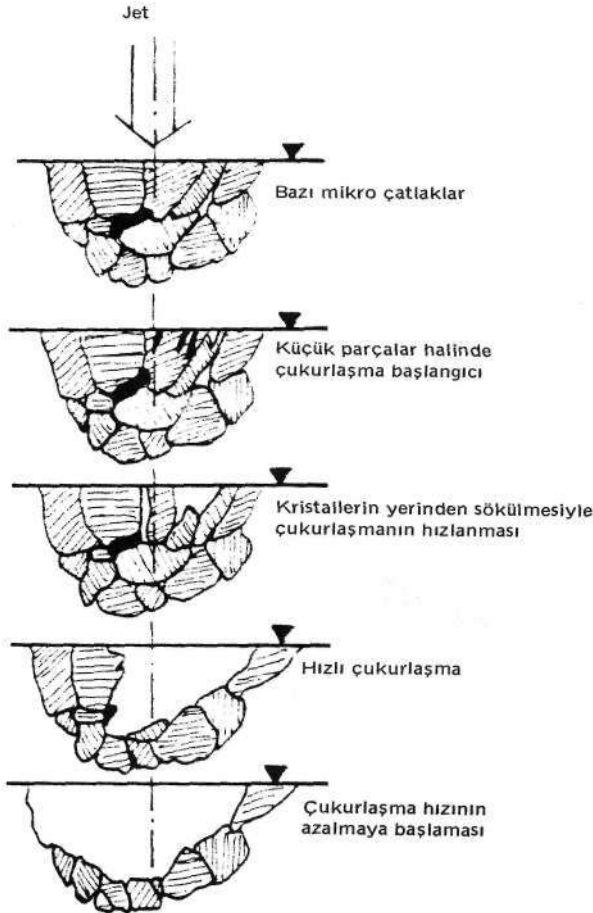


Şekil 5. Kesme işlemini açıklamak için jet-malzeme arakesitinin geometrisi(13).

Hashish ve duPlessis de momentum aktarımı analizine dayanan modeller üzerinde çalışmışlardır. Plastik modeller üzerine yaptıkları deneylerle malzemelerin kesilme ve kırılma biçimlerini önceden belirlemeyi amaçlamışlardır(14).

Erdman-Jesnitser ve arkadaşları, sabit bir jet kırılğan ve kristalli bir kayaç yüzeyine tutulduğu zaman yüzeyde oluşan olayları incelemişlerdir. Jetin uygulanmaya başlamasıyla ilk olarak yüzeyde çatlakların oluştuğu, işleme devam edilince çatlak durumuna ve tane boyutuna göre bir çukurun şekillendiğini gözlemişlerdir. Çukurun derinleşmesi ve genişlemesinin zamana bağlı olması yanında çatlakların yayılma biçimine, kristallerdeki çatlaklara ve kristallerle matriks arasındaki sınırlara da bağlı olduğunu kaydetmişlerdir. Jetin, bir süre sonra kayaç yüzeyinde hiçbir etkileme oluşturmadığını ve derinleşmenin durduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 6) (15).

Kesikli jetler ve sutopları da bir çok araştırmacı tarafından parçalama çalışmalarında kullanılmıştır. Araştırmacılar, parçalanmanın ilk 5 ms'den



Şekil 6. Kristalli-kırılğan kayaçların kesilme biçimi(15).

sonra çatlaklar halinde başladığını ve çatlakların hızla yayılmasıyla parçalanmanın gerçekleştiğini gözlemişlerdir. Parçalanmayı saklayan ana etkenin çarpma etkisi olduğunu ve jet basıncı/kayacın tek eksenli basınç dayanımı oranının artmasıyla kesme enerjisinin azaldığını kaydetmişlerdir(5,16, 17).

Chermensky, sutopuyia, kömür ve kumtaşı parçalama çalışmaları yapmış ve en uygun sutopu basıncının, tek eksenli basınç dayanımlarının 10 katı kadar olması gerektiğini ileri sürmüştür. Bu bağıntı basıncın mertebesi hakkında bir fikir edinmek için verilmiştir(18). Bresse ve arkadaşları sutopuyia yaptıkları çalışmalarda kumtaşı için  $500 \text{ J/cm}^3$ , kireçtaşı için  $2000 \text{ J/cm}^3$  ve granit için  $5000 \text{ J/m}^3$  lük spesifik parçalama enerjisi gerektiğini hesaplamışlardır(19).

Birçok araştırmacı da mekanik kesicilerle su jetlerinin birlikte kullanılması üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Kesicilerin, kayaçlara temas ettiği kısımların hemen önüne gelecek şekilde yönlendirilmiş su jetleriyle kayaç önceden gevşetilmekte ve kayacın kesme direnci azaltılmaktadır. Bu tür deneylerin sonuçları galeri açma makinalarının tasarımında kullanılmaktadır(20,21).

### 3.1.2. Kömür Kesme Çalışmaları

Laboratuvarında kömür kesme deneyi yapmada büyük güçlükler vardır. İlk güçlük, yerindeki bakir kömürle laboratuvar numuneleri arasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Numuneler üzerindeki basınçların kalkmış olması ve çevresel değişimler nedeniyle elde edilen sonuçların yalnız kendi aralarında kıyaslanmaları gerekmektedir. Üstelik, dardan alınan numunelerin bütünlük içinde korunması oldukça zordur. Bunun için, alınan numuneler ya anında deneysel işleme tabi tutulmalı ya da özel koruma önlemleri ile taşınmalıdır. Bu amaçla, beton kalıplama veya numunelerin yüzeylerinin balmumu ile kaplanması yoluna gidilmektedir. Ayrıca, laboratuvar çalışmaları için "toz kömür-çimento" karışımından hazırlanan briket numuneler de kullanılmaktadır. Bu numuneler kömürün doğal olarak içerdiği süreksizlikleri içermedikleri için daha çok test çalışmalarında kullanılmaktadırlar.

Kayaçların kesilmesi ve parçalanmasında kullanılan kuramlar ve elde edilen sonuçların çoğu kömür için de geçerlidir. Kömür kesme deneyleri de hem devamlı ve hem de kesikli jetlerle yapılmıştır.

Nikonov ve Goldin, devamlı jetlerle çalışmışlar ve özellikle kömürün sertliğinin kesmede ne kadar etkili olduğunu gözlemişlerdir. Etkilemenin başlaması için gerekli jet basıncının

$$P_{kr} = k \cdot f \quad [4]$$

düzeyinde olması gerektiğini belirtmişlerdir. Burada;

$P_{kr}$  : Kritik etkileme basıncı (MPa),

$f$  : Protodjakonov sertlik indeksi (tek eksenli basınç dayanımının 1/100'ü kadar),

$k$  : 35-50 arasında jir katsayıdır(22).

Amerika'da Summers ve arkadaşları, devamlı su jetleriyle kazı yapan bir kömür kesme makinası tasarımını geliştirmek için jir kaç seri deney yapmışlardır. Ocaktan aldıkları 20x30 cm boyutundaki numuneleri 5 m/dak'lık geçiş hızında tabakalaşma düzlemine dik ve paralel doğrultuda kesmişlerdir. Sonuçta, basıncın ve nozül çapının artmasıyla kesilen yarığın boyutlarının arttığı ve kesme enerjisi değerlerinin 35 J/cm<sup>3</sup>'e kadar düştüğünü gözlemişlerdir(23,24).

du Plessis ve Hashish, Kanada'da Alberta'nın Drumheller sahasından aldıkları linyit numuneleri üzerinde kesme deneyleri yapmışlardır. Kesme işleminde etkin olan nozül çapı, basınç, geçiş hızı ve etkileme uzaklığını değiştirerek yaptıkları deneyler sonucunda, bir ton kömür kazmak için 31,3 MJ'lük bir enerjiye gerek olduğunu hesaplamışlardır. Tabakalaşma düzlemine paralel doğrultuda kesme yapılırsa kesme enerjisinde % 45'e varan bir azalmanın olacağını da belirlemişlerdir. Tek bir geçiş yerine, aynı geçiş .üresinde hızlı olarak yapılacak birkaç geçişle (iki, üç . . . .) kesme enerjisinin daha da azalacağını ? jz !mı şlerdir(25).

Chermensky, dakikada 60 atış yapan bir suto-puyla yaptığı çalışmaların sonucunda sert ve çatlaksız bir damardan bir ton kömür kazmak için 0,86-1,02 MJ'lük enerjiye gereksinim olduğunu tespit etmiştir(18).

Bidromekanik körnür k. ısı çalışmaları da yapılmıştır. Moodie, bir kömür sabanı üzerine 504 MPa basınca sahip su jetlerini yerleştirerek bir seri deney yapmıştır. Sonuçta, kazılacak kömürün su jetleriyle önceden gevşetilmiş olması nedeniyle keskilere gelen kesme kuvvetlerinin azaldığını ve kazı randımanının arttığını gözlemiştir(26). Benzer çalışma B.Almanya'da 70 MPa basınca sahip jetlerle yapılmıştır. Devumlu ve kesikli su jetleri sabanlı

birlikte ayrı ayrı kullanılarak kesme kuvvetlerinin değişimi gözlenmiştir(27).

Araştırmacılar, deney sonuçlarının pratikte nasıl uygulanabileceğini ve kullanılacak makinaların performanslarının ne olabileceğini raporlarında belirtmişlerdir. Chermensky, 160-200 kW'lik bir güçle çalışan bir suto-puyla dakikada 3-8 ton kömür kazılabileceğini kaydetmiştir. Summers ve arkadaşları kendi verilerini uzunayak arınında salt su jetleri ile kazı yapabilen bir kesme makinasının tasarımında kulanmışlardır(28). Benzer bir makina B.Almanya'da geliştirilmiş ve 215 kW gücündeki bu makina ile dakikada 9,0-9,5 m<sup>2</sup>'lik bir kazı alanı açılabilceği belirtilmiştir(29).

### 3.1.3. Delik Delme

Arama, hazırlık ve üretim çalışmalarında açılan sondaj deliklerinin ve ateşleme deliklerinin hızlı ve ekonomik olarak açılması istenir. Özellikle derin petrol sondajlarında delme dizisinin ucundaki matkabın delikten geri çekilerek değiştirilmesi çok zaman almaktadır. Bunun için yeni delik delme yöntemleri geliştirilmektedir.

Lazer ve elektron bombardımanı ile delik delme araştırması yapan bir grup araştırmacı bu tür çalışmaların bugün için verimli olamayacağını, bunun yerine hidrolik ve hidromekanik delik delmenin daha başarılı sonuçlar vereceğini kaydetmişlerdir. Yaptıkları deneylerle, su jetlerinin matkaba uygun konumlarda yerleştirilmesiyle ilerleme hızının 3 kat artacağını gözlemişlerdir(36)

Su jetleriyle ateşleme deliklerinin açılmasında iki teknik kullanılmaktadır. Birinci teknikte, yalnız su jetleri kullanılarak delik delinmektedir. Bu teknik öncelikle Amerika ve Kanada'da geliştirilmiştir. Summers ve arkadaşları, 69 MPa basınca sahip bir su jetiyle kumtaşında açtıkları 30 mm çaplı bir delikte 0,4 m/dak'lık bir ilerleme hızına ulaşmışlardır. Aynı grup daha sonraları 1 m/dak'lık bir hıza ulaşmışlardır(31). Kanada'da Veenhuizen ve arkadaşları, 175 MPa basınca sahip bir su jeti ile kumtaşında açtıkları 24 mm çaplı bir delikte 3,3 m/dak'lık bir ilerleme hızına ulaşmışlardır(32).

İkinci teknikte ise darbeli delik delme makinaları ile su jetleri birlikte kullanılarak delik delinmektedir. Bu teknik daha çok Japon araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Burgunun ucuna yerleştirilen nozüller yardımıyla delik dibine yüksek basınçlı su verilerek ön gevşeme sağlanmaktadır. Bu yöntemle bilinen delik delme yöntemlerine göre

2-5 kat daha fazla bir ilerleme hızına ulaşılabildiği kaydedilmiştir(33).

#### 3.1.4. Tünel Açma

Su jetlerinin bilinen tünel açma makinalarının kesme kafalarına uygun konumlarda yerleştirilmesiyle daha hızlı ilerlemeler sağlanabileceği birçok araştırmacı tarafından kanıtlanmıştır. Keskilere gelen kesme kuvvetleri azaldığı için yeni kesme kafası tasarımları yapılmaktadır. Ayrıca toz sorunu ortadan kalkmaktadır. Bu teknik özellikle çok sert kayalarda tünel açma çalışmalarında kullanılmak üzere geliştirilmektedir. Salt su jetlerinin kullanılmasıyla yapılan tünel açma çalışmaları da araştırılmaktadır(20,34).

#### 3.1.5. Hidrolik ve Hidromekanik Kazı Hidrolik Madencilik

Yüksek basınçlı su jetleriyle laboratuvarında yapılan kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar madencilik alanında uygulamaya konulmuştur. Salt yüksek basınçlı su jetleriyle hidrolik olarak veya yüksek basınçlı su jetleriyle mekanik kazıcıların birlikte kullanılmasıyla hidromekanik olarak kazı yapılan madencilik yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar hidrolik madencilik olarak bilinmektedir.

Hidrolik madencilik terim olarak cevherin, arından su gücüyle kazılmasından su-cevher karışımının hidrolik olarak taşınmasına kadar olan tüm çalışmaları kapsamaktadır. Kazılan cevherin suyla arından uzaklaşması hidrolik madencilikğin ön koşullarından birisidir. Bu koşul daha çok kömür kazısında sağlanabildiği için hidrolik madencilik kömür işletmeciliği alanında yaygın olarak uygulanmaktadır. Nispeten yumuşak kömürler hidrolik olarak, sert ve çok sert kömürler hidromekanik olarak kazılmaktadır(35,36).

Hidrolik kömür madencilikği hızlı bir gelişme halindedir. Hidrolik üretim yöntemleri, özellikle bilinen üretim yöntemleriyle ekonomik ve güvenli bir işletme yapma olanağı az olan çok ince ve çok kalın dik damarlarda başarıyla uygulanmaktadır(35). Ayrıca, grizu patlama riskinin ortadan kalkması ve toz sorununun önüne geçilmiş olması gelişmeyi daha da hızlandırmaktadır.

Başta Sovyetler Birliği, Kanada, Japonya ve Çin Halk Cumhuriyeti olmak üzere birçok ülkede yaygın olarak hidrolik üretim yöntemleri kullanılmaktadır.

#### 3.1.6. Kirli Yüzeylerin Temizlenmesi, Buzlu ve Donmuş Zeminlerin Kırılması

Kirli, paslı, kireçlenmiş vs. yüzeyler ve borular

düşük basınçlı su jetleri ile temizlenmektedir. Kir ve pas bir kabuk şeklinde soyulmakta ve metal yüzeylerin pasları kıvılcımsız ve tozsuz olarak giderilmektedir(37). Buzlanan yolların, köprülerin, uçak pistlerinin ve boru hatlarının hasar görmeden temizlenmesinde de su jetleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle temizlemenin daha ekonomik olduğu kaydedilmektedir(38).

#### 3.2. Hassas Kesme Çalışmaları

Oldukça küçük çaplı ve çok yüksek basınçlı su jetlerinin geliştirilmesiyle metallerin ve diğer malzemelerin hassas olarak kesilmesi mümkün olmuştur. Sanayide kullanılan bir bıçak, bir testere veya delici bir aletin yerini hassas su jetleri almaya başlamıştır. Döküm parçalarında görülen döküm kumu, döküm çapağı ve fazlalıklar hasarsız ve kıvılcımsız olarak temizlenebilmektedir. Su jetleri ile yumuşak metaller kesilebilmektedir. Kağıt ürünleri ve camın su jetleriyle kesilmesiyle mekanik kesicilerle kesilenlere göre çok daha düzgün kenarlar elde edilmektedir. Bilgisayar programları ile donatılmış robotlara takılan su jetleri ile hassas profillerin çıkartılması mümkün olmakta ve hatta oymacılık işleri yapılabilmektedir(39).

## 4. SONUÇLAR

Sonuç olarak, yüksek basınçlı su jeti teknolojinin gelişmesine paralel olarak laboratuvarında yapılan kesme deneylerinin sonuçları sanayi ve arazi uygulamalarına geçirilmiştir. Yüksek basınçlı su jetleri özellikle kömür madencilikği alanında çok yaygın olarak kullanılmaktadır ve bunlara bağlı olarak hidrolik üretim yöntemleri geliştirilmektedir. Su jetleriyle klasik kazı ve delme araçlarının birlikte kullanıldığı hidromekanik kazı ve delme yöntemleri de hızla gelişmektedir. Hidromekanik yöntemler, daha çok tünel açma ve delik delme çalışmalarında giderek yaygınlaşmaktadır.

## KAYNAKLAR

1. CONTRACTOR, D.M., Application of Fluid Transients to Hydraulic Mining, ASME 71-WA/FE-16, 1971, 8 s.
2. LEE, R.D., Jet Cutting Progress, Chart. Mech. Engr. Cilt 21, No. 6, 1974, s. 69-72.
3. McCARTY, M.J., MOLLOY, N.A., Review of Stability of Liquid Jets and The Influence of Nozzle Design, Che. Eng. J. Cilt. 7, 1974, s. 1-20.
4. FARMER, I.W., ATTEWELL, P.B., Rock Penetration by High Velocity Water Jet, A Review of The General Problem and An Experimental Study, Int. J. of Rock Mech. and Min. Sei., Cilt 2, No. 2, Jul. 1965, s. 135-153.



5. MOODIE, K., ARTINGSTALL, G., Some Experiments on The Application of High Pressure Water Jets For Mineral Excavation, Proc. 1st. Int. Symp. on Jet. Cut. Tech., Coventry, Apr. 5-7, 1972, Paper E3, s. 25-44.
6. ENDY, B., Experimental Studies of Pulsed Water Jets, Proc. 3rd. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Chicago, May 11-13, 1976, Paper B2, s. 11-26.
7. EDWARDS, D.G., WELSH, D.J., The Influence of Design and Material Properties on Water Cannon Performance, Proc. 5th. Symp. on Jet Cut. Tech., Hanover, Jun. 2-4, 1980, Paper G3, s. 353-368.
8. THORNE, P.F., THEOBALD, CR., The Effect of Nozzle Geometry on The Turbulent Structure of Water Jets-A Photographic Study, Proc. 4th. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Canterbury, Apr. 12-14, 1978, Paper A4, s. 10.
9. LEACH, S.J., WALKER, G.L., "Some Aspects of Rock Cutting by High Speed Water Jets, Royal Soc. London, Phil. Trans. Ser. A, Cilt 260, No. 1110, 1966, s. 295-308.
10. WALLACE, J.J., PRICE, G.C., ACKERMAN, M.J., Hydraulic Coal Mining Research: Equipment and Preliminary Tests, Bureau of Mines, RI 5915, 1961.
11. ZAKIN, J.L., SUMMERS, D.A., The Effect of Viscoelastic Additives on Jet Structures, Proc. 3rd. Symp. on Jet Cut. Tech., Chicago, May 11-13, 1976, Paper A4, s. 47-65.
12. MELLOR, M., Some General Relationships For idealized Jet Cutting, Proc. 1st. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Coventry, Apr. 5-7, 1972, Paper A2, s. 12.
13. CROW, S.C., A Theory of Hydraulic Rock Cutting, Int. J. of Rock Mech. and Sei., Cilt 10, 1973, s. 576-584.
14. HASHISH, M., duPLESSIS, M.P., Theoretical and Experimental Investigation of Continuous Jet Penetration of Solids, Trans. ASME, J. Engng. Int., Cilt 100, No. 1, Feb., 1981, s. 84-88.
15. ERDMAN-JESNITZER, F., LOUIS, H., WIEDEMEIER J., Rock Excavation With High Speed Water Jets. A View on Drilling and Cutting Results of Rock Materials in Relation to Their Fracture Mechanical Behaviour, Proc. 5th. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Hanover, Jun. 2-4, 1980, Paper C3, s. 14.
16. ARTINGSTALL, G., MOODIE, K., The Cutting and Fracturing of Rocks by High-Pressure Water Jets, Min. Eng., No. 154, Jul., 1973, s. 505-515.
17. DANIEL, I.M., ROWLANDS, R.E., LABUS, T.J., Photoelastic Study of Water Jet Impact, Proc. 2nd. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Cambridge, Apr. 2-4, 1974, Paper A1, s. 18.
18. CHERMENSKY, G.P., Breaking Coal and Rock With Pulsed Water Jets, Proc. 3rd. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Chicago, May 11-13, 1976, Paper D4, s. 17.
19. BRESSEE, J.C., CRISTY, G.A., McCLAIN, W.C., Some Comparisons of Continuous and Pulsed Jets For Excavation, Proc. 1st. Symp. on Jet Cut. Tech., Coventry, Apr. 5-7, 1972, Paper B9, s. 8.
20. HOSHINO, K., NAGANO, T., TSUCHISHAMA: H., Rock Cutting and Breaking Using High Speed Water Jets Together With 'TBM' Cutters, Proc. 1st. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Coventry, Apr. 5-7, 1972, Paper B6, s. 12.
21. HOOD, D., Cutting Strong Rock With A Drag Bit Assisted by High Pressure Water Jets, J. of South African Inst. of Mining and Metallurgy, Nov., 1976, s. 79-90.
22. NIKONOV, G.P., GOLDIN, Yu. A., Coal and Rock Penetration by Fine Continuous High Pressure Water Jets, Proc. 1st. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Coventry, Apr. 5-7, 1972, Paper E2, s. 16.
23. SUMMERS, D.A., PETERS, J.F., Preliminary Experimentation on Coal Cutting in The Pressure Range 35 to 200 MN/m<sup>2</sup>, Proc. 2nd. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Cambridge, Apr. 2-4, 1976, Paper H2, s. 11.
24. SUMMERS, D.A., MAZURKIEWICZ, M., The Effect of Jet Traverse Velocity on The Cutting of Coal and Jet Structure, Proc. 3rd. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Chicago, May 11-13, 1976, Paper D5, s. 15.
25. duPLESSIS, M.P., HASHISH, M., Experimental and Theoretical Investigation of Hydraulic Cutting of A Western Canadian Coal, Proc. 5th. Symp. on Jet Cut. Tech., Hanover, Jun., 2-4, 1980, Paper E3, s. 17.
26. MOODIE, K., Coal Ploughing Assisted With High-Pressure Water Jets, Proc. 3rd. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Chicago, May, 11-13, 1976, Paper D6, s. 15.
27. KRAMER, T., Investigation of High-Pressure Water Jet Cutting Techniques For Coal Winning, Proc. 5th. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Hanover, Jun. 2-4, 1980, Paper E7, s. 14.
28. HEINCKER, W.R., ECK, R.S., SUMMERS, D.A., LEHNHOFF, F., A Hydraulic Longwall Mining Design Concept For The Future, World Coal, Feb., 1976, s. 23-26.
29. SCHWARTING, K.H., High-Pressure Water Jet Coal Cutting-A Pioneering Underground Mining Process, M.A.N., GHH Sterkrade, News For The Mining Industry 2, 1981/82.
30. MAURER, W.C., HEILHECKER, J.K., LOVE, W.W., High-Pressure Drilling, Proc. 2nd. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Cambridge, Apr., 2-4, 1974, Paper X80-X90.
31. SUMMERS, D.A., LEHNHOFF, T.F., WEAKLY, L.A., The Development of A Water Jet Drilling System and Preliminary Evaluations of Its Performance in A Stress Situations Underground, Proc. 4th. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Canterbury, Apr., 12-14, 1978, Paper C4, s. 19.
32. VEENHUIZEN, S.D., CHEUNG, J.B., HILL, J.R.M., Water Jet Drilling of Small Diameter Holes, Proc. 4th. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Canterbury, Apr., 12-14, 1978, Paper C3, s. 12.
33. NAGANO, T., HOSHINO, K., NARITA, Y., The Development of A Water Jet Drilling Machine, Proc. 2nd. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Cambridge, Apr., 2-4, 1974, Paper E1, 10 s.
34. WANG, F.D., ROBBINS, R., OLSEN, J., Water Jet Assisted Tunnel Boring, Proc. 3rd. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Chicago, May, 11-13, 1976, Paper X, s. 9.
35. JEREMIC, M.L., Elements of Hydraulic Coal Mine Design, Trans Tech. Publication, Claustal, 1982.
36. AKÇIN, N.A., Batı Karadeniz Taşkömürü Havzasında Hidrolik Kömür Madenciliğinin Uygulanabilirliği, Tür. 5. Kömür Kong., 5-9, Mayıs, 1986, Zonguldak, s. 13-16.
37. —————, Alet Gücü Yerine Su Gücü, Meges A.Ş., Teknik Rapor.
38. MELLOR, M., Cutting Ice With Continuous Jets, Proc. 2nd. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Cambridge, Apr. 2-4, 1974, Paper G5, 11 s.
39. IMANAKA, O., FUJINO, S., SHINOHARA, K., KAWATE, Y., Experimental Study of Machining Characteristics by Liquid Jets of High Power Density up to 10<sup>8</sup> W/cm<sup>2</sup>, Proc. 1st. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Coventry, Apr., 5-7, 1972, Paper G3, 11 s.

