

**AŞINDIRICI SU JETİNİN
TEORİK ANALİZİ VE YAPAY SİNİR AĞI
YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ**

Hayriye Sevil ERĐÜR

DOKTORA TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat 2007

**THEORETICAL ANALYSIS OF ABRASIVE WATERJET
AND
MODELLING WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK**

Hayriye Sevil ERGÜR

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Mechanical Engineering

February 2007

**AŞINDIRICI SU JETİNİN TEORİK ANALİZİ VE YAPAY
SİNİR AĞI YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ**

Hayriye Sevil ERGÜR

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Bilim Dalında

DOKTORA TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Yaşar PANCAR

Şubat 2007

H.SEVİL ERGÜR' ün DOKTORA tezi olarak hazırladığı “AŞINDIRICI SU JETİNİN TEORİK ANALİZİ VE YAPAY SİNİR AĞI YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ ” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye : Prof. Dr. Yaşar PANCAR

Üye : Prof. Dr. Sedat ÜLKÜ

Üye : Prof. Dr. İrfan Karagöz

Üye : Prof. Dr. Ramazan KÖSE

Üye : Yrd. Doç. Dr. İrfan ÜREYEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xxi
1. GİRİŞ	1
2. AŞINDIRICI SU JETİ	4
2.1. Sade Su Jeti ve Aşındırıcı Su Jetiyle İşlemenin Tarihçesi	4
2.2. Aşındırıcı Su Jetiyle Kesmenin Tanımı.....	6
2.3. Aşındırıcı Su Jetiyle Kesme Sistemi	7
2.3.1. Su hazırlama sistemi	9
2.3.2. Basınçlı su üretim sistemi	12
2.4. Aşındırıcı Su Jetiyle Malzemelerin İşlenebilirliği	12
2.5. Kesme İşleminde Kullanılan Aşındırıcı Parçacıklar.....	16
2.5.1. Aşındırıcı parçacıkların özellikleri ve sınıflandırılması.....	16
2.5.2. Aşındırıcı seçimi.....	17
2.5.3. Aşındırıcı parçacık sertliği ve aşındırılan malzeme yüzeyinin kontrolü.....	18
2.5.4. Aşındırıcı parçacıkların su jetine katılma teorisi.....	22
2.6. Aşındırıcı Su Jetiyle Kesmenin Diğer Sistemlerle Karşılaştırılması.....	24
2.7. Aşındırıcı Su Jetinin Kullanım Alanları.....	28
2.8. Literatürdeki Çalışmalar.....	31
3. AŞINDIRICI SU JETİNİN TEORİK ANALİZİ	37
3.1 Aşındırıcı Su Jetiyle Kesmede Enerji Korunumu.....	39
3.1.1 Malzeme kesmede enerji transferi.....	41

İÇİNDEKİLER (devam)

3.1.2 Hava ve katı parçacıkların yüksek hızlı su jetine karıştırılmasında enerji transferi.....	44
3.1.3. Katı parçacığın karıştırılması ve ivmelenmesi işlemlerinde enerji transferi.....	46
3.1.4. Yüksek hızlı su jeti oluşumunda enerji transferi	48
3.1.5. Karıştırma odası ve odaklama tüpündeki akışın analizi	49
3.2. Aşındırıcı Su Jeti Sisteminde Kesme Parametreleri	53
3.2.1. Kesme işleminde jet dağılım karakteristikleri.....	63
3.2.1.1. Kesme derinliği üzerinde standof mesafesinin etkisi.....	65
3.2.1.2. Yüksek hızlı ASJ kesme işleminde standof mesafesi ve çoklu paso ilişkileri.....	67
3.2.2. Aşındırıcı su jetinin performansı ve kesme derinliği parametreleri.....	68
3.2.2.1. Aşındırıcı su jetiyle ulaşılan kesme derinliğinin analizi.....	74
3.2.2.2. Sünek malzemelerde maksimum kesme derinliği	77
3.2.2.3. Çok pasolu kesme ve kesme derinliğinin belirlenmesi.....	79
3.2.2.4. Aşındırıcı su jetiyle kesmede kritik ve optimum ilerleme	81
3.2.2.5. Aşındırıcı su jetiyle kesmede hassasiyet.....	82
3.2.3. Kesme verimi ve optimum kesme şartlarının belirlenmesi.....	82
4. AŞINDIRICI SU JETİ AŞINDIRMA ANALİZİ.....	84
4.1. Aşındırılan Malzeme Yüzeyinin Kontrolü	85
4.2. Kırılgan Malzemelerde Aşınma Analizi	87
4.2.1. İşlem parametrelerinin tanımı	87
4.2.2. Aşındırıcı su jetiyle işlenen kırılgan malzemelerde cep oluşumu	90
4.3. Hacimsel Aşındırmada Standof Mesafesinin Etkisi.....	91
4.4. Yüzey Pürüzlülüğü.....	92
4.4.1. Aşındırıcı su jetiyle yüzeylerde çizik oluşumu.....	99
4.4.2. Aşındırıcı su jetinin dinamik karakteristikleri ve enerjinin dağılımı...100	
4.5. Aşındırma Modelleri.....	102
4.5.1. Finnie modeli.....	102

İÇİNDEKİLER (devam)

4.5.2. Bitter modeli.....	106
4.5.3. Kesme aşınması modeli.....	108
4.5.4. Kararlı hal modeli.....	112
4.5.5. Dinamik model.....	113
4.5.6. Deformasyon ve kesme aşınması modellerinin karşılaştırılması.....	114
4.6. Kesme Aşınmasının Çarpma Açısı Üzerindeki Etkisi.....	115
4.7. Aşındırıcı Su Jetinin Modellenmesi.....	116
4.7.1. Lineer aşındırıcı su jetiyle kesme sisteminde basitleştirilmiş modelleme.....	116
4.7.2. Geliştirilmiş aşındırıcı su jetiyle kesme modellemesi.....	120
4.8. Aşındırıcı Su Jeti Sistemlerinde Ses Oluşumu.....	125
4.9. Aşındırıcı Su Jeti Sistemlerinde Maliyet Analizi.....	126
4.9.1. Kesme ve işleme maliyetini etkileyen parametreler.....	126
4.9.2. Farklı basınçlarda kesme maliyetinin karşılaştırılması.....	131
5. MATERYAL ve METOT.....	132
5.1. Giriş.....	132
5.2. Yöntem.....	133
5.2.1. Yapay sinir ağlarının (YSA) tanımı.....	133
5.2.2. Ağ yapısı.....	135
5.2.3. Yapay sinir ağlarının gelişimi ve kullanım alanları.....	139
5.3. Modelleme için Yapılan Kabuller.....	143
5.4. Gerçek Değerlerin YSA ile Modellenmesi.....	145
5.4.1. Cam için elde edilen YSA sonuçları.....	145
5.4.2. Titanyum için elde edilen YSA sonuçları.....	153
5.4.3. Alüminyum için elde edilen YSA sonuçları.....	161
5.4.4. Bakır için elde edilen YSA sonuçları.....	169
5.4.5. Pleksiglas için elde edilen YSA sonuçları.....	177
5.4.6. Kurşun için elde edilen YSA sonuçları.....	185
5.4.7. Beyaz mermer için elde edilen YSA sonuçları.....	193

İÇİNDEKİLER (devam)

5.4.8. Yumuşak çelik için elde edilen YSA sonuçları.....	201
5.4.9. Paslanmaz çelik için elde edilen YSA sonuçları.....	209
5.4.10. Takım çeliği için elde edilen YSA değerleri.....	217
5.5. Aşındırıcı Su Jeti Düzenegi.....	225
5.5.1. Giriş.....	225
5.5.2. Ölçüm ekipmanları.....	227
5.6. Aşındırıcı Su Jetiyle Kesilen Malzeme Yüzeyleri.....	231
5.7. Deneysel Verilerin YSA ile Modellenmesi.....	235
5. SONUÇLAR.....	255
6. ÖNERİLER.....	258
7. KAYNAKLAR DİZİNİ.....	261
8. EKLER.....	276

ÖZGEÇMİŞ

AŞINDIRICI SU JETİNİN TEORİK ANALİZİ VE YAPAY SİNİR AĞI YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ

Hayriye Sevil ERGÜR

ÖZET

En son geliştirilmiş imalat türlerinden birisi olan aşındırıcı su jetiyle kesme işleminin, diğer kesme teknolojilerine göre çeşitli ve belirgin üstünlüklere sahip olmasından dolayı, makine imalat sanayi ve madencilikteki kullanımları ve tercih edildiği alanlar sürekli olarak artmaktadır. İlk olarak, madencilikte kullanılmış olmasına karşın, şu anda diğer sanayi kollarındaki kullanım alanı madencilığe göre çok daha fazladır. Aşındırıcı su jetiyle kesme sistemleri; işlenecek olan malzemenin kırılğan, sünek veya kompozit olmasına bakmaksızın, çok geniş bir dağılıma sahiptirler. Başlıca yararlarından birisi, işlenmiş yüzeylerde ısdan etkilenmemesidir. Ancak, işleme sonrası kesilen yüzeyde çizik oluşma ihtimali, mahsurlarından sayılabilir. Kapasitesini ve kesme performansını arttırabilmek için, söz konusu teknolojinin çok iyi tanınması gerekir. Aşındırıcı su jetinin hidrodinamik karakteristiklerini belirlemedeki eksiklik, işlem kontrolü ve optimizasyonu için gerekli kesme performans modellerinin gelişimini sınırlamaktadır. Bu nedenle, işlem planlama ve kesme işleminin en uygun kesme performansını önceden tayin etmek için, boyutsal analizden yararlanan matematiksel modeller ve yapay sinir ağı uygulamaları kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada; aşındırıcılı su jeti sistemi teorik olarak analiz edilmiş, ayrıca deneysel veriler yapay sinir ağı yardımıyla modellenmiştir. Deneysel çalışmada, farklı kalınlıktaki değişik malzemelerin ilerleme hızları dikkate alınarak, Aşındırıcı su jeti ile kesme yönteminde yapay sinir ağının kullanılabilineceği tespit edilmiştir. Buna ek olarak, yapılan deneylerle ilerleme hızının kesilen yüzey kalitesine etkisi ve oluşan çizikler farklı malzemeler için incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşındırıcı Su Jeti, Kesme, Orifis Çapı, Standof Mesafesi, Yüzey Pürüzlülüğü, Yapay Sinir Ağları.

THEORETICAL ANALYSIS OF ABRASIVE WATERJET AND MODELLING WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Hayriye Sevil ERGÜR

SUMMARY

Abrasive water jet cutting is one of the most recently developed non-traditional manufacturing technologies being used increasingly in mining and machine production industry owing to the various distinct advantages over the other cutting technologies in last thirty years. Although been firstly used in mining nowadays it is very preferable in other manufacturing industry. Absence of the heat affected zone is the main advantage of this process. In spite of briteness, ductileness and being composites it do have rather wide machining process, but striations are the main disadvantage of this cutting technology. The technology must be known very well in order to increase the capacity and cutting performance. In this study, abrasive water jet cutting has been analysed and the experimental data at various conditions had been modelled with the aid of Artificial Neural Network. Abrasive water jet cutting applications on specimens with varying thickness and feed rate had been shown that Artificial Neural Network can be used succesfully in such method. Besides these effects of feed rate on surface quality and striations for various materials has been been investigated. The lack of knowledge in describing the hydraulic characteristics of the abrasive water jet cutting will limit the development of the process control and optimization of the modelling. Therefore, in order to determine the optimal cutting performance of the process planning and cutting processes, mathematical models with dimensional analysis and Artificial Neural Network applications are used. Analysis of water and particle by selecting suitable jet and abrasive parameters to determine the optimal jet performance is necessary.

Keywords: Abrasive Waterjet, Cutting, Orifice Diameter, Standoff Distance, Surface Roughness, Artificial Neural Network.

TEŞEKKÜR

İlk önce, tüm çalışmalarım da her zaman destek olan, bana sabrı öğreten canım anneme ve babama, içimdeki çocuğu ve yaşama sevincimi hep canlı tutan biricik kardeşime çok teşekkür ederim.

Akademik kariyere başladığım ilk günlerden bu güne kadar, Makine Mühendisliği Bölümünde ve özellikle bu çalışmamda, benden yardımlarını hiç esirgemeyen, yaptığı rehberlikten dolayı minnettar olduğum danışman hocam Prof. Dr. Yaşar PANCAR' a teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme kurulundaki destek ve emekleri için, Yrd. Doç. Dr. İrfan ÜREYEN'e; yapay sinir ağları üzerinde yapılan çalışmalardaki katkılarından dolayı, Pamukkale Üniversitesi'nden Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÖLCÜ' ye de çok teşekkür ederim.

Ayrıca yapılan deneylerde, tüm olanaklarını bizim kullanımımıza açan MAJET (İkitelli-İstanbul) firmasına ve yetkilisi Latif TAŞTAN ile Nevrez TAŞTAN Beyler' e de şükranlarımı sunarım.

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Su jeti teknolojisinin tarihsel gelişimi.....	5
2.2 Aşındırıcı su jetinin hidrolik devresi.....	7
2.3 Aşındırıcı su jeti tezgahının şematik gösterimi.....	8
2.4 Aşındırıcı su jeti nozulunun şematik gösterimleri	9
2.5 Basınç artırıcının şematik gösterimi.....	12
2.6 Aşındırıcı garnet taşının tipik şekilleri.....	16
2.7 Aşındırıcı parçacıkların uzama ve yassılık oranları.....	19
2.8 Aşındırıcı parçacıkların geometrik şekil özellikleri.....	20
2.9 Aşındırıcı parçacıkların yuvarlaklık ve küresellik faktörü.....	21
2.10 Aşındırıcı su jetiyle işlemede oluşan konikliklerin şematik gösterimi.....	26
3.1 Katı parçacık aşınmasıyla malzeme aşındırma mekanizmaları.....	37
3.2 Enerjiyi dengeleyen karıştırma ve ivmelendirme cihazı.....	46
3.3 Yüksek hızlı su jetinde orifisin şematik gösterimi.....	48
3.4 Kesme derinliği ve aşındırıcı şekli arasındaki ilişki.....	57
3.5 Aşındırıcı kütleli debisini etkileyen değişkenler.....	59
3.6 Aşındırıcı kütleli debisiyle kesme oranı arasındaki ilişki.....	61
3.7 Aşındırıcı çapı – debisi ve kesme derinliği arasındaki ilişki.....	62
3.8 Basıncın kesme derinliğine etkisi.....	68
3.9 Nozul çapının kesme derinliğine etkisi.....	69
3.10 İlerleme hızı – aşındırıcı debisinin kesme derinliğine etkisi	70
3.11 Kesme derinliğinde etkili aşındırıcı parçacık özellikleri.....	71
3.12 Aşındırıcı–su debisinin kesme derinliğine etkisi	72
3.13 Paso sayısının kesme derinliğine etkisi.....	73
3.14 Standof mesafesinin kesme derinliğine etkisi.....	73
3.15 Aşındırıcı su jetiyle kesmede maksimum kesme derinliğinin (h_{max}) şematik gösterimi.....	74
3.16 Aşındırıcı su jetiyle kesmede gözlenen çizikler.....	75

3.17	Aşındırıcı su jetiyle kesmede pürüzsüz üst yüzey ile çizikli kaba bölgenin gösterimi.....	78
3.18	Aşındırıcı su jetinde kesme bölgelerinin şematik gösterimi.....	79
4.1	Kesme kuvvetinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	86
4.2	Su basıncının orifis verimi ve sıkışma katsayısına etkisi.....	88
4.3	Su basıncının kesme derinliğine etkisi.....	88
4.4	Kırılğan beton malzemede cep oluşumu.....	90
4.5	Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametreler.....	95
4.6	Aşındırıcı parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri.....	98
4.7	Aşındırıcı su jetiyle salgılı kesmede çizik oluşumu.....	98
4.8	Aşındırıcı su jetinde aşınma bölgelerinin şematik gösterimi.....	99
4.9	Çizik oluşum aşamalarının şematik gösterimi.....	101
4.10	İlerleme hızının kesme derinliği üzerindeki etkisi.....	101
4.11	Aşındırıcı parçacığın malzemeye çarpma şekilleri.....	104
4.12	Farklı eğrilik modelleri için aşınma tipi – kesme yüzeyi arasındaki ilişki....	114
4.13	Farklı malzemelerden imal edilmiş odaklama tüplerinde çalışma ömrü.....	128
5.1	Yapay sinir ağlarının (YSA) temel elemanları.....	133
5.2	Sinir sisteminin blok diyagramı.....	135
5.3	Yapay sinir ağı (YSA) modeli.....	136
5.4	İleri ve geri beslemeli ağ yapısı.....	138
5.5	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–LM).....	145
5.6	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–SCG).....	146
5.7	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–LM).....	146
5.8	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–SCG).....	147
5.9	Ortalama mutlak yüzde hatanın nöron sayısı ile değişimi (MAPE–Test).....	148

5.10	Ortalama hata kareleri kökünün nöron sayısı ile değişimi (RMSE–Test).....	148
5.11	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Eğitim–YSA).....	149
5.12	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Test–LM).....	149
5.13	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 2000$ bar, YSA–LM).....	150
5.14	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 2000$ bar, YSA–SCG).....	150
5.15	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 4000$ bar, YSA–LM).....	151
5.16	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 4000$ bar, YSA–SCG).....	151
5.17	Gerçek kesme hızının basınca göre değişimi ($t = 100$ mm).....	152
5.18	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–LM).....	153
5.19	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–SCG).....	154
5.20	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–LM).....	154
5.21	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–SCG).....	155
5.22	Ortalama mutlak yüzde hatanın nöron sayısı ile değişimi (MAPE–Test).....	155
5.23	Ortalama hata kareleri kökünün nöron sayısı ile değişimi (RMSE–Test).....	156
5.24	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Eğitim–YSA).....	157
5.25	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Test–LM).....	157
5.26	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 2000$ bar, YSA–LM).....	158
5.27	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 2000$ bar, YSA–SCG).....	158

5.28	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 4000 bar, YSA–LM).....	159
5.29	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 4000 bar, YSA–SCG).....	159
5.30	Gerçek kesme hızının basınca göre değişimi (t = 100 mm).....	160
5.31	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–LM).....	161
5.32	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–SCG).....	162
5.33	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–LM).....	162
5.34	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–SCG).....	163
5.35	Ortalama mutlak yüzde hatanın nöron sayısı ile değişimi (MAPE–Test).....	163
5.36	Ortalama hata kareleri kökünün nöron sayısı ile değişimi (RMSE–Test).....	164
5.37	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Eğitim–YSA).....	165
5.38	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Test–LM).....	165
5.39	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 2000 bar, YSA–LM).....	166
5.40	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 2000 bar, YSA–SCG).....	166
5.41	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 4000 bar, YSA–LM).....	167
5.42	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 4000 bar, YSA–SCG).....	167
5.43	Gerçek kesme hızının basınca göre değişimi (t = 100 mm).....	168
5.44	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–LM).....	169

5.45	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–SCG).....	170
5.46	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–LM).....	170
5.47	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–SCG).....	171
5.48	Ortalama mutlak yüzde hatanın nöron sayısı ile değişimi (MAPE–Test).....	171
5.49	Ortalama hata kareleri kökünün nöron sayısı ile değişimi (RMSE–Test).....	172
5.50	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Eğitim–YSA).....	173
5.51	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Test–LM).....	173
5.52	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 2000 bar, YSA–LM).....	174
5.53	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 2000 bar, YSA–SCG).....	174
5.54	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 4000 bar, YSA–LM).....	175
5.55	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 4000 bar, YSA–SCG).....	175
5.56	Gerçek kesme hızının basınca göre değişimi (t = 100 mm).....	176
5.57	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–LM).....	177
5.58	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–SCG).....	178
5.59	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–LM).....	178
5.60	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–SCG).....	179
5.61	Ortalama mutlak yüzde hatanın nöron sayısı ile değişimi (MAPE–Test).....	179

5.62	Ortalama hata kareleri kökünün nöron sayısı ile değişimi (RMSE–Test).....	180
5.63	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Eğitim–YSA).....	181
5.64	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Test–LM).....	181
5.65	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 2000$ bar, YSA–LM).....	182
5.66	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 2000$ bar, YSA–SCG).....	182
5.67	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 4000$ bar, YSA–LM).....	183
5.68	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 4000$ bar, YSA–SCG).....	183
5.69	Gerçek kesme hızının basınca göre değişimi ($t = 100$ mm).....	184
5.70	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–LM).....	185
5.71	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–SCG).....	186
5.72	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–LM).....	186
5.73	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–SCG).....	187
5.74	Ortalama mutlak yüzde hatanın nöron sayısı ile değişimi (MAPE–Test).....	187
5.75	Ortalama hata kareleri kökünün nöron sayısı ile değişimi (RMSE–Test).....	188
5.76	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Eğitim–YSA).....	189
5.77	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Test–LM).....	189
5.78	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 2000$ bar, YSA–LM).....	190
5.79	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 2000$ bar, YSA–SCG).....	190

5.80	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 4000 bar, YSA–LM).....	191
5.81	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 4000 bar, YSA–SCG).....	191
5.82	Gerçek kesme hızının basınca göre değişimi (t = 100 mm).....	192
5.83	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–LM).....	193
5.84	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–SCG).....	194
5.85	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–LM).....	194
5.86	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–SCG).....	195
5.87	Ortalama mutlak yüzde hatanın nöron sayısı ile değişimi (MAPE–Test).....	195
5.88	Ortalama hata kareleri kökünün nöron sayısı ile değişimi (RMSE–Test).....	196
5.89	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Eğitim–YSA).....	197
5.90	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Test–LM).....	197
5.91	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 2000 bar, YSA–LM).....	198
5.92	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 2000 bar, YSA–SCG).....	198
5.93	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 4000 bar, YSA–LM).....	199
5.94	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 4000 bar, YSA–SCG).....	199
5.95	Gerçek kesme hızının basınca göre değişimi (t = 100 mm).....	200
5.96	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–LM).....	201

5.97	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–SCG).....	202
5.98	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–LM).....	202
5.99	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–SCG).....	203
5.100	Ortalama mutlak yüzde hatanın nöron sayısı ile değişimi (MAPE–Test).....	203
5.101	Ortalama hata kareleri kökünün nöron sayısı ile değişimi (RMSE–Test).....	204
5.102	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Eğitim–YSA).....	205
5.103	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Test–LM).....	205
5.104	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 2000 bar, YSA–LM).....	206
5.105	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 2000 bar, YSA–SCG).....	206
5.106	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 4000 bar, YSA–LM).....	207
5.107	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 4000 bar, YSA–SCG).....	207
5.108	Gerçek kesme hızının basınca göre değişimi (t = 100 mm).....	208
5.109	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–LM).....	209
5.110	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–SCG).....	210
5.111	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–LM).....	210
5.112	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–SCG).....	211
5.113	Ortalama mutlak yüzde hatanın nöron sayısı ile değişimi (MAPE–Test).....	211

5.114	Ortalama hata kareleri kökünün nöron sayısı ile değişimi (RMSE–Test).....	212
5.115	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Eğitim–YSA).....	213
5.116	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Test–LM).....	213
5.117	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 2000$ bar, YSA–LM).....	214
5.118	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 2000$ bar, YSA–SCG).....	214
5.119	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 4000$ bar, YSA–LM).....	215
5.120	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 4000$ bar, YSA–SCG)....	215
5.121	Gerçek kesme hızının basınca göre değişimi ($t = 100$ mm).....	216
5.122	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–LM).....	217
5.123	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–SCG).....	218
5.124	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–LM).....	218
5.125	Gerçek kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–SCG).....	219
5.126	Ortalama mutlak yüzde hatanın nöron sayısı ile değişimi (MAPE–Test).....	219
5.127	Ortalama hata kareleri kökünün nöron sayısı ile değişimi (RMSE–Test).....	220
5.128	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Eğitim–YSA).....	221
5.129	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Test–LM).....	221
5.130	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 2000$ bar, YSA–LM).....	222
5.131	Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi ($p = 2000$ bar, YSA–SCG).....	222

5.132 Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 4000 bar, YSA–LM).....	223
5.133 Gerçek kesme hızının kalınlığa göre değişimi (p = 4000 bar, YSA–SCG).....	223
5.134 Gerçek kesme hızının basınca göre değişimi (t = 100 mm).....	224
5.135 Aşındırıcı su jeti tezgahı (NSJ 1630).....	225
5.136 Aşındırıcı su jeti tezgahının perspektif görünüşleri (NSJ 1630).....	226
5.137 Aşındırıcı su jeti düzeneğinde hareket sistemi.....	227
5.138 Garnet aşındırıcı parçacığı.....	228
5.139 CNC kontrol ünitesi.....	228
5.140 Basınç arttırıcı ünitesi (NSJ Ecotron 404).....	229
5.141 Kesme kafası ve bağlantıları.....	230
5.142 B tipi uygulamada çizik oluşumu (St-42/15 mm).....	231
5.143 A tipi uygulamada çizik oluşumu (St-42/30 mm).....	231
5.144 A tipi uygulamada çizik oluşumu (St-42/20 mm).....	232
5.145 B tipi uygulamada çizik oluşumu (St-42/30 mm).....	232
5.146 A tipi uygulamada çizik oluşumu (St-42/10 mm).....	232
5.147 B tipi uygulamada çizik oluşumu (St-42/5 mm).....	232
5.148 B tipi uygulamada çizik oluşumu (St-42/5 mm).....	233
5.149 A tipi uygulamada çizik oluşumu (Granit/20 mm).....	233
5.150 A tipi uygulamada çizik oluşumu (Aluminyum/4 mm).....	233
5.151 A tipi uygulamada çizik oluşumu (Bakır/6 mm).....	233
5.152 B tipi uygulamada çizik oluşumu (304-paslanmaz çelik/55 mm).....	234
5.153 A tipi uygulamada çizik oluşumu (304-paslanmaz çelik/60 mm).....	234
5.154 Kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–LM).....	242
5.155 Kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim–YSA–SCG).....	243
5.156 Kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–LM).....	243

5.157	Kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Test–YSA–SCG).....	244
5.158	Ortalama mutlak yüzde hatanın nöron sayısı ile değişimi (MAPE–Test).....	244
5.159	Ortalama hata kareleri kökünün nöron sayısı ile değişimi (RMSE–Test).....	245
5.160	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Eğitim–YSA).....	246
5.161	Korelasyon katsayısının değişimi (R^2 –Test–LM).....	246
5.162	Kesme hızının (St-42) kalınlığa göre değişimi ($p = 3000$ bar, YSA–LM).....	247
5.163	Kesme hızının (St-42) kalınlığa göre değişimi ($p = 3000$ bar, YSA–SCG).....	247
5.164	Kesme hızının (Al) kalınlığa göre değişimi ($p = 3000$ bar, YSA–LM).....	248
5.165	Kesme hızının (Al) kalınlığa göre değişimi ($p = 3000$ bar, YSA–SCG).....	248
5.166	Kesme hızının (Beyaz mermer) kalınlığa göre değişimi ($p = 3000$ bar, YSA–LM).....	249
5.167	Kesme hızının (Beyaz mermer) kalınlığa göre değişimi ($p = 3000$ bar, YSA–SCG).....	249
5.168	Kesme hızının (INOX-316) kalınlığa göre değişimi ($p = 3000$ bar, YSA–LM).....	250
5.169	Kesme hızının (INOX-316) kalınlığa göre değişimi ($p = 3000$ bar, YSA–SCG).....	250
5.170	Kesme hızının (Granit) kalınlığa göre değişimi ($p = 3000$ bar, YSA–LM).....	251
5.171	Kesme hızının (Granit) kalınlığa göre değişimi ($p = 3000$ bar, YSA–SCG).....	251
5.172	Kesme hızının (Bakır) kalınlığa göre değişimi ($p = 3000$ bar, YSA–LM).....	252

5.173	Kesme hızının (Bakır) kalınlığa göre değişimi (p = 3000 bar, YSA–SCG).....	252
5.174	En iyi ağ yapısı [2–14–3–1] ve nöron sayısı (YSA–SCG).....	253
5.175	En iyi ağ yapısı [2–13–2–1] ve nöron sayısı (YSA–LM).....	253
5.176	En iyi ağ yapısı [2–1] ve nöron sayısı (Test–YSA).....	254
A1	ASJ Tezgâhında Kesme Kafasının Görünüşü.....	276
A2	ASJ Tezgâhında Malzeme Kesimi.....	276
B1	ASJ Tezgâhında Kesme Nozulu ve Aşındırıcı Hattı.....	277
B2	ASJ Tezgâhında Taşıyıcı Konsol ve Kesme Kafası.....	277
C1	Granit uygulaması.....	278
C2	Granit – Seramik Uygulaması.....	278
D1	Paslanmaz Sac– Granit Uygulaması.....	279
D2	Sarı Malzeme – Seramik Uygulaması.....	279
E1	Sarı Malzeme Kesimi.....	280
E2	Mermer Döşeme (Granit – Seramik) Uygulaması.....	280

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Aşındırıcı su jetinin tarihçesi.....	4
2.2 ASJ ile işleme sonuçları.....	6
2.3 ASJ ile kesmede kullanılacak su için önerilen kalite değerleri.....	10
2.4 ASJ sisteminin kullanım alanları ve önerilen basınç değerleri.....	11
2.5 ASJ ile elde edilen kesme kaliteleri.....	15
2.6 ASJ ile kesmede malzeme değerleri.....	17
3.1 Aşındırıcı su jetiyle kesmede gözlenen hatalar.....	81
4.1 Boron ve tungsten karbür nozullarının karşılaştırılması.....	130
4.2 Farklı parametrelerde maliyet karşılaştırılması.....	131
5.1 Modelleme için yapılan kabuller.....	144
5.2 Aşındırıcı su jeti sisteminde cam kesme için YSA değerleri.....	152
5.3 Aşındırıcı su jeti sisteminde titanyum kesme için YSA değerleri.....	160
5.4 Aşındırıcı su jeti sisteminde alüminyum kesme için YSA değerleri.....	168
5.5 Aşındırıcı su jeti sisteminde bakır kesme için YSA değerleri.....	176
5.6 Aşındırıcı su jeti sisteminde pleksiglas kesme için YSA değerleri.....	184
5.7 Aşındırıcı su jeti sisteminde kurşun kesme için YSA değerleri.....	192
5.8 Aşındırıcı su jeti sisteminde beyaz mermer kesme için YSA değerleri.....	200
5.9 Aşındırıcı su jeti sisteminde yumuşak çelik kesme için YSA değerleri.....	208
5.10 Aşındırıcı su jeti sisteminde paslanmaz çelik kesme için YSA değerleri.....	216
5.11 Aşındırıcı su jeti sisteminde takım çeliği kesme için YSA değerleri.....	224
5.12 Deney süresince yapılan kabuller.....	235
5.13 Farklı malzemeler için aşındırıcı su jetiyle kesme sisteminde elde edilen YSA değerleri.....	236
5.14 Aşındırıcı su jetiyle kesme işleminin modellendiği YSA sisteminin özellikleri.....	237
5.15 Test değerlerine ait deneysel verilerle YSA değerlerinin karşılaştırılması.....	238
5.16 En ideal YSA ağındaki hata değerleri (Test–LM).....	238

5.17	En ideal YSA ağındaki hata değerleri (Test–SCG).....	238
5.18	En ideal YSA ağındaki hata değerleri (Eğitim–SCG).....	239
5.19	En ideal YSA ağındaki hata değerleri (Eğitim–LM).....	240
5.20	Deneysel verilerle YSA değerlerinin karşılaştırılması (Eğitim–YSA).....	241
F1	Aşındırıcı su jeti düzeneğine ilişkin maliyet tablosu.....	281

SİMGELER VE KISALTMALAR

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
A_h	Birim alana düşen çarpışma sayısı (adet/m ²)
A_0	Kesme önyüzündeki toplam alan (m ²)
A_p	Aşındırıcı parçacık alanı (m ²)
A_w	Aşındırıcı su jetiyle temas eden cidar alanı (m ²)
a_s	Kesik alanı (m ²)
a_1, a_2, a_3	Kesme derinliği ile su jeti kuvveti arasındaki çarpım katsayısı
b_m, b_c	Radyal ve aksenal yöndeki parçacık temas eni (mm)
b_p	Minimum aşındırıcı parçacık eni (mm)
b_s	Kesik eni (m)
b_1, b_2, b_3	Aşındırıcı parçacığın ortalama pürüz yüksekliği ile kesme derinliği arasındaki çarpım katsayısı
$c_{1,2}, c_3, C_{1,2}$	Aşındırıcı parçacığın ortalama pürüz yüksekliği ile su jeti kuvveti arasındaki çarpım katsayısı
C_0	Kütlesel debi tanım sayısı (1/kg)
λ_1, λ	Aşındırılan malzeme hacmi için çarpım katsayıları
C_{12}, C_{13}	Standof mesafesiyle kesme derinliği arasındaki çarpım katsayısı
C_7, C_8	Kesme derinliğiyle ilerleme hızı arasındaki çarpım katsayısı
C_9, C_{10}, C_{11}	Çarpışma hızı ile sayısı arasındaki çarpım katsayısı
C_{do}	Orifis debi katsayısı
C_f, C_v	Sürtünme ve hız katsayısı
C_m	Kesme alanı boyunca uygulanan ortalama kuvvet (N)
C_s, C_y	Katılarda dalga yayılım hız katsayısı ve sıkışabilirlik katsayısı

D, d_0	Orifis çapı (mm)
D_M	Ortalama tane boyutu (mm)
d_a	Elastik–plastik deformasyon bölgesindeki aşındırıcı çapı (mm)
d_c	Köşeli aşındırıcı parçacığın ortalama çapı (mm)
d_w, d_n	Nozul çapı (mm)
d_{daire}	Dairesel parçacıkların çapı (mm)
d_F, d_j	Odaklama tüpü ve efektif jet çapı (mm)
d_p	Partikül çapı (mm)
d_s	Karıştırma tüpü emme çapı (mm)
d_{pex}, d_{pin}	Nozul çıkışındaki ve girişindeki parçacık çapı (mm)
d_{min}, d_{max}	Minimum ve maksimum aşındırıcı parçacık çapı (mm)
E	Elastisite (Young) modülü (Nm)
E_A	Jetin malzemeye çarpma anındaki kinetik enerjisi (Nm)
E_a	Aşındırıcı parçacığın malzemeye çarpma anındaki kinetik enerjisi (Nm)
E_p	Aşındırıcı parçacıkların ortalama kinetik enerjisi (Nm)
E_w, E_{ex}	Suyun nozul girişindeki ve çıkışındaki kinetik enerjisi (Nm)
E_{FR}, E_M	Malzemenin kopması ve malzemenin kesilmesi için gerekli enerji (Nm)
$E_{harcanan}$	İşleme (aşınma, kesme, sürtünme v.b.) sırasında harcanan enerji (Nm)
E_N	Boyutsuz aşındırma sayısı
E_{PC}	Ezilen parçacıkların kinetik enerjisi (Nm)
E_S	Yüksek hızlı su jetinin (süspansiyon) enerjisi (Nm)
E_{SP}	Yüksek hızlı jetindeki (süspansiyon) parçacıkların enerjisi (Nm)
E_{STR}	Gerilme dalgaları tarafından yutulan enerji (Nm)

E_{SW}	Yüksek hızlı jetteki (süspansiyon) suyun enerjisi (Nm)
E_W	Su jetinin ivmelenme enerjisi (Nm)
$F_0, F_{\text{şekil}}$	Dairesellik ve şekil çarpanı (faktörü)
f_e	Elastik çarpışmada parçacık sürtünme katsayısı
F_E	Su jetine havanın katılmasıyla oluşan parçacık çarpma kuvveti (N)
F_F	Aşındırıcı su jeti sürtünme kuvveti (N)
F_S	Yüksek hızlı süspansiyon oluşumunda parçacık kuvveti (N)
F_W	Aşındırıcı su jeti kuvveti (N)
f_w	Suyun sürtünme katsayısı
h_e	Hertz teorisine göre malzemedeki elastik dalma miktarı (mm)
h_{max}	Maksimum kesme derinliği (mm)
h_p	Plastik deformasyonda kesme derinliği (mm)
$h_{p\text{max}}$	Plastik deformasyonda maksimum kesme derinliği (mm)
H_M	Malzeme sertliği (Rc)
H_p	Aşındırıcı parçacık sertliği (Rc)
H_t, L	Toplam dalma derinliği ve aşındırıcı parçacık temas boyu (mm)
K	Düşey ve yatay eksenindeki direnç kuvvetlerinin oranı
K'	Akış katsayısı
K_w	Yutma katsayısı (1/m)
L_h	Birim uzunluk boyunca çarpışma sayısı (adet/m)
l_p	Bağıl uzama miktarı (mm)
l_F	Odaklama tüpü boyu (mm)
m_a, m_A	Çarpışan aşındırıcıların toplam kütlesi ile aşındırıcı su jetinin kütlesi (kg)
m_M, m_w	Aşındırılan malzeme ve suyun kütlesi (kg)

m_p	Tek bir aşındırıcı parçacık kütlesi (kg)
\dot{m}_A, \dot{m}	Aşındırıcı su jetinin kütleli debisi (kg/s)
\dot{m}_w, \dot{m}_p	Suyun ve aşındırıcı parçacığın kütleli debisi (kg/s)
\dot{M}_a, \dot{M}	Su jetine katılan parçacıkların toplam kütleli debisi (kg/s)
N_m	İşlenebilirlik katsayısı
N_{opt}, N_p	Optimum paso sayısı ve aşındırıcı parçacık sayısı (adet)
N_R	Aşındırıcı parçacıklarda köşe katsayısı
$P_{karışım}$	Karışım odasındaki basınç (N/m ²)
p_L	Borudaki basınç kaybı (N/m ²)
P_m, P_l	Radyal ve aksel yöndeki basınç dağılımı (N/m ²)
P_{ort}, P_w	Jet ana bölgesindeki ortalama dinamik basınç ve su jeti basıncı (N/m ²)
$P_{thr}, P_{eşik}$	Su jeti eşik basıncı (N/m ²)
$P_x, P_y,$	Su jeti basıncının -x ve -y bileşenleri (N/m ²)
Q	Bitter modelindeki deformasyon aşınmasında toplam enerji (Nm)
Q_a	Elastik-plastik deformasyon bölgelerinde depolanmış elastik enerji (Nm)
Q_e	Plastik deformasyon bölgesinde depolanmış elastik enerji (Nm)
Q_p	Kesik oluşturmak için yutulan plastik enerji (Nm)
Q_0	Elastik deformasyon bölgelerinde depolanmış elastik enerji (Nm)
Q_F	Jet içerisinde sürtünen su ve aşındırıcıların hacimsel debisi (m ³ /s)
\dot{Q}_w	Sade su jetinin hacimsel debisi (m ³ /s)
r_a	Elastik-plastik deformasyon bölgesindeki aşındırıcı yarıçapı (mm)
r_p	Plastik deformasyonda efektif parçacık yarıçapı (mm)
r_{daire}	Dairesel parçacıkların yarıçapı (mm)

R_a	Aşındırıcı parçacığın ortalama pürüz yüksekliği (μm)
R_e	Aşınma direnci (N)
R_x, R_y	Yatay ve düşey eksendeki direnç kuvvetleri (N)
r_E	Bağıl uzama oranı
r_f, R_f	Yassılık (düzlük) oranı
SE	Teorik özgül kesme enerjisi (boyutsuz)
S_p, S_R	Aşındırıcı parçacıkların küreselliği ve yuvarlaklığı
t_0	Su jetinin standof mesafesini aşması için geçen minimum süre (s)
t_{opt}	Optimum tepki süresi (s)
t_p	Aşındırıcı parçacıkların kalınlığı (mm)
V, v_A, v_o, v	Aşındırıcı su jetinin hızı (m/dk)
V_0	Nozul çıkışındaki jet hızı ve (m/s)
V_1	Eksenel yöndeki aşındırıcı nozul giriş hızı (m/dk)
V_a	Su jetine katılan aşındırıcı parçacıkların toplam hızı (m/s)
V_e, V_c	Elastik ve karakteristik (kritik) aşındırıcı parçacık hızları (m/s)
\bar{V}_j, V_w	Ortalama jet hızı ve su hızı (m/s)
\dot{V}_w	Aşındırıcı su jetinin hacimsel debisi (m^3/s)
V_{ax}, V_{ay}	Odaklama tüpüne giren aşındırıcı parçacıkların hız bileşenleri (m/s)
$v_{cr}, v_{eşik}$	Su jeti eşik (kritik) ilerleme hızı (m/s)
v_E, v_{el}	Hava ile birlikte su jeti hızı ve elastik çarpışmadaki parçacık hızı (m/s)
v_F	Jet içerisinde sürtünen su ve aşındırıcıların hızı (m/s)
\bar{v}_P	Tek bir aşındırıcı parçacığın özgül hacmi ($1/\text{m}^3$)
V_{FR}	Aşındırılan sünek malzeme miktarı (kg)

V_{giren}	Karışım odasına giren aşındırıcı parçacıkların ve havanın hızı (m/s)
V_{hava}, V_M	Jet akışına enjekte edilen havanın hızı ve malzeme aşınma hızı (m/s)
V_M	Her bir katı parçacığın aşındırdığı hacim (m^3)
V_{M1}	Düşük çarpma açılarında her bir katı parçacığın aşındırdığı hacim (m^3)
V_{M2}	Normal çarpma açılarında her bir katı parçacığın aşındırdığı hacim (m^3)
v_{opt}, \bar{v}_P	Optimum ilerleme hızı ve ortalama parçacık hızı (m/s)
v_p, v	Tek bir aşındırıcı parçacık hızı (m/s)
V_{PL}	Plastik deformasyonla aşındırılan malzeme miktarı (kg)
v_s	Yüksek hızlı süspansiyon oluşumunda parçacık hızı (m/s)
v_w	Besleme hattındaki su hızı (m/dk)
w	Ana bölgedeki jet eni (mm)
w_e, w_c	Nozul çıkışındaki parçacık eni ve efektif kesme eni (mm)
w_i	Nozul girişindeki parçacık eni (mm)
X, X_c	Eksenel yöndeki standof mesafesi (m)
X_{limit}	Standof mesafesinin sınır değeri (m)
X_{n+1}	(n+1) paso sonrasında standof mesafesinin değeri (mm)
Y, Y_c	Eksenel yöndeki koordinat değerleri (m)
Y_w	Suyun sıkışabilirlik katsayısı
z_i	Çok pasolu kesme ile elde edilen kesme derinliği (mm)
A, A'	Karışım odası alanı ve kesme alanı (m^2)
a	Parçacık–malzeme temas alanı, (m^2)
b, w	Parçacık temas eni ve ana bölgedeki jet eni (mm)
C	Bitter'in kesme aşınması denklem sabiti

E	Birim hacimde malzeme kaldırmak için yapılan iş (Nm)
h, z	Kesme derinliği (mm)
I	Atalet momenti (m^4)
\dot{I}	Sürtünme kuvvetiyle belirlenen debi tanım sayısı (N)
j	Aşınmış yüzeyin tabaka katsayısı
K, c	Kesme aşınmasına ilişkin çarpım katsayısı ve sürtünme katsayısı
P, p	Su jeti basıncı (N/m^2)
ΔP	Karışım odasındaki basınç farkı (N/m^2)
ΔV	Malzemenin aşınması için gerekli enerji (Nm)
$\Delta \dot{V}$	Kesme boyunca birim uzunluktaki hacim (m^3)
δV	Aşındırıcı parçacık tarafından süpürülen hacim (m^3)
$\delta v, \delta \dot{v}$	Aşındırılan toplam malzeme hacmi (m^3)
δv_{max}	Aşındırılan maksimum hacim (m^3)
δV_d	Deformasyon aşınmasıyla süpürülen parçacık hacmi (m^3)
$\delta V_c, \delta V_{c1,2}$	Kesme işlemi sırasında aşındırılan hacim (m^3)
δV_p	Özgül parçacık hacmine ait yüzey gerilmesi (N/m^2)
q	Kalite seviyesini tanımlayan parametre
Q_c	Kesme önyüzünde aşındırılan toplam malzeme miktarı (kg)
\dot{Q}	Jet akışı tarafından emilen havanın hacimsel debisi (m^3/dk)
R	Aşınmış yüzeylerde ortalama pürüz yüksekliği (μm)
s	Aşınma profil parametresi
t	Tepki süresi (s)
t^*, t^{**}	$x = 0$ için ve $x_t = 0$ elde edilen çarpma süresi (s)
u,	Aşındırıcı su jeti ilerleme hızı (m/s)
U	Lokal aşınma bölgesindeki parçacıkların hacimsel debisi (m^3/s)

W	Kararlı halde lokal aşınma miktarı (kg)
W_t	Bitter'in kesme aşınması teoreminde çarpma sayısı üzerindeki aşınma miktarı (kg)
W_C, W_{C1}	Kesme aşınmasıyla aşındırılan miktar (kg)
W_D	Deformasyon aşınmasıyla aşındırılan miktar (kg)
x	Aşındırıcı su jetinin sabit bir ilerleme hızında aldığı yol (m)
x, y	Aşındırıcı parçacığa ait kütle merkezi koordinatları
x_t, y_t	Aşındırıcı parçacığın uç kısmındaki kütle merkezi koordinatları
α_T	Enerji transfer katsayısı
θ, θ_0	Kütle merkezi etrafında parçacık dönüş açısı (derece)
β, β_1	Kesik açısı (derece)
φ	Boyutsuz kesme değişkeni
γ, γ_M	Malzeme aşınması için gerekli özgül enerji (m^2/s^2)
ε	Bitter'in kesme aşınmasındaki toplam özgül enerji (m^2/s^2)
ε_c	Kesme aşınmasında gerekli özgül enerji (m^2/s^2)
ε_d	Deformasyon aşınmasında gerekli özgül enerji (m^2/s^2)
ε_m	Malzeme aşındırmak için gerekli özgül enerji (m^2/s^2)
α, α_0	Nozul ekseninin açısı veya çarpma açısı (derece)
α_t	Kesme üst yüzeyindeki çarpma açısı (derece)
α_1	Parçacığın malzemeye çarpıp geri sıçrama açısı (derece)
ψ, η	Plastik deformasyon katsayısı ve hız sönümlenme katsayısı
η_c, η_m	Kesme verimi ve momentum taşıma verimi
η_T	Karışım odası veya giriş tüpündeki sürtünmelerden meydana gelen momentum değişim katsayısı

$\chi, \chi(\phi)$	Su jetinin ivmelenme katsayısı
σ, σ_f	Yüzey gerilmesi ve akış gerilmesi (N/m ²)
σ_y	Malzeme kopma gerilmesi (N/m ²)
σ_{vP}	Özgül parçacık hacmine ait yüzey gerilmesi (N/m ²)
ξ, ξ_c	Geometrik şekil katsayısı
ϕ, ϕ_i	Aşındırıcıların parçalanma katsayısı
ρ, ρ_j	Su jeti yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_a, ρ_w	Su jetine katılan aşındırıcı parçacıkların ve suyun yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_F	Jet içerisinde sürtünen su ve aşındırıcıların yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_{giren}	Karışım odasına giren aşındırıcı parçacıkların yoğunluğu(kg/m ³)
ρ_{hava}	Jet akışına enjekte edilen havanın yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_M, ρ_P	Aşındırılan malzeme ve aşındırıcı parçacık yoğunluğu (kg/m ³)
κ, κ_0	Kesme yüzeyi eğriselliği (m)
κ_A	Jetteki havanın ivmelenmesiyle oluşan enerji kayıp katsayısı
κ_E	Elastik çarpışma etkisiyle oluşan enerji kayıp katsayısı
κ_P	Parçacık çarpışmasıyla oluşan enerji kayıp katsayısı
κ_S	Yüksek hızlı süspansiyon oluşumunda enerji kayıp katsayısı
κ_T	Türbülans etkisiyle oluşan enerji kayıp katsayısı
κ_W	Su jetinin ivmelenmesiyle oluşan enerji kayıp katsayısı
κ_{PC}	Parçacık ezilmesiyle oluşan enerji kayıp katsayısı
κ_{PP}	Parçacık–parçacık etkisiyle oluşan enerji kayıp katsayısı
κ_{PW}	Parçacık–cidar etkisiyle oluşan enerji kayıp katsayısı

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ASJ	Aşındırıcı su jeti
ECG	Kalpdeki elektrik akımı (elektrokardiyografi)
EDM	Elektrical Discharge Machining
EEG	Beyin dalgalarının elektriksel yöntemle izlenmesi
MAE	Ortalama mutlak hata
MAPE (MSPE)	Ortalama mutlak yüzde hata
ME	Ortalama hata
MPE	Ortalama yüzde hata
MSE	Ortalama hatanın kareleri
Meş (#)	6,45 cm ² (1 inç ²)' lik elek alanında bulunan toplam delik sayısı
RMSE (RMSPE)	Ortalama hata kareleri kökündeki yüzde hata
R ²	Korelasyon katsayısındaki değişim
SJ	Sade su jeti
YSA	Yapay sinir ağları

<u>Birimler</u>	<u>Açıklama</u>
cm	Santimetre
dk	Dakika
et al	ve diğerleri
g	Gram
kg	Kilogram

l	Litre
Ln	Doğal logaritma
Log	Logaritma
μm	mikronmetre
m	Metre
mm	Milimetre
s	Saniye
vb	ve benzerleri
vd	ve diğerleri

1. GİRİŞ

Teknolojideki gelişme ihmal edilemeyecek kadar önemlidir. Gelişen teknolojinin her kademesinde, değişik imalat yöntemleri yerlerini alıp günümüze kadar istenilen başarıda gelmişlerdir. Çok farklı imalat yöntemlerinden birisi de son yıllarda göze çarpan sade veya aşındırıcılı su jetleridir. 70'li yılların başında su jeti çok pahalı, gürültülü çalışan, ortamı kirleten ve oldukça karmaşık bir kesme sistemi iken, günümüzde yüksek basınçlı su hüzmesi ile mukavva, köpük, kauçuk, değişik gıda maddelerinin kesilmelerinde kullanılmaya başlayan bir sistem haline gelmiştir. Yaklaşık yirmi yıl sonra, şu anda bilinen şekliyle su jeti kullanımı, aşındırıcı parçacıkların su hüzmesine katılmasıyla, daha sert malzemelerin kesilmeleri sağlanmıştır. Aşındırıcı olarak değişik türde malzemeler kullanılmıştır (kömür cürufu, deniz kumu, değişik karbürler, vb.). Su, kesme işleminde ana unsurlardan birisi olmakla birlikte, sert malzemelerde kesme yerine aşındırıcıyı taşıma görevini üstlenmiştir. Çelik türü malzemeleri işleyebilmek için kullanılan aşındırıcıyı, su ile taşımada pompadan yararlanılmış ve gerektiğinde 4000 bar'a ulaşılmıştır. Laboratuarlarda deneysel amaçlı olmak üzere, bu değerlerin üzerine de çıkıldığı bilinmektedir. Hassas imalatlarda orifis, su ve aşındırıcı karıştırma tütünün seçimi önemlidir (Pandey, et al., 1980)

Günümüzde su jetinin kullanılıyor olması insanlık için büyük bir şanstır. Çünkü ayakkabımızın topuğundan, arabamızın panzotuna hatta yediğimiz yemeğe kadar birçok noktada su jetinin katkısı olmaktadır. Kaliteli çeliklerden metal dışı malzemelere kadar işleme metodu olarak su jetinin kullanılması, son yıllarda önemini giderek arttırmıştır. Hidrolik güç ve aşındırıcı su jeti nozulundaki yeni tasarımlar, kesme işlemlerini daha da cazip hale getirmiştir. Yüksek performans, yeni çalışma alanları ve işleme metotlarını açmıştır. Bu yeni gelişmelerle, tekli yerine çoklu kesme kafası kullanımı önem kazanmıştır. Yüksek güç kullanımıyla, kesme performansı ile birlikte kesme maliyeti düşürülmüş, ayrıca çoklu kesme kafalarıyla performans daha da artırılmıştır. Su jetiyle gerçekleştirilen işlemler, basıncı artırılan suyun bir nozuldan geçirilmesiyle ulaşılan yüksek hızlarla, su jeti hüzmesinin veya aşındırıcı-su jeti karışımının, çarpma etkisiyle malzemeyi aşındırması esasına dayanır. Su jeti teknolojisi, aşındırıcılı ve aşındırıcısız

sistemler olarak bilinirler. İlk defa 1970'lerde kullanıma giren aşındırıcısız sistemler sadece su jeti sistemleri olarak da adlandırılırlar. Isıl gerilmeler ve radyasyon oluşturmada parlak ve kompozit malzemelerle birlikte, hemen her türlü malzemeyi kesip işleyebilen aşındırıcı su-jeti sistemleri, 1982'den sonra metal endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır. Aşındırıcı parçacık katkılı su jeti sistemlerinin, lazer ve plazma ark kesme sistemlerine göre, ilk yatırım maliyetleri ve içerdiği kesme özellikleri yönünden üstünlük sağlamaları, aşındırıcı su jeti sistemlerinin kullanımlarını yaygınlaştırmıştır (Machining Data Handbook, 1980).

Daha yüksek basınçlarda, su jetinin dağılmasını önleyen bazı katkı maddelerinin de kullanılmasıyla, sadece su jeti teknolojisi daha yaygın kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Bu nedenle, metal endüstrisi haricindeki diğer endüstrilerde de su jeti teknolojisine çok hızlı bir geçiş olmuştur. Su jeti sistemleri, kesilen yüzey kalitesi, kesme hızı, uçucu kesme tozu çıkarmaması; sadece su jeti sistemlerinin gıda endüstrisi dışında, sağlık gruplarında da başarıyla kullanılması, kesme kuvvetlerinin çok küçük olması, sert, yumuşak, yapışkan malzemelerin aynı nozulla kesilebilmesi, ince parçaların üst üste konularak aynı anda kesilebilmesi gibi çok sayıda üstünlüğe sahiptirler. Bunlara rağmen, su-jeti ve aşındırıcı su jeti teknolojisi, ülkemiz endüstrisinde henüz çok fazla tercih edilmemektedir. Bunun sebebi, teknolojinin yeni olması ve dolayısıyla sisteme karşı gösterilen genel çekingenlik, firma ve mühendislerin sistem üstünlükleri konusunda henüz yeterince bilgi sahibi olmaması şeklinde özetlenebilir. Ayrıca, sisteme ait ilk yatırım maliyetinin diğerlerine göre kısmen daha yüksek olması ya da özellikle uluslararası rekabetin tam olmadığı sektörlerde, yüksek işleme kalitesine henüz yeterli düzeyde gereksinim duyulmaması da tercih edilmeme nedenlerinin arasında sayılabilir. Sanayimizin, bu gerekçeler doğrultusunda içinde bulunduğu ekonomik koşulları da dikkate alarak, yeni teknolojilere uzak durması, çok fazla eleştirilmemelidir. Bu tutumu değiştirebilmek için, sistem hakkında bilgilendirme faaliyetlerine devam etmek gerekmektedir. Son zamanlarda, aşındırıcı su jeti (ASJ) ile kesme sistemlerinin geleneksel yöntemlerin yerine geçmeye başlamasıyla, bu değişimin ülke sanayimize yansımalarını kısa vadede görmeyi beklemek fazla iyimserlik olmayacaktır. Çünkü sistemin ülkemizde daha genel uygulamalarda (mermer sektörü

gibi) kullanılmadan, çok daha özgün alanlarda (havacılık ve elektronik sektörü gibi) kullanılması zor olacaktır. Bu durum, kesme/biçimlendirme işlemlerinde, sanayimiz adına atmamız gereken sayısız adımın varlığına işaret etmektedir (Öjmerts, 1994;1996).

Yapılan çalışmada; ülkemiz sanayine girmede gecikmiş olan ASJ ile kesme işleminin kullanımında çıkabilecek sorunlara çözüm yaratmak için, ASJ sistemi değişik açılardan analiz edilmiştir. Ayrıca öngörülen mevcut ve deneysel verilerle yapay sinir ağı (YSA) uygulamaları yapılmış ve YSA sisteminin, ASJ ile kesme işlemlerine başarıyla uygulanabileceği gösterilmiştir. Buna ek olarak, farklı kalınlıktaki çeşitli malzemelerin kesiminde, ilerleme hızının deneylerde kesilen malzemelerin yüzey kalitesine etkisi incelenerek teoriyle uyum içinde olduğu tespit edilmiştir. İkinci bölümde; ASJ' nin tanımı, işlem elemanları ve özellikleri, sistemin tarihçesi, kullanım alanları ile sistemin niçin tercih edildiği konuları ele alınmıştır. Üçüncü bölümde, ASJ ile işleme sisteminin teorik analizi detaylı olarak yapılmıştır. Dördüncü bölümde ise, YSA' nın tanımı, gelişimi ve kullanım alanları özetlendikten sonra, YSA modellemesinin ASJ sistemlerine başarıyla uygulanabileceği, hem deneysel sonuçlar hem de gerçek veriler kullanılarak gösterilmiştir.

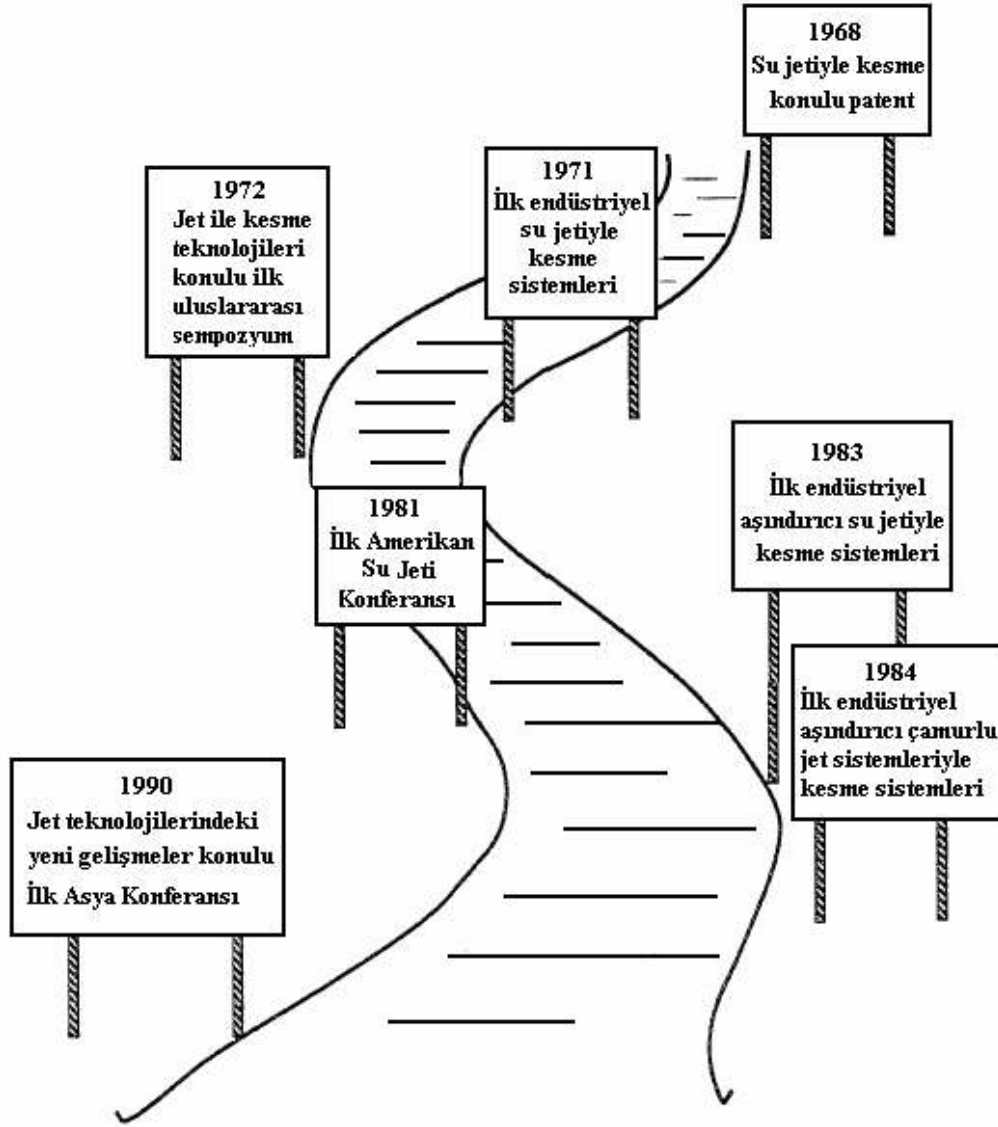
2. AŞINDIRICI SU JETİ

2.1. Sade Su Jeti ve Aşındırıcı Su Jetiyle İşlemenin Tarihçesi

Su ile kesme işlemi, Çinlilerin kullandığı ‘damlayan su kayaya işler’ deyimine kadar eski olup, modern teknolojide bu deyim, her türde malzemeye saniyeler mertebesinde işleyebilen yüksek hızlı su jeti tanımıyla yer değiştirmiştir. Bu ifade, Çizelge 2.1’ de gösterilmiştir. Modern jet teknolojisinin, su jeti ile kesmeye ait patentli ilk araştırmacı Dr. Franz (1968) ile başladığı bilinmektedir. Şekil 2.1’ de gösterildiği üzere, su jeti ile kesmenin karton kâğıt kesiminde kullanıldığı yıllarda, ilk uluslararası su jeti sempozyumu düzenlenerek, imalatçılar ve bilim adamlarının bir araya gelmeleri sağlanmıştır.

Çizelge 2.1. Aşındırıcı Su Jetinin Tarihçesi

1950 öncesi	Altın madenciliğinde çeşitli deneyler
1950 ~	Rusya, Sibiry’a’daki madenlerde çeşitli denemeler
1960 ~	700 bar’da su jeti kullanımı Exotech Inc. ,Virginia, Terraspace Inc ’de endüstriyel denemeler, O. Imanaka Tokyo ağaç kesimi, Dr. Franz, Michigan Üniversitesi
1971	Ticari anlamda ilk yüksek basınçlı su pompası
1971	Endüstriyel uygulama, kâğıt boruların kesimi
1981	Patenti alınmış aşındırıcı su jeti
1990	Patentli aşındırıcı su jeti ile işlemlerin başlangıcı
1991	Süspansiyonlu su jetlerinin kullanımı
1995	Kesme işleminde sıvı azotun kullanımı
1999	700 MPa basınçta aşındırıcı su jeti kullanımı
2000	700 MPa üstü basınçlarda aşındırıcı su jeti kullanımı



Şekil 2.1 Su Jeti Teknolojisinin Tarihsel Gelişimi (Zeng, 1992)

Akademisyenler ve sanayi kuruluşlarının büyük gayretleriyle, bugünkü anlamdaki işleme şekli kullanılarak, farklı endüstriyel dallarda aranılan su jeti ile işleme metoduna ulaşılmıştır. 1984'den itibaren aşındırıcı su jeti alternatif bir teknik olarak dallara ayrılmaya başlamıştır (Ön-karıştırmalı aşındırıcı sulu jeti gibi). Ön-karıştırmalı aşındırıcı su jetiyle kesme işleminde, aşındırıcı/su karışımı, oldukça farklı bir şekilde yapılır. Bu tip sistemlerde, aşındırıcının su jeti içine katılması yerine, önceden hazırlanmış su-aşındırıcı karışımının tek bir nozuldan püskürtülmesi söz konusudur.

2.2. Aşındırıcı Su Jetiyle Kesmenin Tanımı

Aşındırıcı su jeti (ASJ) sisteminde, parçacıkların karıştırılması için aşındırıcı su püskürtme jeti ve aşındırıcı su askı jeti olmak üzere, iki yöntemden söz edilir. İkinci tip su jeti sisteminde (aşındırıcı su askı jeti), asılı haldeki aşındırıcı parçacıklarla basınçlandırılan su, kesme sıvısı olarak kullanılır. Aşındırıcı su jetine ait işlem parametreleri genel olarak iki grupta değerlendirilebilir. Birinci grup, doğrudan aşındırıcı su jetiyle, ikincisi ise özgün işlemeyle ilişkilidir. Aşındırıcı su jetiyle ilgili parametrelere ait gruptaki başlıklar, Çizelge 2.2' de verildiği gibi özetlenebilir.

Çizelge 2.2. ASJ ile İşleme Sonuçları (Zeng and Kim, 1992)

Aşındırıcı Su Jeti Parametreleri							
İşleme Sonuçları	P	d_n	L_m	d_m	m_a	d_p	Malzeme
Kaldırılan Hacim	***	***	*	**	***	**	**
Kesme Derinliği	***	***	()	**	***	**	**
Kesme Eni	*	()	()	***	*	()	()
Yüzey Dalgallılığı	**	**	*	*	**	*	*
Yüzey Pürüzlülüğü	**	**	()	()	*	***	**
Kesme Maliyeti	*	*	*	*	**	()	()

*** \Rightarrow Çok Önemli

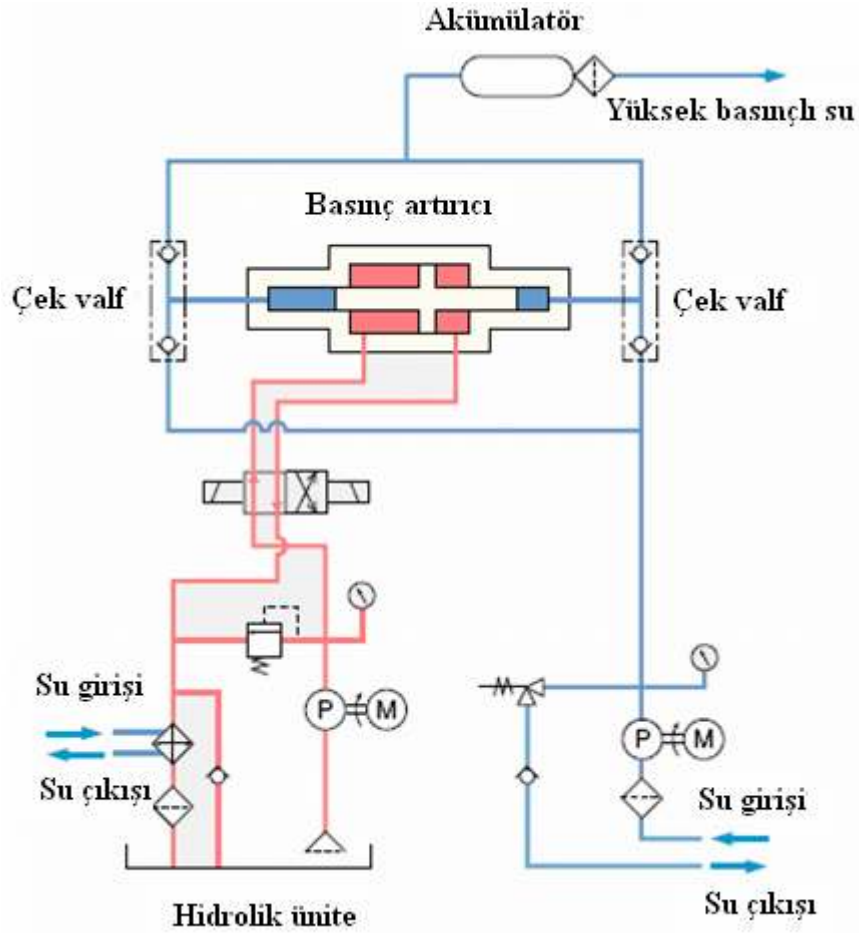
** \Rightarrow Önemli

* \Rightarrow Az Önemli

() \Rightarrow Önemsiz

Jet ile kesmede reaksiyon kuvvetleri oldukça düşüktür. Çizelge 2.2' den de görüldüğü üzere, su jeti kesme sistemleri sahip oldukları üstünlüklerden dolayı, sanayide çok geniş bir kullanım alanı bulmuştur.

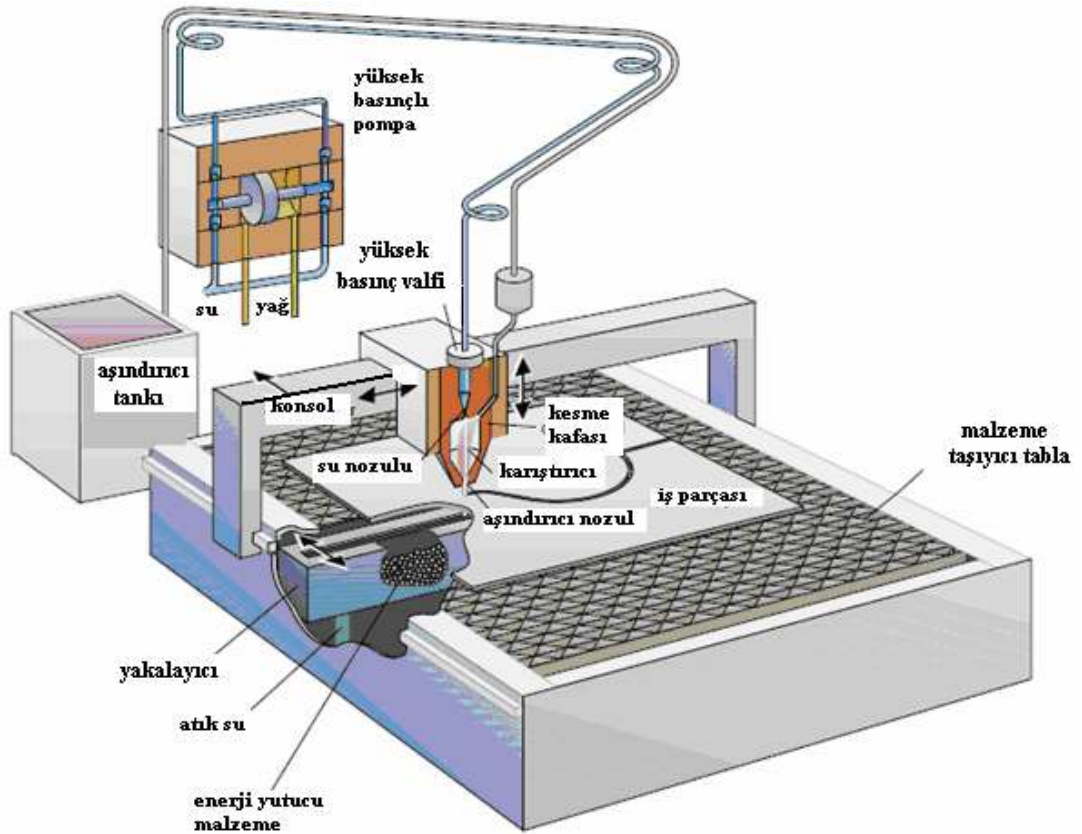
2.3. Aşındırıcı Su Jetiyle Kesme Sistemi



Şekil 2.2. Aşındırıcı Su Jetinin Hidrolik Devresi

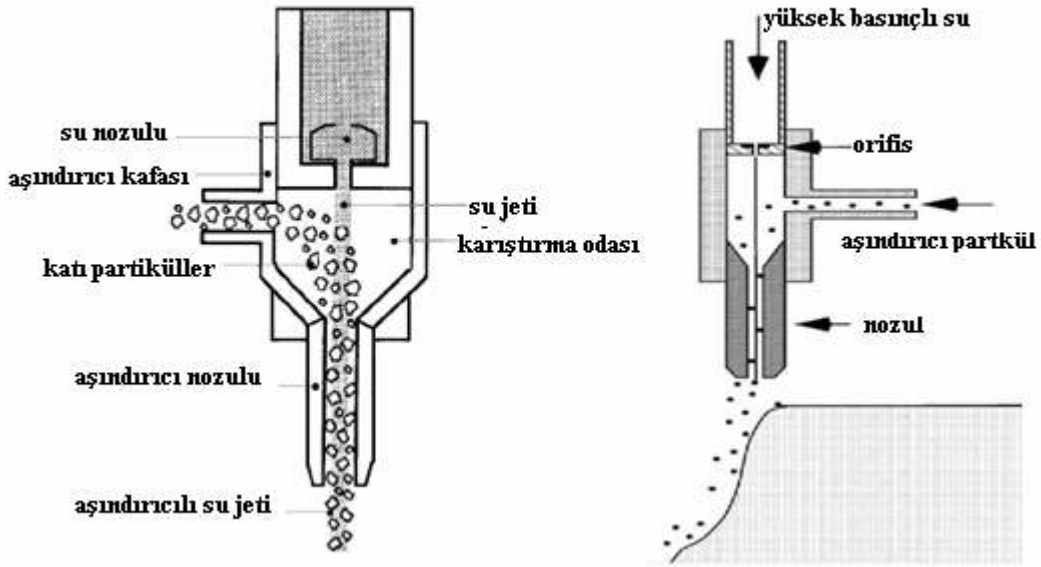
Su, yaklaşık 4000 bar'a kadar sıkıştırılıp küçük çaplı bir orifisten dış ortama atıldığında, su hüzmesi için ulaşılan hız 800 m/s mertebesindedir. Bu düzenek Şekil 2.2' de gösterilmiştir. Bu seviyede bir hıza sahip su hüzmesi, kesme ve çatlama yaparak her türde kaya, plastik, ağaç hatta çoğu metal üzerinde bile aşınma yaratabilir. Yüksek hızlı su hüzmesi içerisine aşındırıcı malzemenin ilave edilmesi, kesme gücünü de artırır (Trumpf, 2006). Su, sadece taşıyıcı olarak görev yaparken aşındırıcı parçacıklar, malzemeyi aşındırmada görev almaktadırlar. Su hüzmesi ile aşındırıcının karıştırılması ve ivmelendirilmesi farklı şekillerde gerçekleştirilebilir (Jablonowski, 1989). Genellikle bir ASJ sisteminde aşındırıcı, orifis yardımıyla hüzme içine aktarılıp daha sonra karıştırma tüpünde karıştırılır. Bir diğer yöntemde ise, önceden karıştırılmış aşındırıcı ve su

hüzmeleri, tek bir nozuldaki ivmelendirilmiş halde işlenecek malzemeye gönderilir. En çok kullanılan jet türü için ‘sade su jeti’ (SJ), diğerine ise ‘aşındırıcı içeren su jeti’ (ASJ) tanımları kullanılır. ASJ sistemi, genelde altı farklı elemandan oluşur. Bunlar sırasıyla; yüksek basınçlı pompa, nozul düzeni, aşındırıcı taşıma sistemi, yakalayıcı (toplayıcı sistem), hareket düzeni ve kontrol ünitesi olup, Şekil 2.3’ de gösterilmiştir. Basınç artırıcı içerisinde, taşıyıcı suyun basıncı artırılır. Pompanın basınçlandırdığı su ve basınç artırıcının kullandığı hidrolik sıvı mutlaka filtre edilmelidir. Nozul düzeni, su jeti orifisini ve karıştırma tüpünü birarada tutarak, yüksek basınçlı suyun başlama/durdurma kontrolünü sağlar. Aşındırıcı, orifis ve karıştırma tüpü arasına yerleştirilmiş vakum düzeneğiyle emilir. Orifis genelde safir veya elmasan, karıştırma tüpü ise tungsten karbürden imal edilir.



Şekil 2.3. Aşındırıcı Su Jeti Tezgahının Şematik Gösterimi (Liu, 2004)

Elmasın ömrü, safire göre on kat daha fazladır (Liu, 2004). Son yıllarda kompozit tungsten karbür içeren tüp kullanılmaya başlanılmıştır. Aşındırıcı taşıma sisteminde aşındırıcı deposu, ölçüm valfi ve taşıma hortumu bulunur. Debimetre ile malzeme debi kontrolü yapılabilir. Yakalayıcı sistem, atık malzeme toplamanın yanı sıra atık enerjinin yutulmasında da kullanılmakta ve hareketin durumuna göre şekillendirilmektedir. Aşındırıcı olarak çelik bilya (tercihen paslanmaz çelik) veya alümina bilyalar kullanılır. Şekil 2.4’ de gösterildiği üzere, aşındırıcı su jetiyle kesme işleminde ön karıştırmayı takiben, ivme kazanan partiküller yüksek hıza ulaşırlar. Su ve aşındırıcı içeren atıklar, atık deposuna pompalanarak katı/sıvı ayırımı yapılabilir. Hareket kontrol sisteminin seçimi, genelde kullanıma bağlıdır.



Şekil 2.4. Aşındırıcı Su Jeti Nozulunun Şematik Gösterimleri (Trumpf, 2006).

2.3.1. Su hazırlama sistemi

ASJ için gerekli donanım oldukça basittir. Asıl mekanizmaya, su jetine şekil vermek için ihtiyaç duyulur. Dağıtım ve püskürtme sistemi, aşındırıcı parçacıkları, jet akışına sürükleyecek şekildedir. Jetin yüksek hızlı olması gerektiğinden, su basıncının artırılmasında pompa kullanılır. Kullanılan temel araçlar, çalışılan çevre ve malzemeyle

uyum içinde olmalıdır. Çizelge 2.3' de gösterildiği üzere, su jeti (SJ) kafasının tıkanmaması için öncelikle, kullanılacak suyun belirlenen standartları sağlaması gerekir. Bunun için, bir su hazırlama sistemine ihtiyaç vardır. Sistemde kullanılacak olan pompanın uzun süreli çalışmalarda, sürekli yüksek basınç sağlayacak özellikte olması gerekir. Yüksek hızlı su jeti ile ilgili araştırmaların çoğu, kesme kafasına ait uygun dizayn ile aşındırıcı malzemenin iş parçasına gönderilmesi amacına yönelik yapılmıştır (Himmelreich et al., 1991). Endüstriyel kuruluşlara, yüksek basınçlı su jetiyle kesme sistemi ilk kurulduğunda, çok kapsamlı bakım ve onarıma ihtiyaç olmaksızın uzun çalışma süreleri için kullanılması planlanmıştır. Ancak, uygulamada öncelikle kullanım suyuyla ilgili olmak üzere, birçok sorunla karşılaşmıştır. Nozul ömrü üzerinde yapılan çalışmalarda (Yanaida, 1974), yumuşatılmış su için 78 saat, ters geçişle kimyasal değişikliğe uğramış su için 190 saat ve tekrar iyonlaştırılmış su için 200 saatten fazla nozul ömrü elde edilmiştir. Nozul ömrü, musluk suyu kullanıldığında yaklaşık 34 saat olarak kabul edilir. Görüldüğü gibi en iyi şekilde iyileştirilen su ile şehir şebeke suyu kullanılması halinde, nozul ömründe altı katlık bir fark elde edilmektedir. Deneysel çalışmalarda, suyun kimyasal yapısı (Davies and Jackson, 1981) ve viskozite değerlerinin değiştirilmesiyle, metil selüloz ve polimerik gibi katkı maddelerini de içeren bir süper su geliştirilmiştir (Leach and Walker, 1966).

Çizelge 2.3. ASJ ile Kesmede Kullanılacak Su için Önerilen Kalite Değerleri
(Tikhomirov et al., 1992)

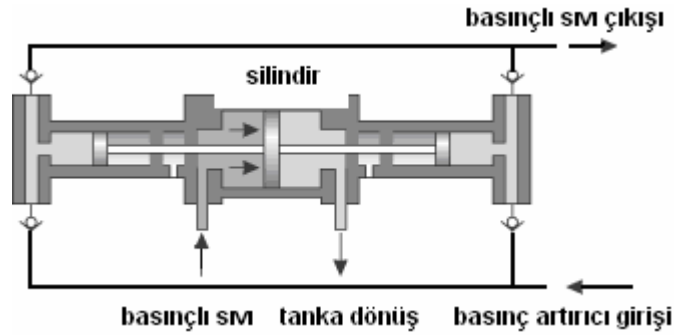
Toplam Çözünmüş Katılar	<500 mg/lt
Sertlik	<25 mg/lt
Florür	<250 mg/lt
Demir	<0, 2 mg/lt
Manganez	<0,1 mg/lt
Bulanıklık	<5NTU
Klor	<1 mg/lt
Suya ait pH	6,5 – 8,5

Çizelge 2.4. ASJ Sisteminin Kullanım Alanları ve Önerilen Basınç Değerleri (waterjetting directory, 2004)

Endüstri	Kullanım Yeri	Basınç (bar)
Aluminyum tesisleri	Değirmende sertleştirilmiş boksit tozları, filtreler, tanklar, çamur ve kirli su kanalı	690–2800
Uçak sanayi	Genleşme parçaları, gres, kauçuk, hidrolik sıvılar	700–1380
Çimento sanayi	Izgara, zemin, dış tesisat, silolar, duvarlar, iş malzemelerinde birikmiş kir, gres ve atıklar	200–700
İnşaat sanayi	Yıkım işleri ve beton kesimi	300–2800
Gıda sanayi	Gres, katı ve sıvı yağ ve fırın atıkları, mikserler, konveyörler ve benzeri donanımlar	350–2800
Döküm sanayi	Atık malzemeler, metal oksitler, seramik ve kum esaslı malzeme fırınları, çark kanatları	1000–2800
Oto bakımı	Gresden arınma, araç ve iş makinelerinde yağ, çamur, boya ve beton atıklarının temizlenmesi	350–2800
Et paketleme sanayi	Yağ, kan ve kanalizasyon ile çamur temizleme	200–700
Metal işleme sanayi	Kap ve talaş, pas ve kaynak çapağı temizleme	1400–2800
Madencilik	Damperli kamyonların, taşıma hatlarının, yeraltı galerisinin temizlenmesi; kömür, kaya tozu, çamur ve toprak tıkanmalarının açılması	700–2800
Belediye hizmetleri	Çamurlar, kanalizasyon, boru hatları ve depo temizlikleri	200–350
Eczacılık	Boru, kaplar, tüpler, ısı eşanjörleri, reaktörler, filtreler ve evaporatörlerdeki kimyasalların temizliği	700–2800
Kâğıt sanayi	Isı eşanjörünün boruları, kâğıt makineleri bölümü, gres, yağ ve her türlü kirlilik temizliği	350–2800
Demiryolları	Alçı taşı, potasyum hidrat, çimento taşıyan vagonlar ile genel anlamdaki vagonların gres, pislik ve atıklarının temizliği	350–2800

2.3.2. Basınçlı su üretim sistemi

Basınç üretim sistemi, yüksek basınçlı suyu öngörülen basınç değerinde, sabit ve sürekli olarak dağıtarak, suyun debisi ve basıncını kontrol altında tutabilmelidir. Yüksek basınçta çalışan bu tip pompalar pek güvenilir olmadıklarından, sabit basınçta sabit debiye ulaşmak için ek elemanlar kullanılır. Şekil 2.5’ de görüleceği üzere, yüksek basınçlı pompa yerine basınç artırıcı kullanılmaktadır. Basınç artırıcı, iç çapları farklı iki silindirden oluşur. Basınç artırıcıyı oluşturan silindir çaplarının farklı olması, kesit alanı ile basınç arasında istenilen oranda basıncın artırılmasını sağlamaktadır. Büyük çaplı silindirin kesit alanı daha fazla olduğundan, bu silindirdeki basınçta daha fazla olmaktadır. Sürekli bir çalışma için, iki veya daha fazla basınç artırıcı birlikte kullanılabilir. Çift tesirli basınç artırıcılar kullanarak daha kararlı basınç üretimi mümkündür. Bu nedenle, basınçlı sıvı üretmede genellikle çift tesirli basınç artırıcılar tercih edilirler. Çift tesirli bir basınç artırıcı düzeneğinde, parçalar doğrudan birleştirilip, dönüşümlü olarak çalıştırılır (Hashish, 1989b).



Şekil 2.5. Basınç Artırıcının Şematik Gösterimi (Hashish, 1989b)

2.4. Aşındırıcı Su Jetiyle Malzemelerin İşlenebilirliği

İşlenebilirlik, bazı işleme operasyonları ve şartlarında iş parçası malzemesinin kinetik tepkisinin ölçülmesidir. Kesme işlemindeki işlenebilirlik kavramında ise, ele alınması gereken kesme derinliğidir. Belli bir malzemenin işlenebilirliği, kesme derinliği ile malzeme özellikleri (sertlik, gerilme, kırılma mukavemeti, yoğunluğu, vb.)

olarak bilinen aşındırıcı jet ve kesme arasındaki ilişki ile açıklanabilir. (2.6) nolu bağıntı, kesme derinliğinin iş parçasına ait malzeme özellikleriyle olan ilişkisini açıklamaktadır. Bu bağıntıyla, belirlenen malzeme özelliklerinin bileşik etkileri de ele alınmış olur. Bu karakteristik parametre '*Aşınma direnci*' olarak adlandırılır ve,

$$R_e = \frac{1}{\frac{2 \cdot f_w \cdot \beta \cdot a \cdot \sigma_f \cdot \alpha_T^2}{3 \cdot \gamma \cdot E} + \frac{\sigma}{\sigma_f}} \quad (2.6)$$

ile tanımlanabilir. Tüm malzeme özellikleri bilinmek şartıyla, (2.6) bağıntısı kullanılarak R_e sayısını tayin etmek mümkündür. R_e biliniyorsa, (2.8) nolu denklem

$$R_e = \left(\frac{\eta \cdot C_v \cdot C_y}{1 + R} \right)^2 \frac{C \cdot \dot{m} \cdot P_w}{\rho_w \cdot D \cdot u \cdot h} \quad (2.7)$$

yardımıyla kesme derinliğini hesaplamak da mümkündür. $1/R_e$ değeri, aşındırıcı su jetiyle kesme işleminde malzemenin işlenebilirliğini gösterir.

$$h = \frac{\dot{m} \cdot \dot{m}_w^2 \cdot P_w}{2670 \cdot (\dot{m} + \dot{m}_w)^2 \cdot D \cdot u \cdot R_e} \quad (2.8)$$

➤ İşlenebilirlik sayısı ve uygulamaları

Aşındırıcı su jeti veri tabanı oluşturabilmek amacıyla, tüm malzemeler için işlenebilirlik katsayısı tayin edilmelidir. Çok yumuşak malzemedan başlayarak oldukça sert malzemeye doğru seçim yapılarak, her malzeme için işlenebilirlik katsayısı tayin edilmek istendiğinde, bulunacak işlem parametreleri (2.9) nolu ifadede yerleştirilerek, yeni N_m değerleri hesaplanabilir. İşlenebilirlik katsayıları özellikle kesik işleme için tercih edilen ASJ parametrelerinin seçiminde olmak üzere, çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Tipik aşındırıcı su jetiyle kesik işlemede iş parçası ve kalınlık kolaylıkla tayin edilebilir. Kesme için tercih edilecek ilerleme hızı,

$$u = \left(\frac{C_s q h D^{0,618}}{N_m P_w^{1,25} \dot{m}_w^{0,687} \dot{m}^{0,343}} \right)^{1,15} \quad (2.9)$$

ile elde edilir. q değeri, yüzey kalitesine bağlı olarak 1-5 arasında değişebilir. Çok kaliteli yüzey, ancak düşük hızlarda gerçekleşir. Çizelge 2.6' da gösterildiği gibi kesme kalitesine ait seviye için, maliyetin artmasını önlemek amacıyla, 5'den daha büyük bir değer seçilmez. (2.9) nolu ifadede, standof mesafesi, aşındırıcı tipi ve aşındırıcı boyutu dikkate alınmamaktadır. Genelde, standof mesafesinin artmasıyla kesme derinliği düşmektedir. Standof mesafesi için 1,5 mm' lik ampirik değer ideal kabul edilebilir. Benzer şekilde araştırmacı Hashish'e göre (Hashish, 1986a), aşındırıcı boyutundaki değişimin ulaşılacak maksimum ilerleme hızına etkisi çok az olmaktadır. Farklı tipteki aşındırıcılarla, büyük aralıkta kesme derinliği değerlerine ulaşmak mümkündür. Pratikte kesme kalınlığı, çelik malzeme için 50÷75 mm arasında değişir. Ancak birçok imalatçının bu değerlerin üzerine çıktıkları iddia edilmekle birlikte, bu güne kadar laboratuvar çalışmaları dışında bu değerlerin üstünde pek başarılı çalışmalar yapıldığı tespit edilmemiştir. Kesme kalınlığı arttıkça, işleme süresinin de artacağı unutulmamalıdır. Yumuşak malzemeler için kesme kalınlığı artırılabilir. İşlenmiş parçalar, nozulun eğilerek kırılmasına neden olabileceği için, yeni tasarımlarda koruyucu kullanılmaya başlanılmıştır. Ancak, probleme kesin çözüm hala bulunamamıştır. Nozul elemanları aşınarak nozulda tıkanmaya neden olacağı için zamanla değiştirmek gerekir. Su jetinde bazı hallerde geri kalma söz konusu olabilir. Bunun nedeni olarak, yumuşak bir takım olarak düşünülen ASJ sisteminin, işleme sırasında sağa sola hareketi gösterilir. Düzgün bir hat üzerinde, kesmedeki gerilme açıkça görülür. Kesilecek malzemede üst profil ile alt profil arasındaki fark, koniklik olarak tanımlanır. ASJ ile kesme işlemlerinde, koniklik çok önemli yer tutar. Konikliğin nedenleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

1. Malzeme ile nozul arasındaki mesafe küçüldükçe, koniklik azalır.
2. Malzeme sertliği arttıkça, koniklik azalma eğilimindedir.
3. Kullanılan nozul kalitesi arttıkça, koniklik azalma eğilimindedir.
4. Aşındırıcı kalitesinin artışıyla, koniklik ters orantılı olarak değişir.
5. Malzeme kalınlığı arttıkça, koniklik artma eğilimindedir.

Çizelge 2.5. ASJ ile Elde Edilen Kesme Kaliteleri (Zeng and Kim, 1996)

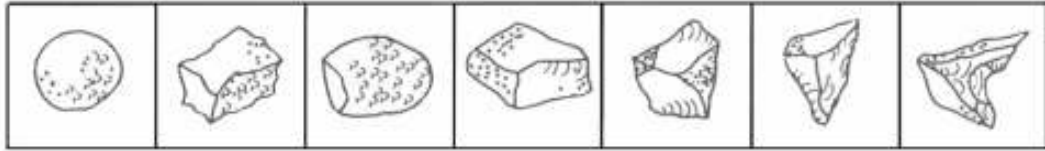
Kalite seviyeleri	Tanımlar
q = 1	Ayrılma kesme kriteri, $q > 1,2$ tavsiye edilir
q = 2	Yarı alt yüzeydeki çiziklerle kaba yüzey mümkün
q = 3	Pürüzsüz/ kaba geçiş değerinde çizik oluşumu daha az
q = 4	Birçok malzeme için çiziksiz durum
q = 5	Çok kaliteli pürüzsüz yüzey

Nozul çıkışında jetin görünümü, yangın hortumu çıkışındaki su jetinde olduğu üzere, yapışık haldedir ancak, daha sonra yelpaze gibi açılarak yoluna devam eder. Kalın malzeme kesiminde malzeme, jetin yapışık halde kalmasını sağlayacaktır. İlerleme hızı yüksek ise 'V' şekilli koniklik oluşmakta ve dolayısıyla, jetin malzemeyi tamamen aşındırması söz konusu olmamaktadır. Düşük ilerleme hızında ise jette, yelpazeye benzer bir şekillenme olacağından, ters koniklik veya fıçı şeklinde koniklik meydana gelir. Uygun ilerleme hızlarında ise, çok küçük koniklikten söz edilebilir. Kesme işlemlerinde, dakikadaki kesme değerine bağlı olarak, kullanılacak aşındırıcı miktarının genelde 0–1 kg arasında olması önerilmektedir. Sade su jeti sistemlerinde dakikada kullanım miktarı sıfır iken, kullanılan pompa ve nozul tipine bağlı olarak bu değer 0,25–1 kg arasında değişmektedir. Aşındırıcı kalitesine bağlı olarak maliyet de değişmektedir. Aşındırıcı fiyatları, kalitesine ve alınan kuruluşa bağlı olarak 0,45YTL/kg–1,25 YTL/kg (Garnet, 2007 Hindistan–Majet, İstanbul) arasında değişir. İşleme maliyetini düşürmek için, değişik türde aşındırıcı kullanımı da mümkündür. Örneğin alüminyum ile çelik malzeme kesimi için, önerilenden farklı aşındırıcı kullanılabilir. Alüminyum, yumuşak olduğu için daha ucuz olandan yararlanmak mümkündür. Yumuşak malzeme işlemlerinde, kullanılan aşındırıcılardan dolayı karıştırma odasındaki aşınma daha yavaş olur. Garnet, çok uygun bir malzeme olduğundan, en çok tercih edilen aşındırıcıdır. Akciğerlerde sorun yaratacağı için, silisyum içeren aşındırıcılardan kaçınılması önerilir. Buna benzer şekilde, maliyet düşürmek amacıyla deniz kumu da kullanılmamalıdır (Külekçi and Güray, 2000).

2.5. Kesme İşleminde Kullanılan Aşındırıcı Parçacıklar

2.5.1. Aşındırıcı parçacıkların özellikleri ve sınıflandırılması

Aşındırıcı su jeti yönteminde, çok çeşitli aşındırıcı malzemeler kullanılabilir. Bunlara ilişkin bir değerlendirme yapılırken, malzeme yapısı, aşındırıcı malzeme yapısı, malzemenin sertliği, mekaniksel davranış, tane şekli, tane büyüklüğü, tane dağılımı ve ortalama tane dağılımı dikkate alınmalıdır (Momber and Kovacevic, 1995a). Kafes parametreleri; kristalografik grup ve simetri, kimyasal oluşum, kimyasal formülasyon, çatlama, yapılan ilaveler (su-gaz, mineral katılması) gibi özellikleri içermelidir. Aşındırıcı parçacıkların kendilerinin aşınmaması için, çok sert olmaları gerekmektedir. Ayrıca aşındırıcı parçacık şekilleri de önemlidir. Şekil 2.6' da gösterildiği gibi, keskin kenarlı aşındırıcıların sahip olduğu köşelerden birisi, kesilecek malzemeye çarparak malzemenin kesilmesini kolaylaştırır.



Şekil 2. 6. Aşındırıcı Garnet Taşının Tipik Şekilleri (Louis and Meier, 1991)

Aşındırıcı su jetiyle kesmede kullanılan garnet türü aşındırıcı parçacıklar için önerilen meş değerleri aşağıda olduğu üzere özetlenebilir;

50 Meş: Kesme hızı ve yüzey kalitesi çok önemli olduğu zaman tercih edilir. Kalın paslanmaz çelik, titanyum ve kayalarda kullanılır.

65 Meş: Kesme hızının % 50' si ile kesme kalitesinin % 80' i birleşmiş haldedir. Yüzey kalitesinin önem taşıdığı kalın malzemelerde kullanılır.

80 Meş: Yüksek kesme hızı ve kesme kenar kalitesinin yüksek olduğu zaman tercih edilir.

85 Meş: Yüksek kalitede kesme yüzeyi elde edilir. Tüm metaller, kompozitler, seramikler ve kayalarda başarıyla kullanılır.

120 Meş: Yüksek kalitede kesme yüzeyi elde edilir. Çelik, alüminyum, cam, kompozitler ve diğer kırılğan malzemelerde güvenle kullanılır.

150–220 Meş: Çok hassas kesme kenarı elde edilir. Her tür kompozit, fiber optik kablolarda kullanılırlar (Külekçi, 2002).

2.5.2. Aşındırıcı seçimi

Aşındırıcı seçiminde, malzemeler arasında karşılaştırma yapabilmek için, Çizelge 2.5' den yararlanmak mümkündür. ASJ ile kesmede ısıdan etkilenen bölgenin oluşmaması (soğuk kesme), malzemelerde sertleşmenin gözlenmemesi, başlangıç deliğinin açılmasına ihtiyaç duyulmadan çok sayıda malzemenin çok yönlü kesilmesi, her türlü malzeme kesiminde kullanılması, ikinci bir işlem gerekmeden imalatın gerçekleşmesi, işleme için az sayıda aparat gereksinimi, çevre dostu olması, kesme sonunda gerilmenin söz konusu olmaması ve soğuk kesme ile ulaşılan kalite, ASJ ile kesme yönteminin tercih edilme nedenleridir (forming fabr., 2001). Diğer metotlarda olduğu üzere yanma, erime veya çatlama da söz konusu değildir.

Çizelge 2.6. ASJ ile Kesmede Malzeme Değerleri (Burnham, 1990)

Malzeme	Malzeme Kalınlığı (mm)	İlerleme Hızı (mm /dk)
Paslanmaz çelik	10	230
	40	50
	100	15
Titanyum	4	270
	10	55
	100	20
Alüminyum	10	270
	40	55
	100	20
Mermer	10	800
	40	110
	120	40

➤ **Boron karbür nozullar**

Mevcut ticari diğer malzemelerle karşılaştırıldığında, nozul aşınmasına en fazla direnç gösteren malzeme olarak bilinir. Boron karbürün oluşturulması, tungsten ve silis karbüre göre çok daha karmaşık olduğundan, maliyeti oldukça yüksektir. Birim ağırlığı silis karbüre yakın ancak, tungsten karbüre göre çok hafiftir. Aşınmaya karşı gösterdiği direnç, silis karbüre göre 2~3, tungsten karbüre göre ise 5~10 kat daha fazladır. Dolayısıyla nozul aşınmasının söz konusu olduğu durumlarda sıklıkla önerilir.

➤ **Silis karbür nozullar**

Malzemelerin en dayanıklısı olduğundan, çarpma ve esnemelerden dolayı cidarda oluşabilecek çatlaklara karşı, en fazla direnç gösteren nozul türleridir. Maliyet değişmeksizin kullanma ömrü değerlendirildiğinde, silis karbüre göre 2/3~1/2 oranı kadar daha düşüktür.

➤ **Tungsten karbür nozullar**

Metalik aşındırıcılar, cüruf ve kum, tungsten karbüre göre iki kat daha dirençlidir. Bunun en önemli sebebi, tungsten karbürden daha sert ve kırılğan olmasıdır. Boron karbürde olduğu üzere, çarpma ve esnemelere karşı dayanıksızdır. Aksi takdirde cidarda sorun çıkabilir. Boron karbüre göre çok daha uzun ömürlüdür (omax, 2005)

2.5.3. Aşındırıcı parçacık sertliği ve aşındırılan malzeme yüzeyinin kontrolü

ASJ ile işlemede en önemli fiziksel özelliklerden birisi, parçacık sertliğidir. Sertlik değeri genellikle iki farklı tip test ile tespit edilebilir. Birincisi aşındırma testidir. Bu testte parçacık, kendinden daha yumuşak olanı aşındırırken, daha sert olanı aşındıramaz. On değişik elementi temel alan bu deney, Mohs sertlik deneyi olarak bilinir. Diğeri ise Knoop sertlik testidir (Buhlmann, 1970). Parçacık şekli iki farklı değişken ile ifade edilmektedir (Ruppel and Brauer., 1986). İlk değişken bağıl uzama

oranı (r_E), diğeri ise yassılık (düzlük) oranıdır. Bağıl uzama oranı (2.10)' da, yassılık oranı ise (2.11)' de verilmiştir.

$$r_E = \frac{l_P}{b_P} \quad (2.10)$$

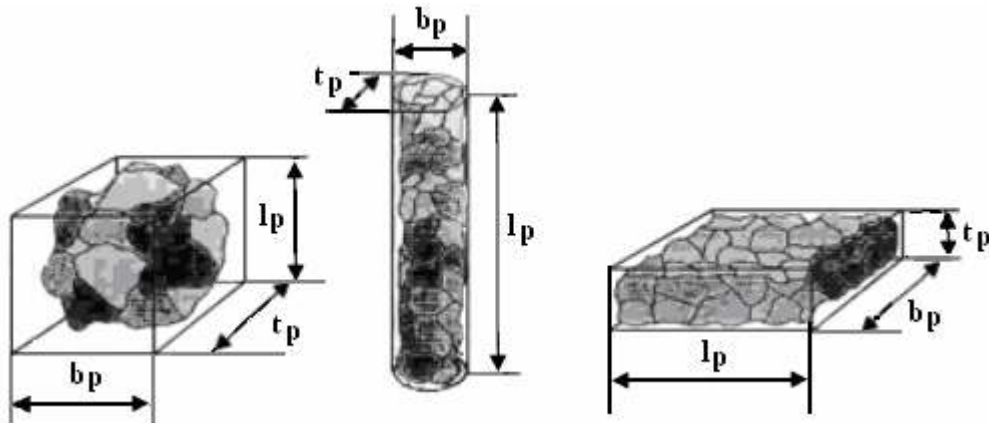
$$r_F = \frac{l_P}{t_P} \quad (2.11)$$

Aşındırıcı parçacıkların sahip olduğu küresellik değeri, (2.12) nolu bağıntı ile tayin

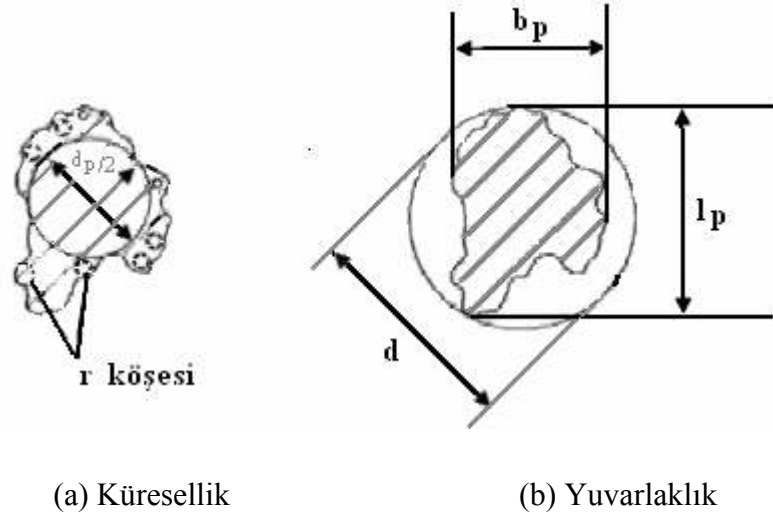
$$S_P = \frac{\sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot b_P \cdot l_P}}{d_{\text{daire}}} \quad (2.12)$$

edilebilir (Yashima et al., 1987). Küresellik; açısız parçacıklar için "0", ideal yuvarlaklığa sahip parçacıklar için ise "1"den başlamaktadır.

$$S_R = \frac{\sum \left(\frac{2 \cdot r_{\text{daire}}}{d_P} \right)}{N_R} \quad (2.13)$$



Şekil 2.7. Aşındırıcı Parçacıkların Uzama ve Yassılık Oranları (Yashima et al., 1987)



Şekil 2.8. Aşındırıcı Parçacıkların Geometrik Şekil Özellikleri (Cox, 1927)

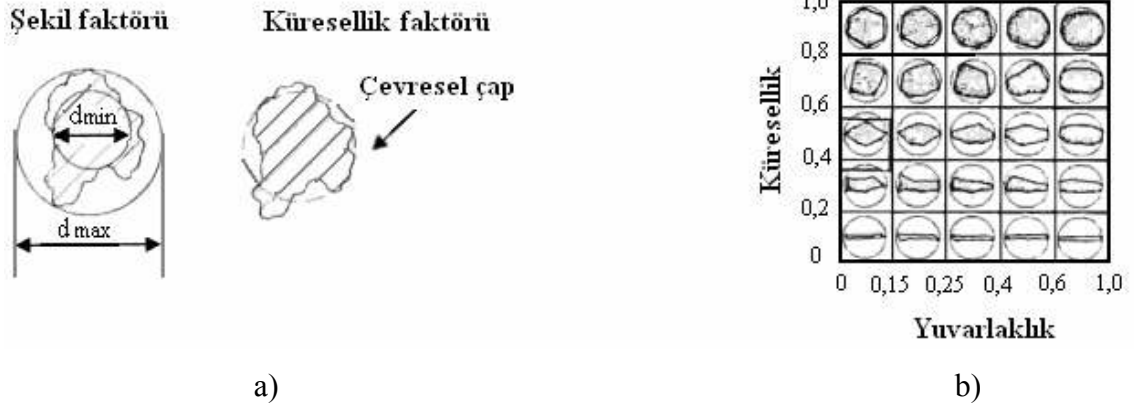
Tekrar kullanma ünitelerinde, kesme veriminde herhangi bir verim düşüklüğü olmaksızın, aşındırıcıların % 50'si tekrar kullanılabilir (Berkeley, 2001). Araştırmacı Vasek ve arkadaşları (Louis and Meier, 1991) ile araştırmacı Martinec (Ohlsen, 1997) tarafından öne sürülen (2.14) nolu denklemle ifade edilen dairesellik çarpanı, araştırmacı Cox tarafından geliştirilerek, aşındırıcı parçacık tipini belirlemek için kullanılmıştır (Cox, 1927).

$$F_0 = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_p}{P^2} ; \quad P = P_x + P_y + \sqrt{2} \cdot P_{xy} \quad (2.14)$$

Şekil çarpanı ise,

$$F_{\text{şekil}} = \frac{d_{\min}}{d_{\max}} \quad (2.15)$$

dir. Dairesellik ve şekil çarpanları Şekil 2.9' da gösterilmiştir. Daireler için, $F_0 = 1$ ve $F_{\text{şekil}} = 1$ olur. Farklı aşındırıcı tipleri için, tek taneli şekil faktörü oranı, aşındırıcı geometrilerinin tanımında çok önem taşımaktadır.



Şekil 2.9. Aşındırıcı Parçacıkların Yuvarlaklık ve Küresellik Faktörü a) Aşındırıcı parçacıklar için küresellik ve şekil faktörü ve b) Aşındırıcı parçacıklar için yuvarlaklık–küresellik diyagramı (Cox, 1927)

Aşındırıcıya ait bir numunede parçacığın dağılım şekli biliniyorsa, bu numunedeki parçacık sayısını tahmin etmek mümkün olabilir. Yüksek hızlı su jetinin debisi belli ise, parçacığın kinetik enerjisi; karıştırma işlemi sırasında aşındırıcı parçacıklar ile akışkan arasında bir enerji transfer katsayısı belirlenerek, tahmin edilebilir. Böylece aşındırıcı parçacıkların sahip olduğu ortalama kinetik enerji,

$$E_p = \alpha_T \cdot \frac{E_w}{N_p} \quad (2.16)$$

şeklinde tanımlanabilir. Bağlantıda α_T ile gösterilen enerji transfer katsayısı ise,

$$\alpha_T = E_p \cdot N_p / E_w \quad (2.17)$$

dir. Aşındırıcı kütleli debisi artarken, ortalama parçacık çapı ve her bir aşındırıcı parçacığa ait kinetik enerji değeri düşer (Louis and Meier, 1991). Parçacık çapı küçüldükçe kütlesi de azaldığı için, parçacık kinetik enerjisi azalır. Ancak parçacığın kütleli debisi arttığı halde, kinetik enerjisi azalıyor ise, bu durumun irdelenmesi gerekir. Aşındırıcı parçacığın kütleli debisi artıyor ise, basınçlı su yardımıyla ivmelendirilmiş parçacık sayısı da artar.

2.5.4. Aşındırıcı parçacıkların su jetine katılma teorisi

Su jeti içerisinde kullanılan aşındırıcı parçacıklar, genellikle jet oluştuktan sonra eklenir. Bazen aşındırıcılar, jet oluşmadan önce de eklenebilir. Fakat bu genelde tercih edilen bir yöntem değildir. ASJ, çekirdek bölgesi hariç başka hiçbir bölgede üniform değildir. Normalde aşındırıcı, kenardan yani akışkan hızının en düşük olduğu yerden ilave edilir. Aşındırıcı parçacık yoğunluğu akışkandan daha fazla olduğu için, akışkan aşındırıcıyı hızlandırdıktan sonra yavaşlar. Karışım odasının iki girişinden birincisi, en üst noktada bulunan, su jeti girişindeki nozul bölgesi diğeri ise, aşındırıcı parçacıkların jet akışına katıldıkları bölgedir. Karışım odasının alt kısmında bulunan odaklama tüpünün görevi, aşındırıcı parçacıklarla yüklü yüksek hızlı su jetini, odaklama tüpünün hemen altındaki iş parçasına yönlendirmektir. Karışım odasına ait en iyi dizaynı tespit etmek amacıyla, örneğin l_1 ve l_2 değişkenlerinin tayini için, çok sayıda araştırma yapılmıştır (Mazurkiewicz et al., 1988; Osman et al., 1996; Galecki and Mazurkiewicz , 1987). Bunlara ek olarak, jetteki nozul ve odaklama tüpü ile ilişkili de çalışmalar mevcuttur. Ayrıca nozul, odaklama tüpü ve bunlara ait açıların da aynı eksen üzerinde olması büyük önem taşımaktadır. Çünkü oluşacak herhangi bir eksen kaçıklığı, işleme kalitesini büyük ölçüde etkileyecektir (Hashish, 1989a). Su jeti karışım odasından geçerken, aşındırıcı parçacıklar jetin yavaşlamasına ve böylece jet basıncının değişmesine sebep olurlar. Parçacıkların bir hava akışıyla taşındığı karışım odası (karışım), başlangıçta hareketsizdir. Atmosfer basıncına ulaşıldığında bu aşındırıcılar ve hava, jet içerisine katılmaktadır. Su jetine katılan parçacıklar ile havanın sahip olduğu hız birbirinden farklıdır. Bernoulli denklemi, karışım odasındaki hız ve basınç arasındaki ilişkiyi,

$$P_{\text{karışım}} = \frac{-\rho_{\text{giren}} \cdot V_{\text{giren}}^2}{2} \quad (2.18)$$

(2.18)' de gösterildiği şekilde açıklar. Karışım odasındaki basınç, negatif olabilir. Karışım odasının dışındaki hava ve parçacıkların atmosfer basıncında olduğu kabul edilerek elde edilen bağıntı (2.19)' da verildiği gibidir.

$$\Delta P = \frac{-\rho_{\text{giren}} \cdot V_{\text{giren}}^2}{2} \quad (2.19)$$

Her iki bağıntı da hava ve aşındırıcı parçacıkların, jet akışına enjekte edilmelerinin aksine, jet akışı tarafından emildiklerini göstermektedir. Jet akışı tarafından emilen havanın hacimsel miktarı ise, (2.20) nolu denklem ile tanımlanmıştır.

$$\dot{Q} = (1 - \xi) \cdot V_{\text{hava}} \cdot A \quad (2.20)$$

(2.19) nolu bağıntıdaki hava hızına ait ifade kullanılarak, hacimsel hava debisi,

$$\dot{Q} = A \cdot (1 - \xi) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_{\text{hava}}}} \quad (2.21)$$

(2.21) ile hesaplanır. Su jetine katılan parçacıkların kütleli debisi de benzer şekilde, (2.22)'de ifade edilebilir.

$$\dot{M}_a = \rho_a \cdot \xi \cdot A \cdot V_a \quad (2.22)$$

(2.19) nolu bağıntı, V_a 'ya göre çözülecek olursa kütleli debi ifadesi (2.23),

$$\dot{M}_a = A \cdot \xi \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_a \cdot \Delta P} \quad (2.23)$$

şekline dönüşür. Bağıntıdan da görüleceği üzere, geometrik şekil katsayısı nedeniyle aşındırıcı kütleli debisi artarken, hacimsel hava debisi azalır. Karışım odasına, aşındırıcı parçacık ve hava girişinden sonra jet içerisinde sıvı, gaz ve katı olmak üzere üç faz bulunur. Aşındırıcı parçacıklar ile su arasında esnek olmayan bir çarpışma oluşabilir. Eğer su jetine giren hava ve aşındırıcı parçacıkların hızı, jet hızından daha düşük ise, aşındırıcı parçacıkların sahip olduğu hıza ait bağıntı,

$$V_a = \eta_T \cdot \left(\frac{V_0}{1 + \frac{m_a}{m_w}} \right) \quad (2.24)$$

(2.24) şeklinde yazılabilir. Bağlıdaki η_T katsayısı, karışım odasında veya giriş tüpündeki sürtünmelerden dolayı meydana gelen momentum kaybı için kullanılmıştır. Aşındırıcı parçacık içeren jetin çarpma kuvveti ile aşındırıcı parçacık içermeyen jetin çarpma kuvveti deneysel olarak karşılaştırılarak bulunmuştur. (Momber and Kovacevic,1995b; Louis and Meier, 1991).

2.6. Aşındırıcı Su Jetiyle Kesmenin Diğer Sistemlerle Karşılaştırılması

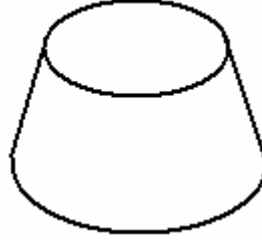
Sade su jetiyle kesmede sırasıyla giriş, ana ve uç olmak üzere üç bölgeden söz edilir. a) Giriş bölümü; nozul çıkışına yakındır. Burada, nozul çıkışında jet hızına eşit olan kama biçiminde potansiyel çekirdek bölgesi oluşur. Giriş bölgesinin sonunda, su jetinde damlacık oluşmaya yetecek miktarda hava içermek şartıyla, jet akışı süreklilik kazanır. b) Ana bölgede, hava ile su jetinin tamamen karışma işlemi takiben, sürekli damlacıkların oluşumu devam eder. Bu durum, kesitte kademeli düşme ve dolayısıyla su jeti hızında azalmaya neden olur. Su jetinin ana bölgesi; damlacık bölgesi ve çevreleyen ortam olmak üzere, iki ayrı kısımda ele alınır. Bunlar sırasıyla, su damlacığı bölgesi ve su sis bölgesidir. c) Uç bölge ise difüzyon bölgesi olup, burada tamamen damlacıklara dönüşüm gerçekleşmektedir. Su jetiyle kesmede önemli parametreler, sırasıyla standof mesafesi, su basıncı, jetin ilerleme hızı ve nozul çapıdır. En uygun standof mesafesi, maksimum malzeme aşındırma değerinde oluşur (Hashish, et al.,1979). Standof mesafesindeki düşüş, mesafenin belli değerleri dışında malzeme aşındırılmasını azaltıp kesme hassasiyetini ve kalitesini etkileyebilir. Iraksak su jetiyle kesme işleminde hassasiyet ve kesme verimi düşmektedir. İşlenmiş derinlik (kesme derinliği), metal ve metal dışı malzemelerde su basıncıyla artar (Leu, 1998).

ASJ ile talaş kaldırma yöntemi, suyun aşındırıcıyı hızlandırıp, iş parçası üzerine taşınması esasına dayanır. Bilinen diğer talaş kaldırma işlemlerinde, malzemeyi kesmek için ek aparatlardan yararlanılır. Geleneksel talaş kaldırma işlemlerinde, malzemeyi kesmek için aparatlar ve kesme takımıyla birlikte sıvı da kullanılır. Sıvının görevi, parçayı taşımak değil, talaşı ve ısıyı ortamdan uzaklaştırmaktır. Yüksek basınç ve su

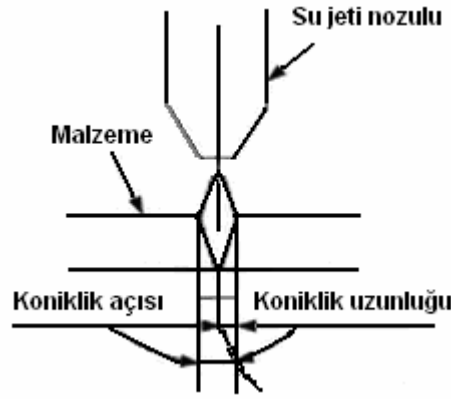
jeti hızının sahip olduğu kinetik enerji, yıkma veya hassas kesme işlemlerinde de kullanılabilir (Yıkma işlemleri; madencilik, tünel delme, beton yapıların yıkılması, kanal kazımı, kablo döşenmesi vb.). Hassas işleme olarak; zaman, delik açma, temizlik, kabuk temizleme, şekilli kesme, özetle her türlü kesme işlemi (yumuşak veya sert malzemeler, metaller) sayılabilir. Bunların başlıca yararları temiz, çapaksız, tozsuz ortam, ısı yayılımının yok denecek kadar az olması, kesicinin aşınması söz konusu olmadan, patlayıcı ortamda sorunsuz işleme, çok düşük bakım ve onarım giderleri, hava kirliliği sorununun ve malzemede ısıl genleşme probleminin olmaması şeklindedir.

1980'nin ilk yarısında, ASJ' nin pratik uygulamasının olmadığı düşünülüyordu. Ancak günümüzde ASJ kullanımı, hassas imalat ve kesin sonuçlarıyla çok tercih edilen bir metot haline dönüşmüştür. Plazma ve lazer ile kesmede sert kabuk bırakılmakta ve 13 mm ve/veya daha üstü malzemelerde hassas kesme çok zor iken, ASJ ile malzeme kesme işlemi sorunsuz gerçekleşmektedir (Nanduri et al., 1996). Kompozitler, titanyum ve inconel alaşımlar gibi malzemelerin kesilmesinde, modern ASJ sistemleri çok daha başarılıdır. Hatta ASJ' de $\pm 0,05$ mm gibi dar toleranslara ulaşmak bile mümkündür (Hashish, 1988; Hashish, 1991a). Gelişmiş ASJ sistemleri, yumuşak çelik ve alüminyum gibi malzemelerin kesilmesinde de geniş çapta kullanılmaktadırlar.

Lazere göre daha hafif olan bu sistemlerde, kesme kafasının ivmelenme veya yavaşlatılması işlemi de çok daha kolay olup, daha az enerji gerektirir (Hashish, 1993). Birçok işlemin yerini alan ASJ ile kesme, geleneksel olmayan uygulamalarda çok başarılı olmakla birlikte, bazı sınırlamalar mevcuttur (Guo et al., 1993). Her tip ASJ sistemi, iş parçası üzerinden geçerken su jetindeki sapmadan, belirli seviyede etkilenir. Düzgün kesmelerde, akış hüzmesi parçayı hızlıca geçer. Çünkü hüzmedeki sapma, hassasiyeti etkilememektedir (Murai and Nishi, 1989). Ancak köşelerde kesme hataları oluşabilir. Çeşitli köşe ve eğrisel yüzeylere sahip karmaşık şekillerin kesilmesinde, ilerleme hızı çok dikkatli düzenlenmelidir. Karşılaşılan bir başka sorun da, Şekil 2.10a' da gösterilen koniklik etkisidir. Aşındırıcı jet, yay veya köşe etrafında hüzme, koni şekli yaratır (Fairhurst, 1992). Jet ilerleme hızı maksimum değere yaklaştıkça, koni büyür. Oluşan konikliğin etkisiyle birlikte, Şekil 2.10b'de gösterilen 'V' şekilli sivrileşmenin de giderilmesi gerekir.



a) Yay ve köşelerde hızın gecikmesiyle oluşan koniklik



b) Yüksek hızlı kesmede oluşan 'V' şekilli konik yapı

Şekil 2.10. Aşındırıcı Su Jetiyle İşlemede Oluşan Konikliklerin Şematik Gösterimi
(Külekcı and Güray, 2000)

Sivrileşme, kesme gücü artırılarak veya kesme yörüngesi azaltılarak düşürülebilir, hatta tamamen ortadan kaldırılabilir (Hashish, 1991c). ASJ ile işleme bilindiği üzere, diğer işleme metotlarından daha düşük işletme maliyetine sahiptir. Her türlü malzeme kesimi (sertleştirilmiş çelik, tavllanmış çelik, titanyum, 304 paslanmaz çelik, sertleştirilmiş veya sertleşmemiş birçok çelik türü, bakır, pirinç, alüminyum, cam, seramik, kuvarz, taş, yanabilir malzemeler, ince veya kalın malzemeler gibi), hızlı ayar, takım değişikliği gerekmeden, tek takımla işleme mümkündür. Ayrıca, mekanik gerilmeler de oluşmadığı için, pürüzsüz yüzey elde etmede ikinci bir işlem gerektirmez.

➤ **Lazerle kesme**

- Lazere göre, birçok malzemenin kesimi mümkündür (parlak malzemeler, alüminyum ve bakır gibi).
- Malzeme yüzeyindeki pürüzlülük, su jetinde sorun yaratmaz.
- Su jeti parçayı ısıtmadığı için, malzemede ısıl çarpılma veya sertleşme söz konusu değildir.
- Kalınlık arttıkça, lazere göre aynı veya daha yüksek toleranslara çıkılabilir.
- İlk yatırım maliyeti, aşındırıcı su jetinde daha düşüktür.
- ASJ ile daha kalın malzeme kesilebilir.
- ASJ ile kesme daha emniyetlidir; yanma, zehirli gaz söz konusu değildir.
- Çevreyle uyumludur.
- ASJ sistemindeki nozulun bakımı daha kolaydır.
- Düzgün yüzey olmaması halinde, aşındırıcı su jetinde jet odak ayarı gerekmez.

➤ **EDM ile kesme**

- ASJ daha hızlı işlem yapabilir.
- ASJ ile çok daha çeşitli malzeme kesilebilir.
- ASJ ile malzeme yapısı çok sorun yaratmaz.
- ASJ ile işleme başlangıç deliğini kendisi açar.
- ASJ sistemleriyle işlenen yüzeylerde, ısıl problem yoktur.
- ASJ sistemine benzer çamur jetleriyle daha büyük hacimli parça işlenebilir.
- ASJ daha az ayar gerektirir.

➤ **Plazma ile kesme**

- ASJ sisteminde işleme hızı plazmaya göre çok daha düşük olduğundan, daha iyi yüzey elde edilebilir.
- ASJ ile parçada ısınma olmadığı için çok daha hassas kesme yapılabilir.
- ASJ ile her türlü malzeme kesiminin mümkündür.

➤ **Alevle kesme**

- ASJ ile çok daha iyi bir yüzey elde edilebilir.
- ASJ ile kesmede parçanın ısınmasının söz konusu değildir.
- ASJ ile her türlü malzeme kesimin mümkündür.
- Alevle kesmede daha hızlı işlem yapılabilir.
- Alevle kesme daha ucuz, fakat düşük kalitededir.

➤ **Konvansiyonel tornalama**

- ASJ ile kesmede ayarlama ve kalıp düzenleme çok daha hızlı yapılabilir.
- Tornalamada çok daha yüksek hızlara çıkılabilir.
- Birçok ASJ sisteminde programlama çok daha kolay ve hızlı olmaktadır.
- Takım değiştirme sorununu yoktur (forming, 2001).

2.7. Aşındırıcı Su Jetinin Kullanım Alanları

➤ **Gıda sanayi**

SJ kesme sistemiyle taze, kuru, paketlenmiş ya da dondurulmuş olarak hemen her türlü gıda işlenebilir (Becker and Gray, 1992). Kesim sırasında, kesici metale yapışmayan ürün üzerinde oluşan basıncın çok küçük olması ve dolayısıyla üründe şekil değişikliği gözlenmemektedir. Bıçak temizleme, bıçak eğeleme ve bıçak değiştirme sorunu yoktur. Sistem yardımıyla, esnek imalat ve otomatik imalat kolaylıkla uygulandığı için ürüne, kesici takımlarla verilemeyen şekiller kolaylıkla verilir.

➤ **Kâğıt ve mukavva sanayi**

Buruşma, kenarlarda yırtılma ve imalatta katların açılmasını önleyen SJ sistemleri, kâğıt ve mukavva sanayinde tercih edilirler. En büyük özellik, mekanik sistemlerin kesim sırasında malzemede yaratacağı hasarı yok edebilmesidir. Diğer metotlarda katlanma

ve yırtılma miktarı ~0,5 mm olurken, SJ' de yırtılma ~0,1 mm' ye iner. Ayrıca, SJ ile kesme sırasında nem artışı ve toz oluşması söz konusu değildir (waterjetting, 2004).

➤ **Tekstil ve giyim sanayi**

Kumaş, esnek ve yumuşak bir malzeme olduğu için beslenmesi ve kesilmesi geleneksel yöntemlerle oldukça zordur. Çünkü kumaşla temas halindeki kesici kalem, kesimi güçleştirebilir. Geleneksel kesicilerle daha doğrusal kesimler yapılırken, SJ kesme sistemiyle daha karmaşık ve çok katlı kumaşlar bile hassas olarak kesilip, işlenebilir (waterjetting, 2004).

➤ **Plastik sanayi**

SJ kesme sistemleriyle gözenekli, taneli ve yumuşak malzemeleri üç boyutta işlemek mümkündür. Özellikle kapı ve pencere imalatında kullanılan PVC türü malzemeler, cam takviyeli plastik, kauçuk, pleksiglas, neopren, sünger ve makralon gibi plastik ve türevleri olan malzemelerin yüksek hızlarda kesilmelerine olanak sağlarlar (waterjetting, 2004).

➤ **Temizlik sanayi**

SJ sistemleri; büyük eşanjörlerin kireçlenmiş iç yüzeylerinin temizlenmesi, zamanla paslanan ya da kararan anıt ya da büstlerin temizlenip parlatılması, taş kırma tesislerinde, kömürün kömür tozlarından ayrılması gibi birçok endüstriyel temizleme işlemlerinde başarıyla kullanılırlar. Temizlik işlerinde kullanılan SJ sisteminde, nozul çapının büyütülmesi ve sistem debisinin artırılması gerekir (waterjetting, 2004).

➤ **Ayakkabı ve deri sanayi**

SJ ile kesme sistemleri ayakkabı ve dericilik sektöründe kullanıldığında, malzemenin % 15 oranında tasarruf edilmiştir (waterjetting techn., 2004). Ayakkabı kalıbı

hazırlama masrafları, bu işlem için gerekli zaman ve kalıp hazırlarken meydana gelecek malzeme kullanımı bu yöntem yardımıyla en aza indirilmiştir.

➤ **İzolasyon sanayi**

SJ sistemi özellikle, tavan ve taban döşemelerinde kullanılan cam yünü malzemelerinin kesilmesinde kullanılır. İzolasyon malzemesi imalatında SJ sistemi kullanıldığında, geleneksel kesme yöntemlerine oranla, malzemedan % 12'lik bir kazanç elde edilmiştir.

➤ **Metal işleme sanayi**

Yüksek sıcaklık, malzemelerin mekanik özelliklerini değiştiren önemli bir etkidir. Bundan dolayı ısı artışı, tüm malzeme işleme yöntemlerinde ayrılmaz bir parça kabul edilir. Bu artış, malzemenin soğuması sırasında iç gerilmelere neden olacağından, tasarımları olumsuz yönde etkiler. SJ sistemleri, bu tür bir ısı artışına neden olmadığı için metal işleme sektöründe özellikle tercih edilmektedir (waterjets, org., 2005).

➤ **Elektrik-elektronik sanayi**

SJ sistemleri elektronik sektörde, elektronik kart ve bilgisayar üreticileri tarafından kullanılır. Tüm elektronik kart malzemeleri üzerinde denenilen SJ sisteminin, üretim hızını önemli ölçüde artırdığı, kesme yüzey kalitesini iyileştirdiği ve toz oluşumunu ortadan kaldırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, kesme işlemi için malzemelerde bir başlangıç deliği açmaya da gerek yoktur (waterjetting techn., 2004).

➤ **Cam–mermer–granit–seramik sanayi**

Cam, mermer, granit ve seramik türü malzemelerin en büyük özelliği kırılğan olmalarıdır. Geleneksel yöntemlerle yapılan işlemlerde malzemeler çok kolay deforme olduklarından, hurda yüzdesi yüksek olmaktadır. Bu nedenle, bu sektör su jeti ile kesme sistemlerinin yaygın kullanım alanlarından birini oluşturur. SJ kesme sisteminin,

işlem sırasında malzeme üzerine gelen kesme kuvvetlerini azaltarak, malzeme deformasyonunu ve malzeme kaybını önlediği bilinmektedir (waterjets, org., 2005).

➤ **Otomotiv sanayi**

SJ ile kesme sistemleri otomotiv sektöründe oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Sistem halı, araba ön paneli, gösterge panosu, fiberglas ve yaylar, yakıt tankı korumaları, koltuk arkalıkları ve asbest fren balataları gibi metal, kompozit ve metal dışı malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadır (waterjets, org., 2005).

➤ **Uzay ve havacılık sanayi**

Aramid destekli kompozit ve titanyumdan imal edilmiş parçaları, yoğun şekilde kullanan uzay ve havacılık sanayinde, su jeti kullanımı ile üretkenliklerinin % 80 oranında arttığı ve üretim süresinin % 15–% 20 oranında düştüğü iddia edilmektedir (Ramulu and Arola,1993).

2.8. Literatür Çalışmaları

Her geçen gün sayılarının hızla arttığı bilinen 50×10^3 'den fazla yapısal malzeme mevcuttur. Birçok malzeme, insan yapımı olup malzeme bilimiyle uğraşanlar tarafından belirli özellikleri sağlamak üzere tasarlanır. Malzemeler genellikle birden fazla bileşen içerdiğinden, işlenmeleri ve ayrılmaları çoğu kez bilinen metotlarla oldukça zordur. Bundan dolayı, imalatçıların bu tür malzemelerin özelliklerini bozmadan işleyebilmeleri, bilinenlerin dışında bazı metotların kullanımlarını zorunlu hale gelmiştir. Aşındırıcı su jetiyle kesmedeki esneklik ve ısı sorunun olmaması, diğer kesme metotlarında karşılaşılan sorunlar nedeniyle, kompozit ve sandviç malzemelerin işlenmelerini kolaylaştırmaktadır. Metaller, bilinen takımlar kullanılarak kesilecek olursa, ses ve toz gibi çevresel atıklar veya çapak oluşmakta, ayrıca kesme yüzeyinde olduğu üzere kesme performansına ilişkin problemler çıkabilmektedir. Su jetiyle kesmede iş parçasına uygulanacak küçük kuvvetler, özellikle kırılğan malzemelerde,

kırılma veya yapısal bozulmaya sebep olmazlar. Böylece, aşındırıcı su jetiyle kesmenin devreye alınışı, büyük bir boşluğu doldurmuştur. Diğer işleme metotlarıyla birlikte kullanılması mümkün olan su jetiyle kesme işleminde, çalıştırma maliyetinin düşük olması, aranılan üstünlüklerinin başında gelmektedir. Birçok endüstriyel kuruluşta, aşındırıcı su jetiyle kesme sisteminden mevcut haliyle teknik, ekonomik ve çevresel sorunların çözümünde geniş çapta yararlanılmaktadır. İnce levhaların aşındırıcı su jetiyle kesilme maliyeti, diğer ısıl kesme yöntemlerine göre, çok daha yüksek olmasına rağmen, uygulamada sunduğu diğer teknik üstünlüklerinden dolayı tercih edilmektedir. Tercih edilme sebeplerinin en başında özellikle, çok sert metallerin sorunsuz kesilmesi, düşük ses şiddetinde çalışma ve artırılmış emniyet gelmektedir. Kesme ve su jetinin parçalanması, temas yüzeyindeki dinamik basınç profili ve jetin yapısına bağlıdır. Bu parçalanma olayı aynı zamanda nozul tasarımının ve standof mesafesinin de bir fonksiyonudur (Trumpf, 2006).

Aşındırıcı su jetiyle kesmede, çizik oluşumunda gözlenen titreşim ve ani basınç değişimi çok etkilidir. Sade su jeti/aşındırıcı su jeti üzerine yapılan araştırmalar, genelde işlem parametrelerinin optimizasyonu ile ilişkilidir. Bu nedenle, çoğu zaman ihmal edilen genel görünüm üzerine gereken önem verilmelidir. Çünkü bunlar kesme işleminin fiziksel konumunu anlamak ve kesme kalitesini geliştirmek için çok gereklidir. Çizik oluşumu ayrı bir araştırma konusu olup, ASJ sisteminde görülen çizik oluşumu, malzeme aşındırma düzenine ve kesme sırasında sistemde oluşan titreşime bağlıdır. Basınç dalgalanmalarının çizik oluşumuna etkisi oldukça düşüktür. Yüksek ilerleme hızlarında kesme kafasında meydana gelen titreşimler, yumuşak malzemelerde çizik oluşumu üzerinde etkilidirler. Metal malzemelerde ise, düşük hızlardaki kesmede etkileri ihmal edilebilir. Çünkü malzeme üst bölgesinde çarpma yönündeki aralık arttıkça, çizik genliği de artmaktadır. Ayrıca, üst bölgede aşındırıcı parçacıkların sahip oldukları enerji, çizik oluşumunu engelleyebilir. Çizik oluşumunda üç parametre etkilidir. Bunlar sırasıyla kesme işleminin oluşum nedeni, su jeti dinamiği karakteristikleri ve tezgâh sisteminin titreşimi şeklindedir. Her birinin etkisi, işlem ve sistem parametreleri ile değişiklik gösterse de, etkilerini birbirlerinden ayırmak oldukça zordur. Kesme yüzeylerindeki çizik oluşumundan kurtulmak için, tüm kesme işlemlerinde kullanılabilecek yeni bir yöntem henüz geliştirilemediğinden, bu çizikler

kaçınılmazdır. (Eddingfield and Trinh, 1980) Aşındırıcı su jetiyle kesme performansını artırabilmek için kesme kafasıyla ilgili bazı tanımlamaların yapılması zorunludur (Hashish, 1984b). Bu tanımlar sırasıyla, a) Aşındırıcı su jeti kafasına ait akışkanlar mekaniği bilgilerinin geliştirilmesiyle daha yüksek hızlara çıkılabilmesi, b) Kesme kafasındaki akış olayının tam olarak çözümlenmesiyle, kafa performansının belirgin bir şekilde artırılması (Yanaida and Ohashi, 1978), c) Kesme kafası içindeki ölçüm olaylarında, her ne kadar sorun olmuyorsa da aşındırıcı/su/hava karışımına (Yanaida and Ohashi, 1980) ait ölçümlerin daha hassas yapılması için, yeni teknolojilerin geliştirilme zorunluluğu şeklinde ifade edilebilirler.

Nozul seçiminde ele alınacak çeşitli faktörler, çalışma şartları ve işlenecek malzeme türüne göre değişim göstermekle birlikte, genel tavsiyelere uyulduğu sürece performans kalitesi yükselecektir. Nozula girişte türbülans ve vorteks oluşmamak şartıyla, nozulun hassas matematiksel tanımı çok önem taşımamaktadır (Summers, et al., 1980). Ancak, asimetric sınır tabaka gelişimi ve bununla birlikte oluşan dönme hareketini önlemek için, nozul ile giriş borusu arasındaki bağlantının iç içe olmasının yanı sıra, nozul çıkışında sınır tabaka kalınlığının minimum değerde tutulması da gerekmektedir (Leslie, 1976) Bunun için; i) nozul çıkışındaki koniklik açısının sıfırdan büyük olması sağlanarak, paralel silindirik ilavelerden kaçınılmalıdır, ii) nozulda dış boyuta ait geometrik oranın minimum değerde tutulması gereklidir, iii) nozul girişinden nozul çıkışına kadar hidrolik anlamda pürüzsüz cidar kullanılmalıdır. (Eddingfield and Trinh, 1980) Sınır tabaka çıkış kalınlığı minimum değerde tutulduğunda, jetin başlangıç bölge boyu daha büyük olur (Vijay and Brierley, 1980).

C_d , debi katsayısı büyüdükçe, su jeti performansı da büyür. Küçük çap ve C_d değerlerinde, nozulun çok daha yüksek performansta çalışacağı unutulmamalıdır. Buna ek olarak düşük C_d değerlerinde pompa, güç gereksinimi açısından sorun yaratmaz (Vijay and Brierley, 1980). Nozul girişinde gözlenen sınır tabaka ayrılması ve bunun sonucunda, dönmenin olduğu bölgedeki türbülans önlenmelidir (Yanaida, 1974). Nozul çıkışındaki cidara ait eğrilikler boyunca, kavitasyon ve pürüzlülüğe neden olabilecek elemanlara karşı önlemler alınmalıdır. Kontrollü parçacık dağılımı yapıldığı sürece, yeni parçacıklar ve geri dönüşüme uğramış parçacıklar ile çok daha iyi bir

performansa ulaşılabilir. Yeni aşındırıcı parçacıklarda, geri dönüşümlü parçacıklar göre daha çok gözlenen parçalanma olayı, genellikle karıştırma odacığında ve karıştırma nozulunda gerçekleşir (Nanduri and Kim, 1996). Nozul aşınmasında etkili çok sayıda değişken olmasıyla beraber genelde, geometriye, sisteme ve malzemeye ilişkin parametreler etkili olmaktadır. Çıkış çapı artışı, ağırlık kaybı ve nozul çapları, aşınmayı karakterize etmek ve çeşitli aşınma yönlerini açıklamak için kullanılır (Hashish, 1984b). Çıkış çapı aşınması lineer olmadığı gibi, nozul delik profilinin kontrolü altındadır (Doty, et al., 1989). Nozul geometrisiyle ilişkili parametrelerin etkisi deneysel yollarla incelenebilir. Delikte oluşabilecek kaçıklık, aşınmayı artıracak ve böylece nozul performansını etkileyecektir. Nozul boyunun uzamasıyla aşınma profili gecikeceğinden dolayı, uzama aşınmayla ters orantılı olacaktır (Vijay, 1995). Nozulun çarpma yönündeki akış profili üzerinde, nozul boyunun etkisi olmaz. Nozul giriş açısı, nozulun delik profilini doğrudan etkiler. Çıkış çapının ve aşınma eğrisinin doğrusallığı, zamanın bir fonksiyonu olarak giriş konikliğinin düşmesiyle daha da gelişebilir (Nanduri et al., 1996). Büyük açılı nozullar, zamana göre lineer olmayan çıkış çapı değişimi gösterirler (Taggart et al., 1997). Kullanılan aşındırıcı ve işlenecek malzemeye bağlı olmakla birlikte genellikle, nozul giriş açısının 10^0 olduğu durumlarda, minimum aşınma olacağı söylenebilir. Orifis/nozul çapı oranının, nozul aşınmasında önemi büyüktür.

Yapılan geniş çaplı literatür taramasında, aşındırıcı su jetiyle kesmenin diğer kesme metotlarına göre, çevre işleme ve şekillendirmede çok daha yararlı olduğu belirlenmiştir. Profil işlemede tercih edilmesine rağmen, kesmede düzgün doğrusal işlemeden söz edilir. Ana işlem parametrelerine bağlı kalmak şartıyla, kesme karakteristikleri incelendiğinde, yay profili veya profile ait eğriliğin çevre işleme, kesme derinliği ve konikliği üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır (Liu, 2004). Dış kesme cidarındaki koniklik arttıkça, yarıçap yayının uzunluğu da artarken, iç kesmede koniklik azalmaktadır. Aşındırıcı su jetiyle çevresel işlemede karşılaşılan koniklik, nozul çıkışındaki çarpma açısıyla telafi edilir. ASJ ile çevre işlemede su basıncı, aşındırıcı debisi, standof mesafesi ve nozul ilerleme hızının dağılımı, düzgün doğrusal kesmede olduğu üzeredir. İlerleme hızındaki artışla, kesme eni ve derinliği azalırken, koniklik açısındaki artış, düşük ilerleme hızlarında kesme performansını da artırmaktadır. Üstteki kesme eninin standof mesafesiyle artması, standof mesafesiyle kesme derinliği

arasında bir ilişki olduğu anlamına gelmez. Bu nedenle, çevre işleme sırasında koniklik açısını azaltmak için standof mesafesi düşük değerlerde tutulur. Yüksek su basıncı konikliği düşürürken, pürüzsüz ve toplam kesme derinliğini artırmakta ve kritik değer üzerinde, kesme verimini düşürmektedir.

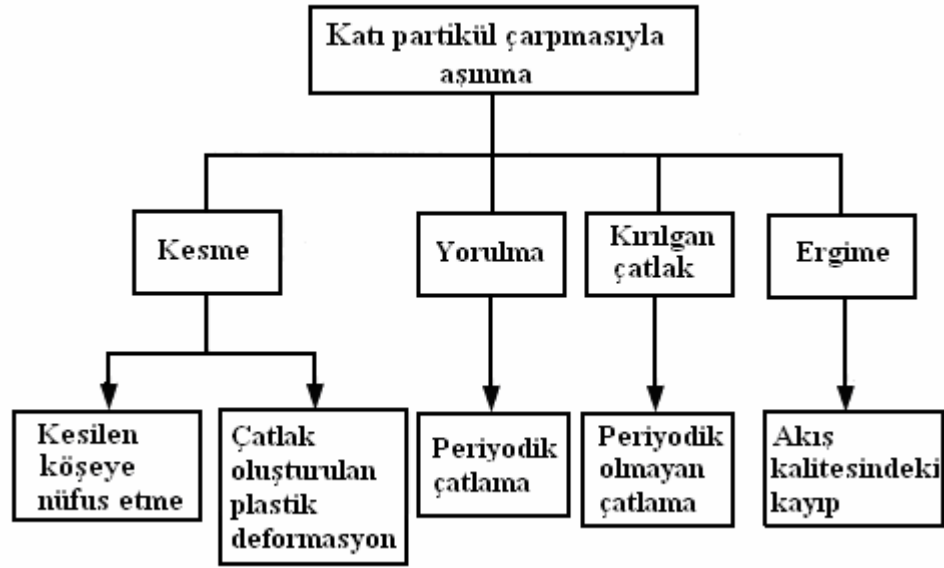
Aşındırıcı su jetiyle farklı şartlarda çok sayıda deneysel çalışmalar yapılmış ancak, jetin yapısıyla aşınma özelliklerinin rasyonelleştirilmesi üzerine yapılanlar sınırlı kalmıştır. Özellikle kayaç kesiminde kavitasyonun kaçınılmaz olduğu bilinmektedir (Johnson et al., 1968; Vijay and Brierley, 1979). Kavitasyon genellikle, yüksek hızlı jetin havaya atılması sırasında oluşmakla birlikte etkileri, dalmış su jetinde de kolaylıkla gözlenmektedir. Kavitasyon ölçümlerinde; akustik, elektriksel ve diğer metotların yanı sıra, çoğunlukla optik metotlar tercih edilir. Diğer ölçüm metotlarında, türbülansla ilişkili büyük basınç dalgalanmaları gözlenmiştir (Arndt, 1981). Basınç dağılımı incelendiğinde, sadece bir noktada minimum kritik basınç oluşabilmekte ve genelde yaklaşık lineer bir değişim göstermektedir. Basınç dağılımında etkili olan parametreler sırasıyla, su jeti nozulunun başlangıçta lineer çapa sahip olması, karıştırma odasının sadece bir noktada minimum kritik çapa sahip olması, ilerleme miktarı ve maksimum kesik alanı oluşumudur. Bunlara ek olarak aşındırıcı su jeti parametrelerinin etkileri; aşındırıcı sertliğinin genelde lineer değişim göstermesi, yüksek debide kesme derinliğinin düşmesi, bazı durumlarda çok pasolu kesimin tek pasoluya göre çok daha verimli olması, belli değerlerin üzerindeki sertlik değerlerinde kesme veriminin sabit kalması şeklinde özetlenebilir. Çok çeşitli parametrelere bağlı olmakla beraber, 1,6~300 mm kalınlığındaki malzemelerde ulaşılabilecek maksimum tolerans, $\pm 0,13$ mm iken, 150 mm' lik deliklerde ise delme açısı sorunu olmaksızın $\pm 0,03$ mm için işlenebilecek minimum delik çapı $0,2 \pm 0,03$ mm' dir (Öjmerts, 1994, 1996). Malzeme kalınlığı, iş parçası çıkışında jetin karakterini bozabilir. Çalışan sistemin tasarım özelliklerine bağlı olarak, $\pm 0,1$ mm' den daha düşük tolerans elde edilirken, ısıdan etkilenme ve malzemede moleküler yapı bozulması söz konusu olmadığı için, yapısal çarpılma da görülmez. 400 MPa basınçtaki su hızı, çapa bağlı olarak değişmekte ancak, orifisten püskürtülürken genellikle, ses hızının üç katı kadar bir değere ulaşmaktadır (Öjmerts, 1994). Aşındırıcı ilavesiyle elde edilen su hızı, başlangıç hızının yarısına kadar düşebilir. Su hızını düşürmeden aşındırıcı ilavesi, bir başka

problem olup, ayrıca incelenmelidir. Garnet geri kazanım sistemi, çalıştırma maliyetini üçte bir oranında düşürebilir (Öjmerts, 1994). Su jetinde karşılaşılabilecek bir diğer sorun ise, işlemin kendisiyle ilişkili olmayan, kontrolü sırasında oluşabilecek sorunlardır. Jet hızında olabilecek ani değişiklik veya aşırı ilerleme hızı, kaba yüzey oluşumuna neden olabilir (Öjmerts, 1996)

Aşındırıcı su seti sistemleri, gelişmiş ülkelerde özel takım tezgâhları pazarının en hızlı büyüme payına sahiptir. Ancak, ülkemizde çok iyi bilinmemesi nedeniyle, üretimde tam anlamıyla kullanıldığı söylenemez. Yapılan karşılaştırmada, aşındırıcı su jeti sistemlerinin malzeme işleme çeşitliliği, ilk yatırım, yeniden işleme gereksinmesinin olmaması, kesme kalınlığı ve kalitesi yönünden lazer, plazma ve oksijen ile kesme yapan sistemlere göre kesinlikle üstünlük sağladığı görülmüştür. Bu çalışmayla hedeflenen amaç, malzeme işleme teknolojisinde geline son noktayı, ülkemiz imalatçı sektörüne göstermek ve aşındırıcı su jeti teknolojisinin alternatiflerine olan üstünlüklerini ortaya koymaktır. Aşındırıcı su jetiyle işlemede, malzeme sertliğiyle birlikte artan malzeme kalınlığı ve ilerleme hızı, çapak oluşumunu artırmaktadır. Bu durumda, malzemenin kesilememesi de söz konusu olabilir.

3. AŞINDIRICI SU JETİNİN TEORİK ANALİZİ

Aşındırma işlemi; su jetinin yüksek hızda taşıdığı aşındırıcı parçacıkların malzemeye çarpması sonucu gerçekleşir. Şekil 3.1’ de gösterildiği gibi aşındırma işleminde malzeme yapısı çok etkilidir.



Şekil 3.1. Kırt Parçacık Aşınmasıyla Malzeme Aşındırma Mekanizmaları
(qualjet, 2005)

Aşındırıcı su jetiyle işlenen malzemeler, farklı karakteristik özelliklere sahip olup bazıları kırılabilir, bazıları ise sünekler. Kırt parçacığın neden olduğu aşındırmaı daha iyi ifade etmek için, boyutsuz bir aşındırma sayısının (E_N) tanımlanmasında yarar vardır.

$$E_N = \frac{m_M}{m_P} \quad (3.1)$$

Aşındırılan malzeme yoğunluğu (ρ_M), aşındırıcı parçacık kütlesi (m_P) kullanılarak, her bir kırt parçacık için aşındırılan hacim (V_M),

$$V_M = \frac{E_N \cdot m_p}{\rho_M} \quad (3.2)$$

(3.2) denkleminle hesaplanabilir. Kırılgan özellik gösteren malzemeler için, (3.2) nolu bağıntıya ilişkin çözüm, aşağıda yazılı maddeler ele alınarak irdelenmiştir. Bunlar sırasıyla,

1. Sünek malzemelerin aşındırılması,
2. Genelleştirilmiş aşındırma bağıntısı,
3. Sünek malzemeler için, katı parçacığın genelleştirilmiş aşınma modelleri şeklinde özetlenebilir.

(3.2) nolu bağıntı, malzeme aşındırmada yapılan işin, aşındırıcı parçacığın sahip olduğu kinetik enerjinin bir fonksiyonu olduğunu ifade etmektedir. Parçacık kinetik enerjisinin bir kısmı malzeme tarafından yutulduğu için, parçacığın sahip olduğu kinetik enerjinin tamamı, malzeme aşındırma işleminde kullanılmaz. Çarpma açısı dik olduğu sürece (90° 'ye kadar), malzeme tarafından yutulan kinetik enerji miktarı artarken, aşındırılan malzeme miktarı da o oranda düşer. Ayrıca, parçacık çarpışması ne kadar iyi ise, kesme kalitesi de o derece yüksek olur. Tüm bu etkenler dikkate alınarak aşındırılan malzeme hacmi için,

$$V_M = \frac{\lambda_1 \cdot v_p^2 \cdot m_p}{2 \epsilon_M} \cdot \lambda \cdot f\left(\frac{H_p}{H_M}\right) \cdot f(\varphi) \quad (3.3)$$

yazılabilir. (3.3) nolu bağıntıdaki ilk kesrin pay kısmı, aşındırıcı parçacığın kinetik enerjisi, payda ise birim hacimde yüzeyden malzeme kaldırılması için gerekli olan enerjiyi ifade etmektedir. Bu kesir, parçacık sertliğinin malzeme sertliği oranına ait bir fonksiyon ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. Sonuç ifade ise; parçacığın malzemeye çarpma açısının bir fonksiyonu ile çarpılır. λ_1 ve λ çarpım katsayılarıdır (qualjet. com, 2005).

3.1. Aşındırıcı Su Jetiyle Kesmede Enerji Korunumu

Kesme sırasında aşındırılan malzeme miktarı, (3.4)' de olduğu üzere, su jetinin kinetik enerjisiyle doğru orantılıdır.

$$\frac{dV_M}{dt} \propto \frac{dE_A}{dt} \quad (3.4)$$

Böylece,

$$dV_M = h \cdot b \cdot dx \quad (3.5)$$

ve

$$\frac{dE_A}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m}_A \cdot v_A \quad (3.6)$$

yazılabilir. Bernoulli bağıntısı ve momentum korunumu ifadesinden v_A ve v_w için, (3.7) ve (3.8) bağıntıları yazılabilir.

$$v_A = \frac{v_w}{1 + (\dot{m}_p / \dot{m}_w)} \quad (3.7)$$

$$v_w = \sqrt{\frac{2P}{\rho_w}} \quad (3.8)$$

$$h \cdot b \cdot v \propto \frac{P \dot{V}_w}{\dot{m}_A} \quad (3.9)$$

Sonuçta, (3.9)' da verilen oran elde edilmiş olur. ASJ' nin hacimsel debisini hesaplamak için, aşındırıcı debisi ve kesme genişliği değerlerine ihtiyaç vardır. Bunun için (3.9) nolu bağıntıda verilen sabit bir oran oluşturularak elde edilen denklem,

$$h = C_0 \frac{P}{v} \quad (3.10)$$

(3.10)'daki şekle dönüşür. SJ, sadece bir yönde akmadığı yani ilerleme bileşenlerine sahip olduğu halde jet basıncı, eşik basıncının üzerine çıkmadığı sürece, kesme işleminin başlamayacağı kabul edilerek (3.11) nolu bağıntı elde edilmiştir (Oweinah et al., 1985; Momber and Kovacevic, 1995b).

$$h = C_0 \cdot \frac{P - P_{thr}}{v^{(0.86 + \frac{2.09}{v})}} \quad (3.11)$$

Araştırmacı, AlMgSiO₂ alaşımının kesme derinliğini tayin etmek için (3.8) nolu bağıntıyı kullanarak, deneysel ve teorik sonuçları karşılaştırmıştır (Blickwedel, 1990). Araştırmacılar, kırılğan malzemeleri ASJ ile kesmek için elasto-plastik bir model geliştirip, modelin türevini enerji yaklaşımını kullanarak hesaplamışlardır (Zeng and Kim, 1992). Enerji yaklaşımına göre, parçacıkların bir kez çarpmasıyla aşındırılan toplam malzeme miktarı; plastik akışla aşındırılan tanecikler arasında çatlak oluşturan ve aşındırılan sünek malzeme miktarının toplamıdır.

$$V_M = V_{PL} + V_{FR} \quad (3.12)$$

(3.13) nolu denklemden de anlaşılacağı üzere, kırılğan malzemelerde belirli hacimde malzeme aşındırma işleminde, enerji dengesi için parçacıklar arasında çatlak ağının kopma enerjisiyle, çarpma anında oluşan gerilme dalgaları tarafından yutulan enerjinin (E_{STR}), eşit olması gerekir.

$$E_{FR} = 6 \cdot \gamma_M \cdot V_{FR} / D_M \quad (3.13)$$

Böylece, çarpma sırasında gerilme dalgaları tarafından yutulan enerji miktarı,

$$E_{STR} = f_e \cdot f(v_M) \cdot \left(\frac{\rho_M}{\rho_a} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{H_M}{E_M} \right)^{1.5} \cdot E_p \quad (3.14)$$

şeklinde yazılabilir. $dV_M = h \cdot b \cdot dx$ eşitliği, (3.15) ve (3.16) nolu bağıntılarla birlikte kullanılarak, $h = dV_M / b \cdot dx$ şeklinde verilen kesme derinliği ifadesine (Hutchings, 1979a,b). Düşük çarpma açılarında her bir parçacığın aşındırdığı hacim için,

$$V_{M1} = \frac{f_w \cdot f_e \cdot D_M \cdot \sigma_f \cdot f(v_M) \cdot m_p \cdot v_p^2 \cdot \sin^2 \varphi}{3 \cdot \gamma_M \cdot E_M} + \frac{m_p \cdot v_p^2}{4 \cdot \sigma_f} \cdot \left[\sin 2\varphi - 4 \cdot \sin^2 \varphi + 38.12 \cdot v_p \cdot \sin^3 \varphi \cdot \sqrt{\frac{\rho_a}{\sigma_f}} \right] \quad (3.15)$$

(3.15) nolu ifade yazılabilir. Normal çarpma açılarındaki ise, (3.16)'daki ifade kullanılır.

$$V_{M2} = \frac{f_w \cdot f_e \cdot \varphi \cdot f(v_M) \cdot m_p \cdot v_p^2}{2 \cdot \gamma_M} \cdot \left(\frac{\rho_M}{\rho_a} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{H_M}{E_M} \right)^{1.5} + \frac{m_p \cdot (v_p - v_{el})^2}{2 \cdot \varepsilon_M} \quad (3.16)$$

3.1.1 Malzeme kesmede enerji transferi

ASJ ile kesme işlemini değerlendirme yöntemlerinden birisi de, fiziğin temel prensiplerinden biri olan, iş ve enerjinin korunumu ilkesinden yararlanılan enerji dengesidir. İş ve enerji kavramlarından her ikisi de skaler büyüklük oldukları için, şiddetleri önemlidir. Belirli değerdeki kinetik enerjiyle malzemeye çarpan ASJ, daha sonra malzemeyi yine belirli bir enerjiyle terk eder. Bu iki enerji arasındaki fark; çarpma, sürtünme, kesme vb. işlemleri için harcanan enerji olup,

$$E_{\text{harcanan}} = E_A - E_{ex} \quad (3.17)$$

ile tanımlanır. Aşındırıcı su jetinin kinetik enerjisi ise, (3.18)'de olduğu üzeredir.

$$E_A = \frac{1}{2} m_A v_A^2 \quad (3.18)$$

Kütle değeri, aşındırıcı su jetinin iki temel elemanı olan su ve parçacığın kütleli debi ifadeleri (3.19 ve 3.20) kullanılarak elde edilen enerji bağıntısı,

$$m_A = (\dot{m}_p + \dot{m}_w) \cdot t \quad (3.19)$$

şeklinde yazılabilir. Tepki süresi ise, odaklama tüpü çapı ve tek bir aşındırıcının hızı dikkate alınarak (3.20)'de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$t = \frac{d_F}{v} \quad (3.20)$$

Böylece aşındırıcı su jetinin kinetik enerjisi,

$$E_A = \frac{d_F}{2v} (\dot{m}_p + \dot{m}_w) \cdot v_A^2 \quad (3.21)$$

şekline dönüşür. Elastik olmayan çarpışma için basit bir momentum korunumu denkleminde elde edilen, aşındırıcı su jeti hızına ilişkin bağıntı (3.22)' de verilmiştir.

$$v_A = \alpha \frac{v_W}{1 + \dot{m}_p / \dot{m}_w} \quad (3.22)$$

Su jeti hızına ait pompa basıncı değeri, Bernoulli bağıntısından elde edilen (3.23) nolu denklem yardımıyla hesaplanabilir.

$$v_W = \varphi \sqrt{\frac{2P}{\rho_W}} \quad (3.23)$$

ASJ ile ulaşılabilecek kesme miktarı, kesme derinliği ile tanımlanır. Eğer malzeme kesilmemiş ise, kesme derinliği sıfırdır. Jet değişkenlerinin ulaşabileceği maksimum derinlikte malzeme kesimi söz konusu ise, kesme derinliği $h = h_{\max}$ olur. Deneysel olarak h_{\max} , kesme yüzeyindeki çiziklere göre belirlenir. Kesme yüzeyi tabanında oluşan çizikler birbirine teğet olduğunda, istenilen maksimum kesme derinliğine ulaşırlar. Çizikler, kesilen kısmın önceki özelliklerini ifade etmektedir. Boyutsuz bir değişken olan kesme miktarı (φ), gerçek kesme derinliğinin, ulaşılabilir maksimum kesme derinliğine oranı (3.24)' de olduğu üzere,

$$\varphi = \frac{h}{h_{\max}} \quad (3.24)$$

şeklinde ifade edilir. Böylece kesme sırasında harcanan enerji miktarı; (3.25)' de verilen bağıntı yardımıyla hesaplanır.

$$E_{\text{harcanan}}(\phi) = \chi(\phi) \cdot (E_A - E_{ex}) \quad (3.25)$$

Bu bağıntı; harcanan enerji miktarının, sadece aşındırıcı jetin girişteki ve malzemeyi terk ettiği andaki kinetik enerji değerine bağlı olmadığını, ayrıca malzemenin kesilip kesilmediğine ve eğer kesilmiş ise, kesme verimine de bağlı olduğunu göstermektedir. Başka deyişle, (3.25) nolu bağıntıdan da anlaşılacağı gibi malzeme kesilmiyor ise, kesme işleminin sonunda enerji kaybı olmaz. Malzeme maksimum derinlikte kesildiğinde, jet içerisinde harcanan enerjinin tamamı kesme işlemi için kullanılır. Kesme derinliği h_{max} ' dan küçük sıfırdan büyük ise, enerjinin bir kısmı kesmede diğer kısımları ise sürtünme, çarpma, ısıtma ile su-parçacık-film hareketini yavaşlatma gibi işlemlerde harcanmış demektir. Su jetinin kesme kabiliyeti, pompa basıncına bağlıdır. Basınç, belli bir değerin üzerinde ise malzeme kesilebilir. Bir başka deyişle, malzemenin kesilebilmesi için, pompanın belirli bir başlangıç basıncına (P_{thr}) ulaşmış olması gerekir. Pompa basıncı, eşik basıncından daha düşük yani $P < 75$ MPa ise, kesme yüzeyinde kopmuş parçacık atıklarına rastlanılmaz. Bu durum, söz konusu basınç değerinde kesme işleminin gerçekleşmemiş olduğunu göstermektedir. Enerji açısından değerlendirildiğinde,

$$P \leq P_{\text{eşik}} \text{ ise; } E_{\text{harcanan}} = 0 \quad (3.26)$$

$$P > P_{\text{eşik}} \text{ ise; } E_{\text{harcanan}} > 0 \quad (3.27)$$

bağıntıları elde edilir. Eşik basıncı, kesme işleminin yapılması için gereken sınır basınçtır. Sonuç olarak ulaşılan enerji, aşındırıcı su jetinin kesme işlemi sırasında daha fazla malzeme kaldıramayacağı enerji miktarını gösterir. İlk durumda, (3.26) nolu bağıntı yardımıyla elde edilen $P_{\text{ex}} = P_{\text{eşik}}$ eşitliği, (3.26 ve 3.27) nolu denklemlerde elde edilen nozul çıkışındaki suyun enerjisi, (3.28)' denklemiyle ifade edilmiştir.

$$E_{ex} = \frac{\alpha^2 \phi^2 d_F (\dot{m}_p + \dot{m}_w)}{v \left(1 + \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_w} \right)^2 \rho_w} P_{\text{eşik}} \quad (3.28)$$

Eşik basıncından daha büyük bir pompa basıncında, malzemelerin maksimum derinlikte kesilmesi durumunda, su jeti tarafından harcanan enerjinin tamamı kesme işleminde kullanılmıştır. Bu şartlarda su jeti çıkış enerjisi, (3.28) nolu bağıntıda verildiği gibi elde edilir. Eşik basıncının üzerindeki basınçlarda kesme için kullanılan enerji miktarı ise, bağıntı (3.29)' da verilmiştir.

$$E_{\text{harcanan}} = \chi(\phi) \cdot K \cdot (P - P_{\text{eşik}}) \quad (3.29)$$

Buradaki K' akış katsayısı, (3.30) nolu denklem yardımıyla hesaplanır (Momber and Kwak, et al.,1996).

$$K' = \frac{\alpha^2 \phi^2 d_F (\dot{m}_p + \dot{m}_w)}{v \left(1 + \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_w}\right)^2 \rho_w} \quad (3.30)$$

3.1.2 Hava-katı parçacıkların yüksek hızlı su jetine karıştırılmasında enerji transferi

Yüksek hızlı su jetinde askıda bulunan katı parçacıkların malzemeyi aşındırması, ASJ ile kesmede temel işlem olarak kabul edilir. Bu şekilde bir takımın imal edilmesi, işlenmesi zor olan malzemelerin, örneğin her tür seramik (Momber et al., 1997), takviyeli ve kompozit malzemeler (Ramulu and Arola, 1994) ve ısıya karşı hassas olan alaşımların (Kovacevic et al., 1996) işlenmelerine olanak sağlamıştır. Tipik bir aşındırıcı sisteminde çoğu zaman, basınç artırıcı pompa şeklinde karşılaştığımız bir basınç üretici, karıştırma ve ivmelendirme kafası, yerleştirme düzeni ve yakalayıcı bulunur. Jet oluşumuna göre aşındırıcı su jetleri, enjeksiyon jetleri veya süspansiyon jetleri olarak sınıflandırılabilir. Pratikte, enjeksiyon jetleri daha çok kullanılmaktadır. Enjeksiyonlu aşındırıcı su jetlerinde, küçük katı parçacıklar (garnet, alüminyum oksit, silika karbür) ivmelendirilip, yüksek hızlı su jetiyle temas ederek karıştırılır. Yüksek hızlı su jetine, karıştırma ve ivmelendirme kafası üzerine yerleştirilmiş bir orifis

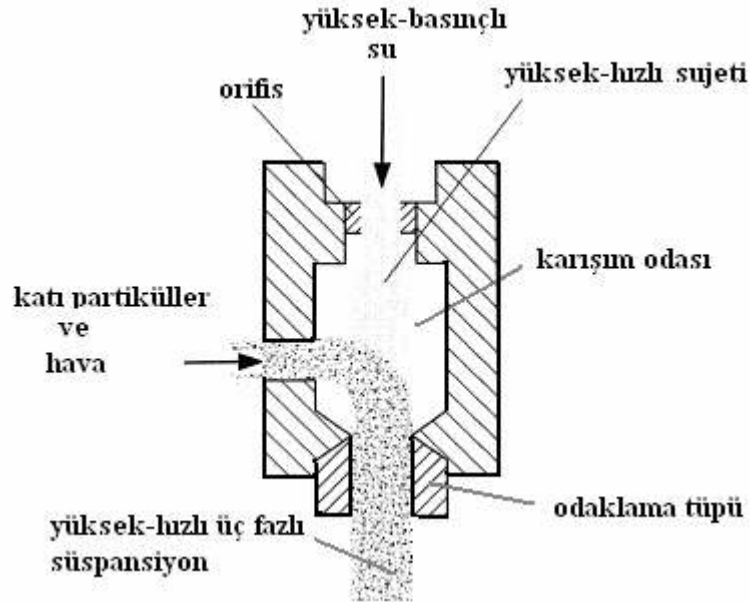
yardımıyla şekil verilir. Su jeti, karıştırma odasında vakum oluşturduğundan, katı parçacıklar karıştırma ve ivmelenme kafasına ayrı bir giriş deliğinden emilir. Katı parçacıkların, su jetinin ve havanın karıştırılması ve ivmelenme işlemi, odaklama borusu yardımıyla karıştırma odasında gerçekleştirilir. Karıştırma ve ivmelenmeyi takiben, üç fazlı süspansiyon yüksek hızda boruyu terk eder. Bu süspansiyon ASJ uygulamalarında gerçek işleme takımı olarak bilinir. Karıştırma ve ivmelenme işlemi oldukça karmaşıktır ve bu oluşumu incelemek için çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Bu metotlara, sonlu elemanlar (Raissi et al., 1996), yüksek hızlı kamera ile gözleme (Kovacevic et al., 1996), basınç profil ölçümleri (Himmelreich, 1992) ve parametre çalışmaları örnek gösterilebilir. (3.31) nolu bağıntıda verilen debi ifadesi, kuvvet birimine sahip olmak şartıyla deneysel yollarla tayin edilebilir.

$$\dot{I} = F_F = \rho_F Q_F v_F \quad (3.31)$$

Araştırmacılar, plastik malzemelere ait aşınmanın yüksek hızlı su jetleriyle modellenmesi için kuvvet ölçümünü tercih etmişlerdir (Decker et al., 1988). Araştırmacı Li ve arkadaşları ise, aşındırıcı su jetinin iş parçası üzerine uyguladığı çeşitli işlem parametrelerinin etkisini incelemişlerdir (Li et al., 1988). Araştırmacılar aşınma sırasında ortaya çıkan, aşındırıcı su jetine ait statik kuvveti kullanarak, yüzey parametrelerini kontrol etmişlerdir. Böylece, bu parametrelerinin etkisini de detaylı olarak inceleme ve tanıma imkânı bulmuşlardır (Kovacevic et al., 1990; Hunt et al., 1987; Curnham et al., 1989). Kovacevic ve arkadaşları, benzer türde uygulamalar için yüzey profili ve dinamik kesme kuvveti arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Ayrıca yaptıkları çalışmalarda, aşındırıcı su jetinin yarattığı iş parçası reaksiyon kuvvetiyle, malzemedeki delme derinliğini kontrol altında tutmuşlardır (Kovacevic and Chen, 1989; Kovacevic et al., 1995).

3.1.3. Katı parçacığın karıştırılması ve ivmelenmesi işlemlerinde enerji transferi

İvmelenme ve karıştırma işlemi, yüksek hızlı su jetinden katı parçacıklara enerji aktarımı şeklinde gerçekleştirilir. Şekil 3.2’ de gösterildiği gibi, aktarma sırasında düşük hızlı parçacıkların enjeksiyonu ve parçacıklarla havanın emilmesi olayı dikkate alınmalıdır. Çıkıştaki jetin sahip olduğu enerji su, katı parçacıklar ve havadan oluşan üç fazlı süspansiyonun kinetik enerjisidir.



Şekil 3.2. Enerjiyi Dengeleyen Karıştırma ve İvmelendirme Cihazı
(Mazurkiewicz and Galecki, 1990)

Enerji dengesinde $\sum E = \text{sabit}$ olduğu sürece, (3.32)' de verilen eşitlik,

$$\frac{(\dot{m}_P + \dot{m}_W + \dot{m}_A) v_s^2 t}{2} = \frac{t}{2} \left[(\dot{m}_W v_W^2) + (\dot{m}_P v_P^2) + (\dot{m}_A v_A^2) \right] \quad (3.32)$$

şeklinde yazılabilir. Soldaki terim, su ve katı parçacıklar arasındaki elastik olmayan çarpışmadan dolayı oluşacak enerji kaybı dikkate alınmadan elde edilen süspansiyonun

kinetik enerjisidir. Yüksek hızlı ortamda üç fazın hızları birbirine eşit olacağı için, radyal hız bileşenleri ihmal edilebilir. Tüm ortamdaki havanın kütleli debisi % 3 mertebesinde (Meier, 1991). Düşük hızlı katı parçacık ve hava hızları da ihmal edilebilir. Karıştırma ve ivmelenme işlemleri sırasında yapılan tüm sadeleştirmeler ve kayıplar, enerji transfer parametresi κ_S ile birleştirilecek olursa (3.32) nolu ifade,

$$\kappa_S = \frac{(\dot{m}_P + \dot{m}_W) v_s^2 t}{\dot{m}_W v_w^2} \quad (3.33)$$

şekline dönüşür. κ_S parametresi (3.34a)' da verilen transfer kayıplarını da içerir. Bunlar sırasıyla; parçacık cidar etkileri, parçacık ezilmesi, havanın ivmelenmesi, türbülans, partikül-partikül etkileri olarak özetlenebilir. Böylece elde edilen sonuç ifade, (3.34a)' da verildiği gibi

$$\kappa_S = \kappa_{PW} + \kappa_{PP} + \kappa_{PC} + \kappa_A + \kappa_T \quad (3.34a)$$

olacaktır. κ_S parametresi çok sayıda işlem parametrelerinin bir fonksiyonudur. Bu parametreler; su jeti hızı, parçacık kütleli debisi, parçacığın tanımlanması, karıştırma odası ve odaklama geometrisidir. Bu fonksiyon, deneysel yollarla iki şekilde tespit edilebilir. Birincisinde,

$$\kappa_S = \left(\frac{v_s}{v_w} \right)^2 (1 + \dot{R}) \quad (3.34b)$$

(3.34b) eşitliği kullanılabilir. \dot{R} , (\dot{m}_P/\dot{m}_W) oranıdır. Parçacık ve su jeti hızı çeşitli metotlarla tayin edilir. İkinci metotta ise, hızlar yerine çarpma kuvvetleri kullanıldığında,

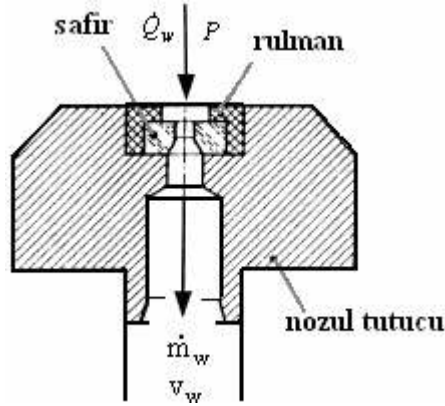
$$\kappa_S = \left(\frac{F_s}{F_w} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{1 + \dot{R}} \right) \quad (3.35)$$

(3.35) nolu bağıntıya ulaşılır. Bu metot, ilk kez araştırmacı Hashish tarafından kullanılmıştır (Hashish, 1989a).

3.1.4. Yüksek hızlı su jeti oluşumunda enerji transferi

Yüksek hızlı bir su jeti elde etmek için, kullanılması önerilen nozulun şematik resmi Şekil 3.3' de verilmiştir. Orifiste gerçekleşen enerji transferi, (3.36) nolu enerji bağıntısı ile ifade edilmiştir.

$$P \cdot \dot{Q}_w \cdot t = \frac{\dot{m}_w \cdot v_w^2 \cdot t}{2} \quad , \quad \dot{m}_w = \frac{\pi}{4} d_w^2 \cdot \rho_w \cdot v_w \quad (3.36)$$



Şekil 3.3. Yüksek Hızlı Su Jetinde Orifisin Şematik Gösterimi (Momber, 2001)

Bağıntının solundaki terim, basınç üreticinin hidrolik gücüdür. İfadede basınç kaybı ve orifis girişi arasındaki basınç kaybı da dikkate alınmıştır. Sağdaki terim ise, yüksek hızlı su jetinin kinetik enerjisidir. Su jetinin ivmelenmesiyle orifiste oluşan enerji kayıp katsayısı,

$$\kappa_w = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_w \dot{Q}_w}{\dot{m}_w} \right) \frac{v_w^2}{p} \quad (3.37)$$

(3.37) ile hesaplanabilir. Böylece yüksek hızlı su jeti çıkış hızı ölçülebildiği sürece, κ_w değerleri hesaplanır. Jet çıkış hızı, Momber ve Kovacevic tarafından ortaya atılan metotlarla doğrudan tespit edilir (Momber and Kovacevic, 1998). Söz konusu metotlar

diğer araştırmacılar tarafından da kullanılmıştır (Himmelreich, 1992; Neusen et al., 1994; Chen and Geskin, 1991). Bir başka metot ise, su jeti hızının yerine başka fiziksel parametreler yerleştirilerek, doğrudan tayin edilmesidir. Bernoulli denklemi, (3.36) nolu ifade ile birleştirildiğinde, orifis çıkışındaki yüksek hızlı su jeti hızına ilişkin ifade,

$$v_w = \eta \sqrt{\frac{2p}{\rho_w}} \quad (3.38)$$

řeklinde-dir. Yüksek hızdaki akıřa ait hacimsel debi, keskin köřelerden geerirken dūřer (Dubbel, 1998). Bu dūřüř, genelde debi katsayısıyla tanımlanır. Boylice debi katsayısını da içeren sonuç ifade, (3.39)'da verildiđi üzere,

$$\dot{Q}_w = C_{d_o} \cdot \dot{Q}_w \quad (3.39)$$

dir. Yüksek alışma basınçlarında, suyun sıkışabilirliliği söz konusu olduğundan, kullanılan suyun yoğunluğundaki değişimler de dikkate alınmalıdır. (3.40)'da verilen yoğunluk ifadesi,

$$\rho = \chi \cdot \rho_w \quad (3.40)$$

(3.36)–(3.40) nolu bağıntılar birleştirilerek (3.41) nolu denklem yazılabilir.

$$\kappa_w = \eta^2 \cdot \alpha \cdot \chi = \frac{F_w^2}{2 \rho_w Q_w^2 p} \quad (3.41)$$

3.1.5. Karıştırma odası ve odaklama tüpündeki akışın analizi

➤ Karışım odasına emilerek katı parçacıklara aktarılan enerjinin tanımı

Emilen katı parçacıklara doğrudan aktarılan enerji miktarı, (3.42)'de verildiği gibidir.

$$\frac{\dot{m}_p v_s^2 t}{2} = \frac{\dot{m}_w v_w^2 t}{2} \quad (3.42)$$

Parçacık hızı süspansiyon hızına yaklaştığında ($v_p \rightarrow v_s$), enerji kayıp katsayısı,

$$\kappa_P = \frac{\dot{m}_P v_P^2}{\dot{m}_w v_w^2} = \left(\frac{F_E}{F_w} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{R} \right) \quad (3.43)$$

şekline dönüşür. Burada da, su ve katı parçacıklar arasındaki elastik olmayan çarpışmaların neden olacağı enerji kaybı ihmal edilmiştir. (3.42) nolu bağıntı irdelendiğinde, orifisten geçen sıvının daralmaya zorlandığı orifis cidarındaki sürtünmenin maksimum olduğu bölgede, enerji kullanımının da en yüksek değerine ulaştığı sonucuna varılır. (3.42) nolu ifade yeniden düzenlendiğinde, (3.44) nolu bağıntı elde edilmiştir.

$$v_w = \sqrt{\frac{2(p - p_L)}{\rho_w}} = \sqrt{\frac{2p(1 - p_L/p)}{\rho_w}} \quad (3.44)$$

Böylece su jetine ait hız (sönümlenme) katsayısı, (3.45) nolu bağıntı yardımıyla bulunur.

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{p_L}{p}} \quad (3.45)$$

Borudaki basınç kaybı, akış hızıyla ikinci dereceden bir ilişkiyle (3.46) tanımlanabilir.

$$p_L \propto v_0^2 \quad (3.46)$$

Su jetinin akış hızı ise, (3.45) nolu bağıntı yardımıyla hesaplanır.

$$v_0 = \frac{4}{\pi} \frac{\dot{Q}_w}{d_w^2} \quad (3.47)$$

Kullanılan basınç artırıcının dolayısıyla pompa basıncının artmasıyla, hacimsel debi de artacaktır. Böylece pompa basıncındaki artışla, sürtünmeden kaynaklanan basınç kaybı da artarak, hız katsayısı düşecektir (Himmelreich, 1992). Araştırmacılar, pompa basıncındaki artışın debi katsayısını düşürdüğünü ve debi katsayısı için ideal değerlerin

ise, 0,62~0,75 arasında olduğunu ifade etmişlerdir (Hashish, 1989a; Claude et al., 1998). Sıvı basıncının bir fonksiyonu olarak, yoğunluk için tanımlanan lineer-elastik yaklaşım, (3.48)2 de verildiği şekildedir (Truckenbrodt, 1968).

$$\frac{\partial p}{Y_w} = \frac{\partial \rho_w}{\rho_w} \quad (3.48)$$

(3.48) nolu ifadenin integrasyonu ile (3.49) nolu denklem elde edilmiştir.

$$\rho_w(p) = \rho_w \exp\left(\frac{p}{Y_w}\right) \quad (3.49)$$

Yüksek hızlı su jetinin bir fonksiyonu olarak, karıştırma ve ivmelenme işlemine ait enerji transfer verimi ele alındığında, üç ayrı farklı özellik görülür. Birincisinde, su jeti hızı arttıkça, enerji transfer verimi de yaklaşık lineer olarak artmakta, ikincisinde ise verim, $0,30 < \kappa_E < 0,66$ arasında değişmektedir. Böylece SJ enerjisinin ortalama %50'sinin yüksek hızlı üç fazlı süspansiyon tarafından taşındığı anlaşılmaktadır. Üçüncüsünde ise, çarpma kuvveti ve katı parçacık hızına ilişkin ölçümler birbiriyle uyuşmaktadır.

$$0,5 = \kappa_{PW} + \kappa_{PC} + \kappa_A + \kappa_T \quad (3.50)$$

Parçacığın ezilmesiyle yutulan enerji miktarı (κ_{PC}), denklem (3.51) yardımıyla ifade edilmiştir (Mazurkiewicz et al., 2001).

$$\kappa_{PC} = \frac{E_{PC}}{E_w} \quad ; \quad E_{PC} = w_i \frac{\sqrt{d_{pin}} - \sqrt{d_{pex}}}{\sqrt{d_{pex}}} \sqrt{\frac{100}{d_{pin}}} \quad (3.51)$$

d_{pin} , karıştırma odası girişindeki parçacık çapı, d_{pex} ise çıkıştaki parçacık çapı olmak üzere, ezilen parçacıkların kinetik enerjisi (3.51)' de verilen bağıntı yardımıyla hesaplanabilir. Araştırmacılara göre, SJ girişindeki enerjinin sadece % 5'i parçacık kırılmasında kullanılmaktadır (Mazurkiewicz et al., 2001). Böylece, $\kappa_{PC} = 0,05$ olmak üzere, türbülansın neden olduğu enerji, yüksek hızlı üç fazlı akışa ait türbülans derecesi

ve (3.52) nolu denklem kullanılarak hesaplanabilir. Türbülansın neden olduğu enerji değerinin, $\kappa_T = 0,15$ alınması önerilmiştir. Havanın ivmelenmesi ve jet yapısındaki bozulmalar nedeniyle, giriş enerjisinin % 50' si yutulabilir. Katı parçacık ilavesiyle hacimsel hava debisi % 70 oranında azalmaktadır (Himmelreich, 1992).

$$\kappa_T = \frac{\sigma_{vP}}{\bar{v}_P} \quad (3.52)$$

$\kappa_{AP} = 0,7$ ve $\kappa_A = 0,35$ için, üç fazlı süspansiyonda SJ giriş enerjisi (3.53) nolu eşitlikle elde edilir (Himmelreich, 1992).

$$E_S = \kappa_S E_w = E_{SW} + E_{SP} = (\kappa_{SW} + \kappa_P) E_W \quad (3.53)$$

➤ Karıştırma odasına emilerek havaya aktarılan enerjinin tanımı

Katı parçacıkların emilmesi sırasında, emilen hava yüksek hızlı su jetiyle ivmelendirilir. Enerji dengesi, (3.54)' de görüleceği üzere;

$$\frac{(\dot{m}_W + \dot{m}_A) v_E^2 t}{2} = \frac{t}{2} \left[(\dot{m}_W v_W^2) + (\dot{m}_A v_A^2) \right] \quad (3.54)$$

şeklindedir. İfadedeki v_E , hava ile birlikte yüksek hızlı su jeti hızıdır. Hava için düşük debi ve giriş hızı ihmal edilerek, jetteki havanın ivmelenmesiyle oluşan enerji kayıp katsayısı,

$$\kappa_A = \left(\frac{v_E}{v_W} \right)^2 \quad (3.55)$$

(3.55) ile tanımlanır. Ayrıca, transfer verim parametresi olarak da bilinen bu değer (3.56) nolu denklem yardımıyla da hesaplanabilir (Himmelreich, 1992).

$$\kappa_A = \left(\frac{F_E}{F_W} \right)^2 \quad (3.56)$$

➤ Odaklama tüpündeki akışın tanımı

Hız ve momentum vektörel bir büyüklük olduğu için, bu değerlerin büyüklükleri kadar doğrultuları da önemlidir. Su jetine giren aşındırıcı parçacıkların, iş parçasına dik olarak çarpmaları, aşındırıcıların sahip olduğu hızın odaklama tüpüyle aynı doğrultuda olmasını gerektirir. Ancak, su jetine giren bu parçacıklar aksel doğrultuda olmayıp, yatay ve düşey yönde bileşenlere sahiptir. Aşındırıcı parçacık, odaklama tüpüne α açısı ile girdiğinde, parçacığa ait hız bileşenleri,

$$V_{ax} = V_{ay} \cdot \sin \alpha \quad (3.57)$$

(3.57) ile ifade edilebilir. Alt indis olarak belirtilen a_x ve a_y ; odaklama tüpü eksenine paralel ve dik hız bileşenleridir. Sıfır dereceden büyük her açı değerinde, aşındırıcı parçacık başka bir parçacığa veya odaklama tüpünün duvarına çarpar. Sistemdeki toplam momentum korunacağından, aşındırıcı su jetinin odaklama tüpü girişindeki momentum değeri ile çıkışındaki momentum değerleri birbirine eşit olur. Ancak, bu çarpışmaların tümü elastik olmadığı için, her çarpışmada belirli miktarda bir enerji kaybolmaktadır. Bu nedenle odaklama tüpü çıkışındaki kinetik enerji değeri, odaklama tüpü girişindeki kinetik enerji değerinden daha küçüktür (Raissi, et al., 1996; Himmelreich, 1992).

3.2. Aşındırıcı Su Jeti Sisteminde Kesme Parametreleri

ASJ belirli bir noktada ne kadar uzun süre kalırsa, kesme derinliği de o kadar fazla olur. Bunun sebebi, malzemeyi aşındıran hareketli aşındırıcı parçacıkların, aşındırmayı gerçekleştirmek için çok daha fazla zamana sahip olmasıdır. Bu etki, iki sebepten dolayı çok önemlidir. Birincisi; aşındırıcı su jetinin kesme yüzeyinde kalma süresi uzadıkça, malzemeye çarpan parçacık sayısı artacak ve aşınmanın başlamasına sebep olan mikro hasar da büyüyecektir. İkincisi ise, jetten çıkan ve mikro çatlaklara giren suyun oluşturduğu hidrodinamik basınçla çatlakların büyümesidir. Mikro çatlaklar büyüyüp birleştiklerinde, içerisinde buldukları malzeme gevşeyerek, ana malzemedan ayrılacak ve böylece kesme derinliği de artacaktır. Buradan hareketle, aşındırıcı su jeti

başlığının ilerleme hızı ile kesme derinliği arasında ters bir ilişki olduğu söylenebilir. Malzemelerin kesilebilmesi için, ilerleme hızı ile kesme derinliği arasındaki ilişki,

$$h(v) = C_7 \cdot v^{C_8} \quad (3.58)$$

(3.58) ile ifade edilir. Burada C_8 üssü negatif olup, genellikle 0,4~1,0 arasında bir değer alır. (3.58) nolu denklem düzenlendiğinde, (3.59) nolu ifadeye ulaşılır (Blickwedel and Guo, 1990).

$$h(v) = C_7 \cdot v^{-\left(0,86 + \frac{2,09}{v}\right)} \quad (3.59)$$

Eşik hızı, kesme derinliğinin sıfır olduğu andaki ilerleme hızıdır. Ancak, eğriler her iki eksene de asimtotik yaklaştığı için, bağıntıda ifade edildiği gibi ters bir ilişkiden söz edilemez. Eşik hızını da dikkate alarak elde edilen ifade (3.60), aşağıda verilmiştir.

$$h(v) = h_{\max} \cdot \left[-\left(\frac{\ln v}{\ln v_{cr}} \right) + 1 \right] \quad (3.60)$$

İlerleme hızı “1” olduğunda, kesme derinliği h_{\max} ’ a eşit olmakta; hız sıfıra yaklaşınca, kesme derinliği büyümektedir. Aşındırıcı su jetinin etkisiyle, malzemedan bir parçanın ayrılması için geçen t süresine (3.61), sabit bir ilerleme hızında ulaşılır. Bu süre, (3.61) nolu denklem yardımıyla hesaplanabilir.

$$t = \frac{x}{v} \quad (3.61)$$

Değişken ilerleme hızları için tepki süresi (t) ise, (3.62) nolu denklemde verildiği

$$t = \int_0^x \frac{dx}{v(x)} \quad (3.62)$$

gibidir. Bu ifade, genellikle iki fazlı malzemede yani kesme parametrelerinin malzemedan malzemeye değişiklik gösterdiği durumlarda kullanılır. Kesme işlemi sırasında, kesme derinliğinin yanı sıra malzemenin hangi oranda kesildiği de önemlidir.

Aşındırılan malzeme miktarı, kesme derinliğine ve kesme uzunluğuna bağlıdır. Çok düşük ilerleme hızlarında eğim çok büyük iken, yaklaşık 1 mm/s' lik bir ilerleme hızı için, eğim değeri belirgin bir şekilde azalmaktadır. Eğimdeki bu değişim, jetin ilerleme hızının artmasıyla, malzemeye çarpan aşındırıcı parçacıkların sönümlenme etkisinden kaynaklanır. Aşındırıcı parçacıkların malzemeye çarpmasıyla, su fazının da etkisiyle kesme yüzeyinin altında, aşındırıcı parçacıkların içinden geçebileceği bir tabaka oluşur. Bu etki, momentum ve enerji kaybına neden olacağından kesme derinliğinin ilerlemesini de yavaşlatır. Bu nedenle, düşük ilerleme hızlarında birim alana düşen çarpışma sayısının artmasıyla, sönümlenen her bir aşındırıcı parçacığın bir diğer parçacıkla desteklenmesi mümkün olacaktır. Bununla beraber daha yüksek ilerleme hızlarında, birim alana düşen çarpışma sayısı azalacağından, (3.63) nolu eşitlik

$$A_h(v) = C_9 \cdot v^{C_{10}} \cdot e^{C_{11} \cdot v} \quad (3.63)$$

şeklinde yazılabilir. C_{10} ve C_{11} , sıfır olduğu zaman, kesme miktarı sabit olacaktır. $0 < C_{10} < 1$ olduğunda elde edilen bağıntı, düşük ilerleme hızlarındaki kesme oranını tanımlar. C_{10} ve C_{11} sıfırdan farklı ise optimum ilerleme hızı, (3.64) nolu bağıntı çözülerek hesaplanır (Momber et al., 1997)

$$\frac{dA_h}{dv} = 0 \quad (3.64)$$

(3.64) nolu bağıntının türevi alındığında,

$$C_9 \cdot e^{C_{11} \cdot v} \cdot v^{C_{10}-1} \cdot (C_{10} + C_{11} \cdot v) = 0 \quad (3.65)$$

(3.65) elde edilir. Bu eşitlik sıfıra eşit değilse, (3.66) nolu ifade elde edilir.

$$v_{\text{Opt}} = \frac{-C_{10}}{C_{11}} \quad (3.66)$$

Düşük tepki sürelerindeki eğim, yani tepki süresi ile kesme derinliği arasındaki fark yüksektir. Jetin giriş bölgesini geçtikten sonra, ilerleyen t sürelerinde bu eğim azalır. Bunun sebebi ise, tepki süresinin küçük değerleri için büyük ilerleme hızlarında, sönümlenme etkisinin minimum olmasıdır. Tepki süresinin büyük değerleri için sönümlenme etkisi, daha da belirginleşir. Tepki süresinin optimum değeri bilindiğinde optimum ilerleme hızı, (3.67) nolu bağıntıdan hesaplanır.

$$v_{\text{Opt}} = \frac{L_h}{t_{\text{opt}}} \quad (3.67)$$

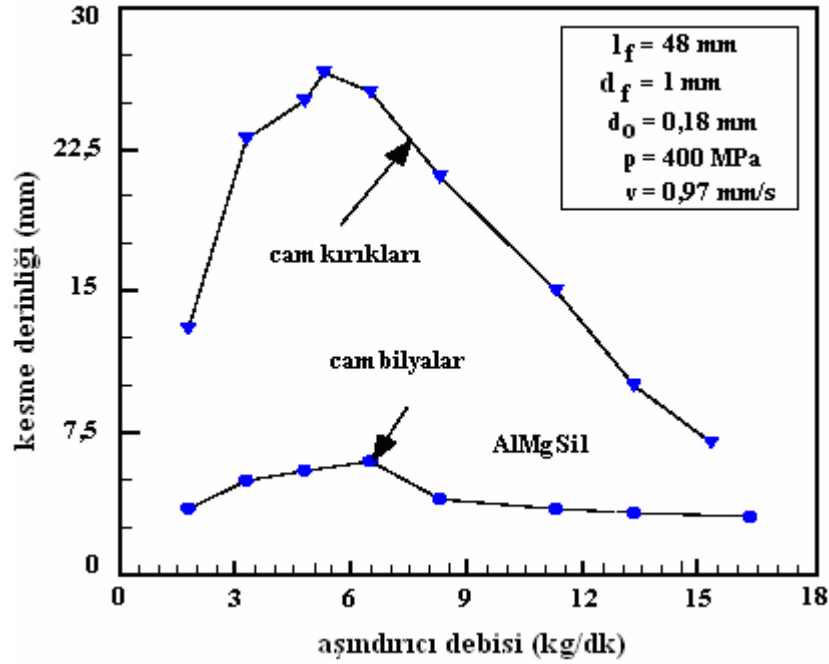
Bu ilerleme hızında istenilen derinliğe ulaşmak için, paso sayısı artırılmalıdır. Optimum paso sayısı (3.68) nolu ifadeyle,

$$N_{\text{opt}} = \frac{t}{t_{\text{opt}}} = \frac{v_{\text{opt}}}{v} \quad (3.68)$$

şekliyle tanımlanır. İdeal olarak, her bir pasonun kesme derinliği sabit olmalıdır. Ancak bu, gerçekte mümkün değildir (Hashish, 1986).

➤ **Aşındırıcı kütleli debisi**

Aşındırıcı parçacık ile malzeme arasındaki çarpışma, aşındırıcı su jetinin malzemeyi kesme kapasitesini belirler. Kesme, kümülatif bir işlem olduğu için, hem aşındırıcı parçacık hızı hem de parçacıkların birbirleriyle çarpışma frekansı önemlidir. Parçacık hızı, malzeme üzerindeki momentum yüklem miktarını ve parçacıktan malzemeye aktarılan potansiyel enerjiyi belirler. Şekil 3.4' de gösterildiği gibi, aşındırıcı parçacıkların kütleli debisi, kısmen çarpışan parçacıkların frekansını kısmen de parçacıkların çarpışma hızını tayin eder. Bununla beraber, aşındırıcının kütleli debisi arttıkça, su jetinin sahip olduğu kinetik enerjiyi paylaşan aşındırıcı parçacık sayısı da artar.

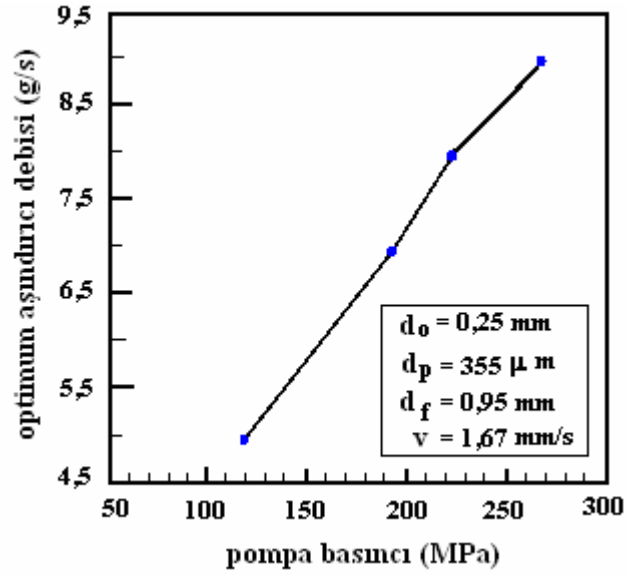


Şekil 3.4. Kesme Derinliği ve Aşındırıcı Şekli Arasındaki İlişki (Oweinah, 1989)

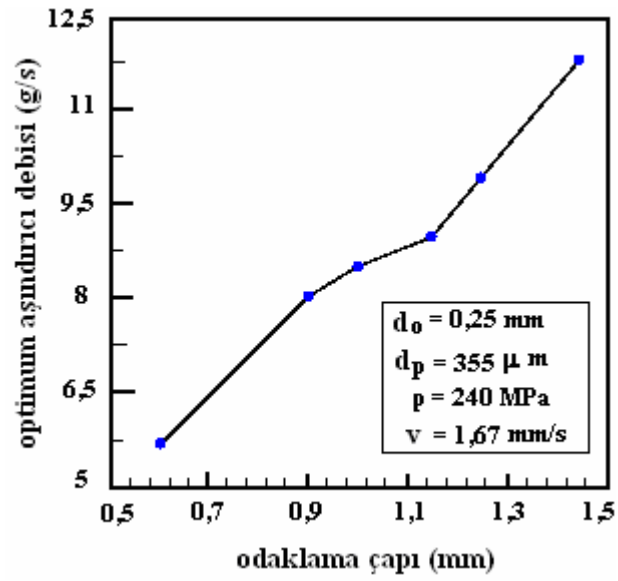
Bu değişim, aşındırıcı debisine karşılık gelen kesme parametreleri yardımıyla, şekil 3.5'de gösterilmiştir. Kütleli debi ifadesini içeren parçacık hızı, (3.69) nolu denklemde ifade edilmiştir.

$$v_p(\dot{m}_a) = \eta_T(\dot{m}_a) \cdot \frac{v_0}{1 + \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_w}} \quad (3.69)$$

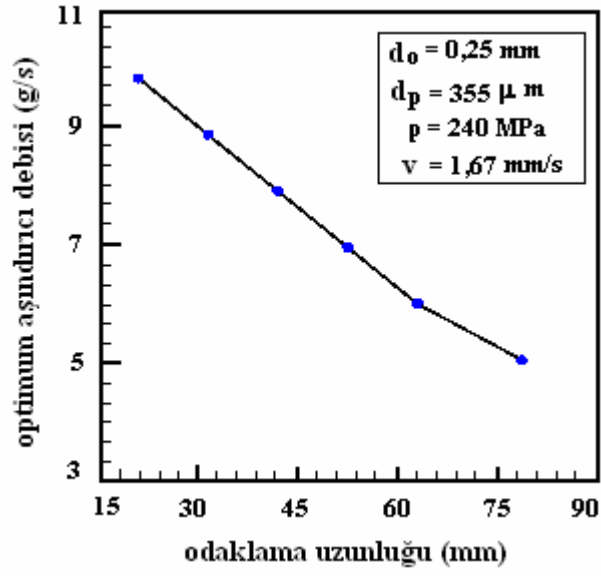
Daha yüksek debilerde, aşındırıcı parçacık yoğunluğu da arttığı için, parçacık-parçacık çarpışma ihtimali daha yüksek olacağından, malzemeye çarpacak parçacık sayısı artarken, parçacık hızı ile parçacıkların çoğunun sahip olacağı kinetik enerji ve momentum değeri düşer.



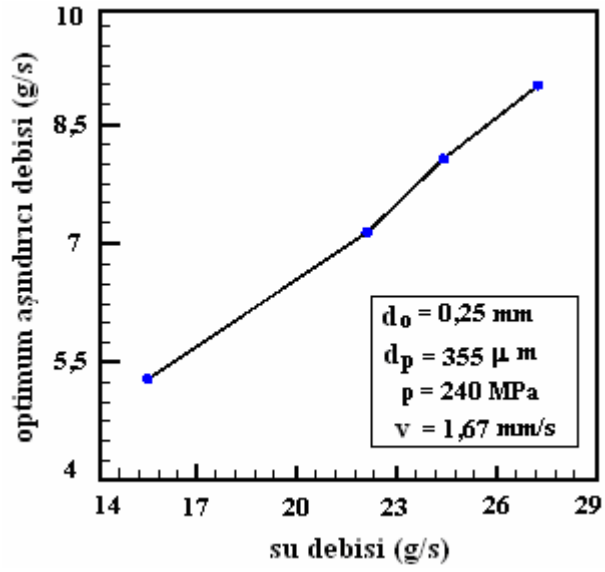
a) Pompa basıncı – aşındırıcı debisi



b) Odaklama çapı – aşındırıcı debisi



c) Odaklama uzunluğu – aşındırıcı debisi



d) Su debisi – aşındırıcı debisi

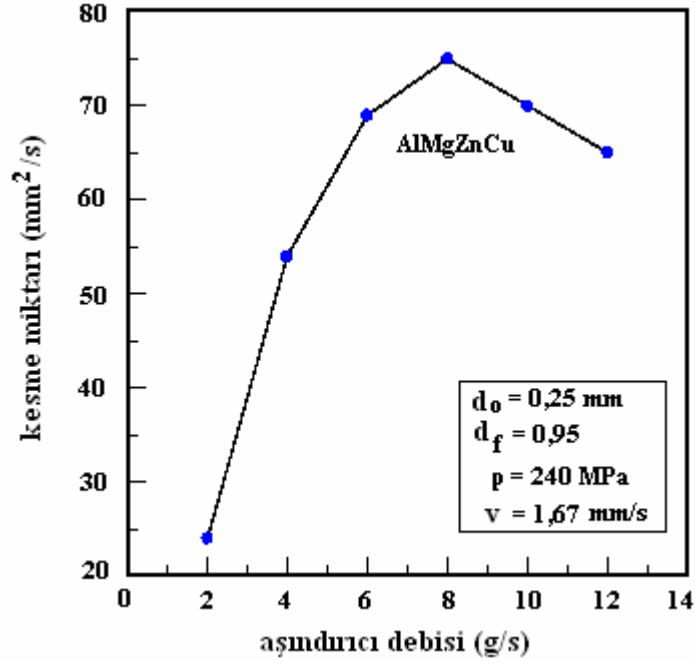
Şekil 3.5. Aşındırıcı Kütleli Debisini Etkileyen Değişkenler (Guo, 1994)

➤ **Su-Aşındırıcı-Hava Karışım Parametreleri**

Aşındırıcı su jetinde; üç fazın karışımını etkileyen iki değişken, odaklama çapı ve odaklama uzunluğudur. Odaklama tüpü, aşındırıcı parçacıkları jet hızına ivmelendirmek için gereken odaklama uzunluğunu sağlar. Bununla beraber, aşındırıcı ile yüklü su jeti; odaklama tüpüne eklenen havayı ortamdaki uzaklaştırarak karışım yoğunluğunu düşüreceğinden, belirli odaklama çapları için aşındırılan maksimum hacim oranı veya hacimde bir artış gözlenir. Odaklama çapı arttığında, hava emme kapasitesi de artan jetin yoğunluğu ve hızı azalacaktır. Odaklama çapının optimum değeri, orifis çapının yaklaşık 3~4 katı kadardır. Odaklama tüpü uzunluğu arttıkça, başlangıçta kesme derinliği de artmakta, odaklama uzunluğu maksimum değere ulaştıktan sonra kesme derinliği düşmektedir. Aşındırıcı su jeti üzerinde oluşan bu iki ters etki, odaklama tüpünün iki özelliği ile açıklanır. Birincisi, odaklama tüpünün aşındırıcı parçacıkları, maksimum hıza ulaşacak şekilde ivmelendirmek için, jetin ihtiyaç duyduğu odaklama uzunluğunu sağlaması, ikincisi ise odaklama tüpünün jeti yavaşlatan bir sürtünme kaynağı olmasıdır. Başlangıçta odaklama uzunluğunun artmasıyla, odaklama tüpünün sahip olduğu ivmenin, jet hızında çok etkili olduğu düşünülür. Fakat odaklama tüpü uzunluğunun sınır değerinden sonra, mümkün olan maksimum hıza ulaşan aşındırıcı parçacıklar, tüp ile jet arasında sürtünme oluşturacağı için, jet hızı düşer. Yapılan araştırmalar, optimum odaklama tüpü uzunluğunun, odaklama tüpü çapının 25~50 katı arasında olduğunu göstermiştir (Laurinat et al., 1992).

➤ **Kesme miktarı**

Daha yüksek debilerde, çarpışan parçacıklar ve iş parçası arasında oluşan su-katı filmi, parçacık-iş parçası arasındaki çarpışmaları sönmeyeceğinden, suyun kinetik enerjisi, daha yüksek debilerde daha fazla sayıda parçacık üzerine yayılabilir. Şekil 3.6' da görüldüğü gibi aşındırıcı debisi arttığında, parçacık hızı ve sistem verimi düşmektedir. Aşındırıcı debisi; pompa basıncı, odaklama çapı, odaklama tüpü uzunluğu ve su debisi gibi birçok değişkene bağlıdır. ASJ ile kesme işlemlerinde aşındırıcı debisinin, özgül kesme oranı ile kesme oranı üzerindeki etkisi de çok önemlidir.



Şekil 3.6. Aşındırıcı Kütleli Debiyle Kesme Oranı Arasındaki İlişki
(Guo et al., 1994)

➤ Aşındırıcı parçacık çapı

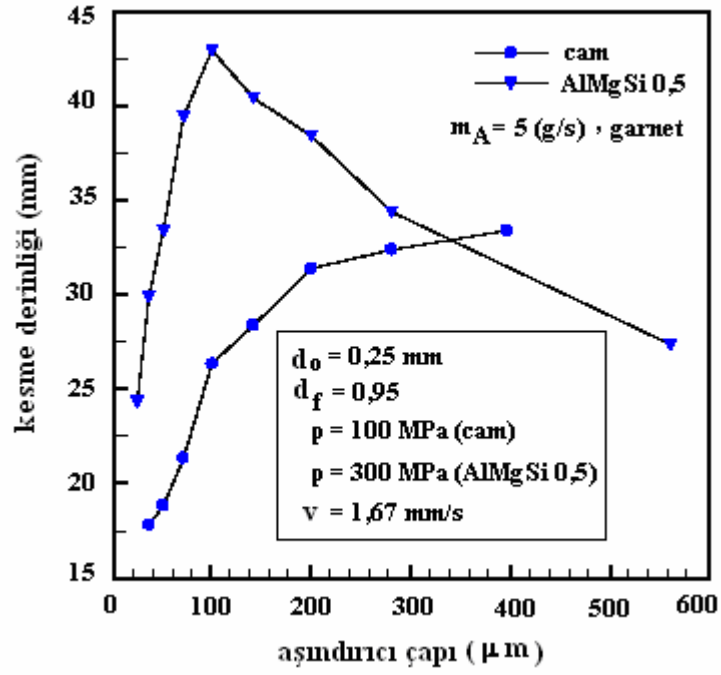
Başlangıçta artan parçacık çapı ile kesme derinliği de artar. Ancak optimum çapa ulaşıldıktan sonra, kesme derinliği düşmeye başlar. Aşındırıcı kütleli debisi dikkate alındığında, kütleli debi için verilen uç değerler dışında şekil 3.7' de gösterildiği üzere, parçacık çapının büyümesiyle kesme derinliği de artmaktadır.

➤ Standof mesafesi

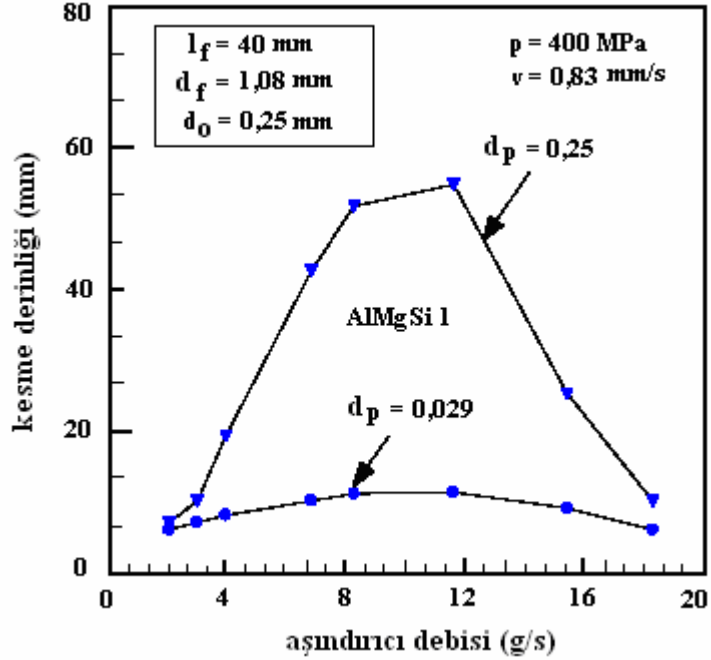
Aşındırıcı su jeti nozulunun standof mesafesiyle kesme derinliği arasındaki ilişki, su jetiyle yapılan işlemler için çok önemlidir. Kesme derinliğine $h(x)$ ilişkin denklem,

$$h(x) = C_{12} \cdot x^{C_{13}} \quad (3.70)$$

şeklinde yazılır.



a) Malzeme tipi (Ohlsen, 1997)



b) Aşındırıcı debisi (Oweniah, 1989)

Şekil 3.7. Aşındırıcı Çapı – Debisi ve Kesme Derinliği Arasındaki İlişki
(Guo et al., 1994)

(3.70)' deki, standof mesafesine ait sınır değerler, $h(x)$ için verilen değerden daha büyüktür. Standof mesafesini belirleyen bu sınır değerler sıfıra yaklaştığında, söz konusu $h(x)$ değeri, sonsuz olmayacak şekilde seçilmelidir. Araştırmacılar yapmış oldukları gözlemlere dayanarak standof mesafesinin çok küçük değerlerinde, kesme derinliğinin de kesinlikle düştüğünü ve optimum standof mesafesinin yaklaşık 2 mm olduğunu tespit etmişlerdir (Ohlsson, 1995).

3.2.1 Kesme işleminde jet dağılım karakteristikleri

Görüleceği üzere, (3.69) nolu bağıntıdaki (v_0) jet hızına ait en değeri, nozuldan itibaren (X) standof mesafesinin birer fonksiyonu şeklindedir. Jet dağılımında ve hızdaki azalmanın havadaki etkisi, kesmenin olduğu bölgeye ve malzeme karakteristiklerine bağlıdır. Eksenel ve radyal basınçta azalma karakteristikleri (3.71-3.74) nolu bağıntılarda özetlenmiştir (Hashish et al., 1979). Eksenel, radyal ve dinamik basınç dağılımları aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

Eksenel	Giriş bölgesi	$P_m = P_1$	$X < X_c$	(3.71)
---------	---------------	-------------	-----------	--------

Eksenel	Ana bölge	$P_m/P_1 = X_c/X$	$X > X_c$	(3.72)
---------	-----------	-------------------	-----------	--------

Radyal	Giriş bölgesi	$P/P_m = (1 - \xi_c^{3/2})^2$	$\xi_c = Y - Y_c/b_c$	(3.73)
--------	---------------	-------------------------------	-----------------------	--------

Radyal	Ana bölge	$P/P_m = (1 - \xi_c^{3/2})^2$	$\xi = Y/b_m$	(3.74)
--------	-----------	-------------------------------	---------------	--------

Malzeme üzerinde eşdeğer hidrodinamik jet kuvveti yaratan, ana bölgedeki ortalama dinamik basınç değeri (3.72) ve (3.75) nolu bağıntılar yardımıyla hesaplanabilir.

$$P_{ort} = 0,257 \cdot P_1 \cdot \left(\frac{X_c}{X} \right) \quad (3.75)$$

Başlangıç bölgesindeki jet hareketi doğrusaldır. Ana bölgede jet eni, nozul çıkışından olan mesafenin karekökü ile doğru orantılıdır (Franz, 1972; Liu, 2004). Böylece ana bölgedeki jet eni, (3.76) nolu bağıntı yardımıyla hesaplanır.

$$w = 0,335 \sqrt{d_n X} \quad (3.76)$$

(3.76) nolu bağıntının düzenlenmesiyle, (3.77) boyutsuz denklemi elde edilmiştir.

$$\frac{w}{d_n \sqrt{R}} = 0,335 \sqrt{\frac{X}{X_c}} \quad (3.77)$$

$R = X_c/d_n$ olmak üzere giriş bölgesindeki jet uzunluğu, nozul şekline ve basınca bağlıdır. R için önerilen değerler, 30–100, 100–140 ve 0–110 arasında değişir (Yanaida, 1974; Shtuckaturov and Kuklin, 1962; Shavlovsky, 1972). Jetin ana bölgesinde, $\sigma_c < \rho V^2 = 2P$ bağıntısını sağlamak şartıyla, etkin jet çapı ve dinamik basınç için, (3.77) ve (3.78)' de verilen denklemler oluşturulmuştur.

$$\frac{w_e}{d_n \sqrt{R}} = 0,335 \sqrt{\frac{X}{X_c}} \left[1 - \sqrt{\frac{\sigma_c}{2P_1} \frac{X}{X_c}} \right]^{2/3} \quad (3.78)$$

(3.77) ve (3.78) nolu denklemlerde yer alan ifadeler sırasıyla, genişlik sayısı ($w_e/d_n \sqrt{R}$), basma mukavemeti sayısı ($\sigma_c/2P_1$) ve standof mesafesi sayısı (X/X_c) olarak tanımlanırlar. Burada üst limit $\sigma_c/P_1 = 0,5$ olarak alınabilir. (3.78) nolu ifadeye görüleceği gibi, kesme derinliği $d_n \propto z$ olduğundan $w_e \propto z$ olur. X/X_c oranı artarken w_e değeri de artmaktadır. Buna karşılık, dinamik basınç azalacağı için kesme miktarı (z), daha etkili olan parametreye bağlı olarak azalmakta veya artış göstermektedir. (3.78) nolu bağıntıda yer alan, nozul çıkışındaki parçacık enine bağlı olarak değişen genişlik sayısı sıfır olduğunda, standof mesafesinin sınır değeri, (3.79) nolu bağıntı yardımıyla hesaplanabilir.

$$X_{\text{limit}} = \frac{2P_1}{\sigma_c} X_c \text{ ve } X_{\text{limit}} = 2R \frac{P_1}{\sigma_c} \quad (3.79)$$

Bu mesafede $\sigma_c/2P_m = 1$ olduğu için, basma mukavemeti jetin malzeme üzerindeki hidrodinamik gerilmeye eşit olmakta ve kesme oluşmamaktadır. $X > X_{\text{lim}}$ olan mesafelerde jet, malzemede tekrarlanan su damlacıkları çarpımından dolayı plastik deformasyona veya yorulmaya maruz kalmaktadır. Jetin efektif eninin hesaplanmasında, ortalama basınç değeri bir sonraki kesit için kullanılabilir. Ana bölge için efektif jet eni, (3.74) ve (3.78) nolu bağıntılar kullanılarak tayin edilebilir. Sonuç olarak elde edilen plastik deformasyon katsayısı,

$$\psi = \left(1 - \sqrt{\frac{\sigma_c}{2P_1} \frac{X}{X_c}} \right) \quad (3.80)$$

şeklinde yazılır. Böylece su jeti basıncı, (3.81) nolu denklem yardımıyla hesaplanır (Yanaida, 1974; Shtuckaturov and Kuklin, 1962; Shavlovsky, 1972)

$$P_w = 2P_1 \cdot \frac{X_c}{X} \cdot (0,5 - 0,57\psi + 0,2\psi^2) \quad (3.81)$$

3.2.1.1. Kesme derinliği üzerinde standof mesafesinin etkisi

Maksimum kesme derinliği için en uygun standof mesafesi değeri incelendiğinde, aşağıda verilen şartları sağlamak şartıyla (3.82) nolu kesme bağıntısı da kullanılabilir.

$$\phi = 2 \left(\frac{X_c}{X} \right) [0,5 - 0,57\psi + 0,2\psi^2] = 2 \left(\frac{X_c}{X} \right) \cdot C_{do}^2 \cdot [0,5 - 0,57\psi + 0,2\psi^2] \quad (3.82)$$

Böylece aranılan boyutsuz ifade ise, (3.83) şeklinde olacaktır.

$$\frac{z C_f}{d_n \sqrt{R}} = 0,297 \sqrt{\frac{X}{X_c}} \psi^{2/3} \left[1 - \frac{\sigma_y}{2P_1 \phi} \right] \left[1 - e^{(-2,256 C_f P / \eta u \phi)} \right] \quad (3.83)$$

(3.83) nolu bağıntıda P_1 yerine P_0 kullanıldığında, beş farklı boyutsuz grup ortaya çıkar. Bunlar sırasıyla,

- a) Boyutsuz standof mesafesi, $X_N = X/X_c$
- b) Uzama mukavemeti sayısı, $sY = \sigma_y/P_1$
- c) Basma mukavemet sayısı $SC = \sigma_c/P_1$
- d) $C_f P_1/\eta u$ sürtünme katsayısı, $\rho V_1/\eta$, damperleme sayısıyla hız katsayısını V_1/u birleştirmektedir (Hashish, et. al.,1978).
- e) $z C_f/d_n \sqrt{R}$ sayısı; kesme derinliği sayısını $[(z/d_n) \cdot C_f]$, jet geometri sayısı (\sqrt{R}) ile birleştirmektedir. Yukarıda ifade edilen boyutsuz beş grup, sadece iki durum için dört gruba indirgenebilir. Söz konusu durumlar sırasıyla;

a) $\sigma_y/\sigma_c = r_s$ sabit olan bir malzeme için, iki mukavemet katsayısı sabit katsayı r_s ile ilişkilendirilir. Sürtünme katsayısı, her malzeme için sabit bir değer olduğundan düşmüştür.

b) Yumuşak malzemeler, yani $SC \leq 0,04$ ve $X_N \leq 6$ için, basitleştirilmiş ifadeler, (3.78) nolu bağıntıya uygulanabilir. (3.76) nolu denklemde verilen eşitlikte $w = w_e$ kabul edilerek, (3.81) bağıntısından elde edilen P_w değeri, (3.78) nolu denklemde yerine yazıldığında ulaşılan sonuç ifade,

$$\frac{z C_f}{d_n \sqrt{R}} = 0,97 \sqrt{\frac{X}{X_c}} \left[1 - 1,945 \frac{\sigma_y X}{P_1 X_c} \right] \left[1 - e^{-0,58 (C_f P/\eta u)(X_c/X)} \right] \quad (3.84)$$

şeklindedir. Böylece X_N , sY , $C_f P_1/\eta u$ ve $z C_f/d_n \sqrt{R}$ olmak üzere, dört boyutsuz bağıntı grubu oluşur. Boyutsuz sayıların değer aralıkları ağaç, kömür, beton, plastikler ve kayalar için tipik kesme verilerine uygulanabilir. $C_f P_1/\eta u$ 'ya ait değerler çok geniş aralıkta değişmektedir. Bir başka deyişle, maksimum ile minimum değer arasındaki fark çok büyüktür. $X/X_c = 1-10$, $\sigma_y/P_1 = 0,01-0,1$ ve $r_s = 2,5-8$ arasında değer alabilir. Bu parametrelere ilişkin uygun tanımlar sırasıyla şöyle özetlenebilir;

a) En uygun standof mesafesi genelde, $2 \leq X/X_c \leq 5$ arasında değişir.
 b) $C_f P_1/\eta u = 2$, en uygun standof mesafesinin olduğu alt kritik değerdir. Bir başka deyişle, bu değer altında oluşan standof mesafelerinde kesme işlemi gerçekleşmez. Bu değerde kesme derinliği, nozuldan olan mesafe azaldıkça artmaktadır. En uygun standof mesafesi $C_f P_1/\eta u > 2$ için oluşmakta ve tam olarak yeri ise $C_f P_1/\eta u$, sY ve r_s ' nin özgül değerleriyle belirlenebilir. c) $C_f P_1/\eta u = 10$, oldukça yüksek kritik değerdir. $C_f P_1/\eta u > 10$ için kesme derinliği sadece mukavemet sayılarının birer fonksiyonudur ve $C_f P_1/\eta u$ değerinden bağımsızdır. Bu şartlarda ilerleme miktarının düşürülmesi, kesme derinliğinde belirgin artış sağlayacaktır. (3.84) nolu bağıntı, farklı standof mesafelerinde kesme derinliğinin belirlenmesi için kullanılmaktadır (Hashish, et al., 1979).

3.2.1.2. Yüksek hızlı ASJ kesme işleminde standof mesafesi ve çoklu paso ilişkileri

Katı maddelerin sürekli su jeti ile işlenmelerine ait teorik ve deneysel çalışmalarla, genel boyutsuz bir kesme bağıntısına ulaşılmıştır. Elde edilen ifade,

$$\frac{z}{d_n} = \frac{1 - \frac{\sigma_y}{\rho V_1^2}}{2 C_f \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\pi}}} \left[1 - e^{-\left(2 C_f / \sqrt{\pi}\right) (\rho V / \eta) (V_1 / u)} \right] \quad (3.85)$$

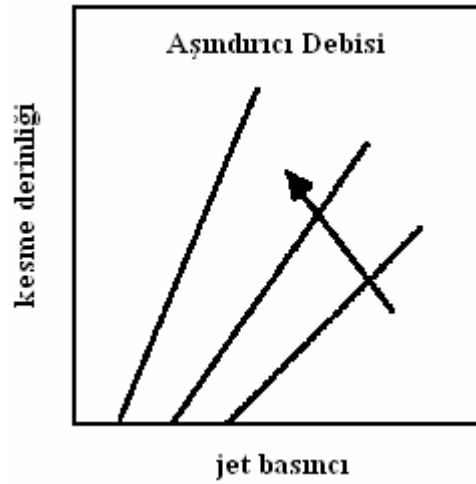
şeklinde dir. (3.85) nolu denklem, kesme yüzeyinin cidarlarında etkili hidrodinamik kuvvetlerin belirlenmesinde, kontrol hacminin analizine uygun olarak çıkartılmıştır. Bingham modeli, katı malzemenin zamana bağlı değişen kuvvetin, yer değiştirme karakteristiklerini tanımlar. İfade sadece yüksek ve düşük kesme hızlarında, sıfır ve maksimum kesme derinliklerine ait sınır şartlarını sağlar (Hashish, et al., 1979).

3.2.2. Aşındırıcı su jetinin performansı ve kesme derinliği parametreleri

Aşındırıcı su jetlerinin kesme kapasiteleri ve çalışma karakteristiklerinin iyileştirilmesi için yapılan deneysel ve teorik araştırmalar büyük önem taşır. İki fazlı bir akışta işlemlerin çözümlerinde, ampirik veya yarı ampirik formüllerden yararlanılmakla birlikte, son yıllarda durum biraz daha iyileştirilmiştir. Araştırmacı Abramovich, integral metodunu (Zeng, 1992) kullanarak jet çekirdeğindeki hızı başarıyla hesaplamıştır. Ayrıca araştırmacılar, yeni ampirik formüller (Franz et al., 1972 and Hashish 1982) öne sürmüşlerdir.

➤ Su basıncının kesme derinliğine etkisi

Jet basıncı ile kesme derinliği arasındaki ilişki, şekil 3.8’ de gösterildiği gibi doğrusaldır (Griffiths, et al.,1983; Hashish, 1983; Nakaya, et al., 1984).

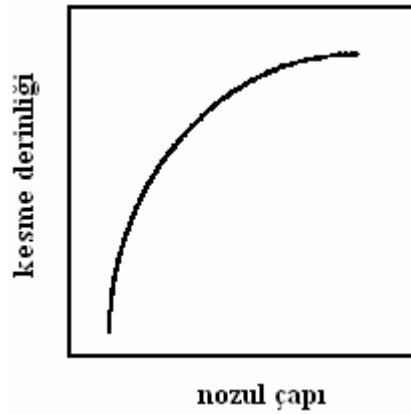


Şekil 3.8. Basıncın Kesme Derinliğine Etkisi (Hashish, 1983)

Yüksek basınçlarda yüksek jet hızlarına ulaşıldığından, elde edilecek kesme derinliği de büyük olur. Ancak, yüksek basınçlarda su jeti nozulundaki verim düşüklüğü, kesme derinliğinin de azalmasına sebep olur.

➤ **Nozul çapının kesme derinliğine etkisi**

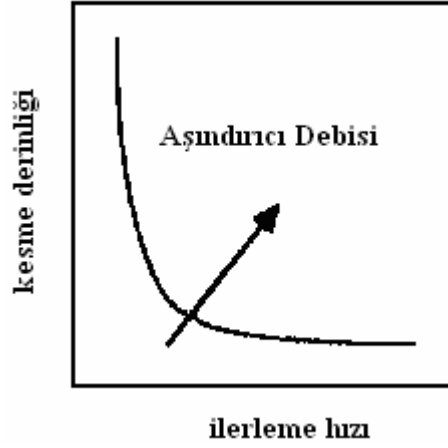
Sabit basınçta aşındırıcı debisi arttığı sürece, karıştırma odasına su aktaran nozul çapının büyümesiyle, Şekil 3.9’ da görüldüğü üzere kesme derinliği de artar. Bu artış, parçacık debisi optimum değere ulaşıncaya kadar devam eder (Hashish, 1983; Iihoshi et al., 1986). Söz konusu değerden sonraki debi artışı, kesme derinliğini etkilemez. Ayrıca, aşındırıcı parçacıkların jet merkezine püskürtülmesi zor olduğu için, büyük çaplı nozullar karıştırma verimini düşürür (Barker and Mazurkiewicz, 1982).



Şekil 3.9. Nozul Çapının Kesme Derinliğine Etkisi (Hashish, 1983)

➤ **İlerleme hızının kesme derinliğine etkisi**

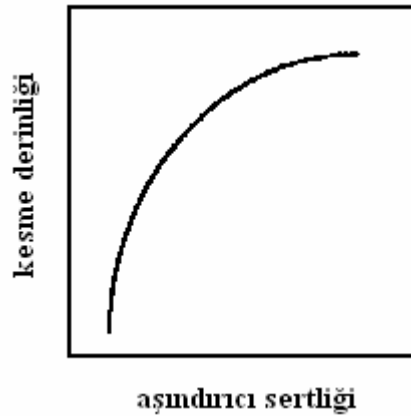
İlerleme hızındaki düşüş, kesme boyunca hiperbolik bir artışa sebep olur (Arasawa, 1986; Baumann, 1986; Hashish, 1983; Yie, 1983). Şekil 3.10’ da görüldüğü üzere, belli bir değer altındaki ilerleme hızında, su jeti malzemeye dalamaz (Hashish, 1983). Yüksek ilerleme hızlarında, aşındırıcı su jeti performansı özellikle metal dışı malzemelerde, sade su jeti performansına yaklaşır. Kesme işleminin yapısından dolayı, ilerlemedeki kararlılık kesme sonuçlarını belirgin bir şekilde etkiler.



Şekil 3.10. İlerleme Hızı – Aşındırıcı Debisinin Kesme Derinliğine Etkisi
(Hashish, 1983)

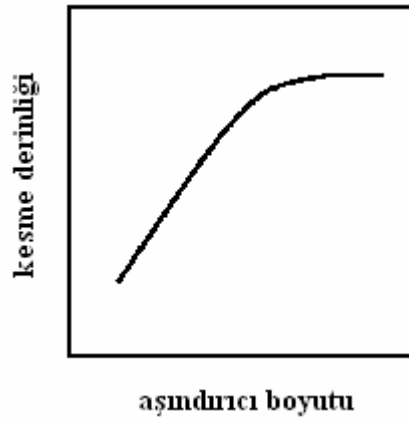
➤ **Aşındırıcı özelliklerinin kesme derinliğine etkisi**

Aşındırıcı seçiminde, sertlik, yoğunluk, şekil ve parçacık boyutu önemlidir. ASJ sisteminde kullanılan tipik aşındırıcılar; çelik bilyalar, kuvarz kumu, bakır cürufu, silikon karbür, alüminyum oksit, garnet, zımpara malzemesi ve sert malzemelerle, kayaların kesiminde kullanılan özel garnet taşı şeklinde özetlenebilir. En çok kullanılan aşındırıcılar; normal sertlikte ve düşük maliyetli olan garnet ile kuvarz kumudur.



a) Aşındırıcı sertliğinin kesme derinliğine etkisi

Hashish' e göre, parçacıklarla malzeme arasındaki mutlak sertlik değeri artırıldığında, kesme derinliği de belli bir değere kadar artar (Hashish, 1983). Şekil 3.11a' dan da görüleceği üzere, ulaşılan bu değerden sonraki artışlar, kesme derinliği üzerinde etkili değildir. Sertlikteki değişim malzeme yoğunluğu ile ilişkili olduğu için, güvenli sonuç elde etmede her iki özellik birlikte değerlendirilmelidir.



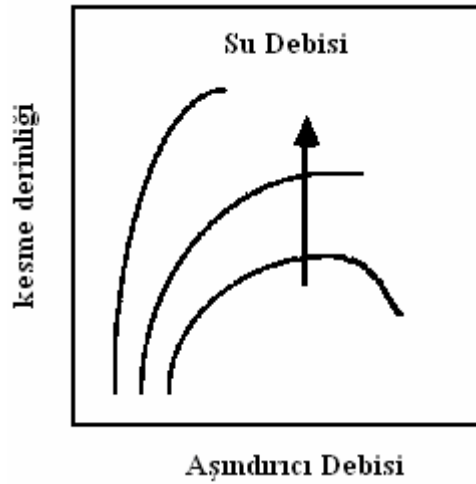
b) Aşındırıcı boyutunun kesme derinliğine etkisi

Şekil 3.11. Kesme Derinliğinde Etkili Aşındırıcı Parçacık Özellikleri (Hashish, 1983)

Keskin köşeli parçacıklar, temas noktalarında daha büyük gerilme yoğunluğuna neden olurlar. Bu nedenle, Şekil 3.11b' de olduğu gibi yuvarlak parçacığın kesme üzerindeki etkisi daha düşüktür (Hashish, 1983; Kim, 1985; Yie, 1983). Parçacık kenarları mikro mekanizmalarda olduğu üzere, malzeme aşınmasını artırır. Baumann' a göre öğütülerek elde edilen keskin köşeli aşındırıcılar, düşük kesme kabiliyetine sahiptirler (Baumann, 1986). Silika kumu gibi ucuz aşındırıcıların malzemeye dalma (nüfuz etme) miktarları, yüksek maliyetli aşındırıcılara göre daha düşüktür. Ancak kesme derinliği, maliyetle doğru orantılı değildir (Griffiths, et al.,1983). Belirlenen bir malzeme ve malzeme gruplarında, kesme derinliğini artırmak için optimum aşındırıcı parçacık boyutuna ihtiyaç vardır (Griffiths, et al.,1983; Hashish, 1983). Elde edilen tüm bu sonuçlarla birlikte kesme derinliği, karıştırma odasının verimi ve aşındırıcı boyutu gibi diğer parametrelere de bağlıdır.

➤ **Aşındırıcı debisinin kesme derinliğine etkisi**

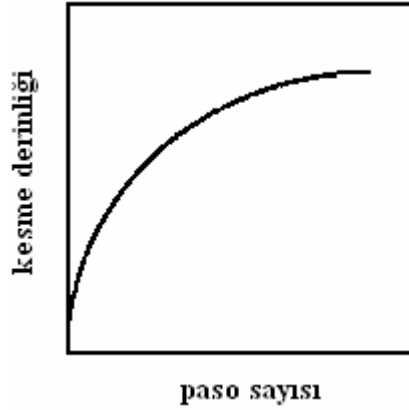
Şekil 3.12’ den de görüleceği gibi, jetteki aşındırıcı yüzdesi artırıldığında, kesme derinliği de artmaktadır (Hashish, 1982, 1983; Yie, 1983). Aşındırıcı debisi optimum değerde iken, parçacıkları püskürten su gücü, kesme için yeterli olmadığı için jet hızı düşer. Bir başka deyişle, yüksek debilerde karıştırma odasında gerçekleşen parçacık çarpışmalarının sayısı artar. Bu durumda, aşındırıcıların parçalanması kaçınılmazdır (Nakaya, et al., 1984).



Şekil 3.12. Aşındırıcı – Su Debisinin Kesme Derinliğine Etkisi (Hashish, 1983)

➤ **Paso sayısının kesme derinliğine etkisi**

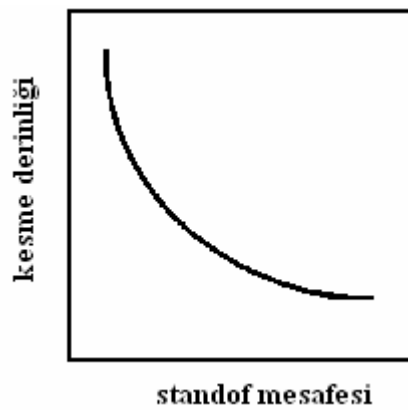
Paso sayısındaki artış, belli bir standof mesafesine kadar kesme derinliğini artırmaktadır (Barton and Saunders, 1982). Yüksek ilerleme hızlarında, ilk birkaç pasoda kesme derinliği sabit iken, düşük ilerleme hızlarında ise Şekil 3.13’ de gösterildiği üzere, her bir paso için ulaşılabilecek kesme derinliği düşer. Jet iyi odaklanmamışsa, bir önceki pasoda ulaşılan kesme derinliği jetin odaklanmasını sağlar. Böylece ulaşılan kesme derinliği belli bir süre artar (Hashish, 1982, 1983). Düşük özgül enerjide, belirli bir kesme derinliğine ulaşmak ve en kısa kesme süresini belirlemek için paso sayısı, ilerleme hızına göre ayarlanır.



Şekil 3.13. Paso Sayısının Kesme Derinliğine Etkisi (Hashish, 1983)

➤ **Standof mesafesinin kesme derinliğine etkisi**

Nozul ve malzeme yüzeyi arasındaki standof mesafesinin artışıyla kesme derinliği düşer (Hashish 1982, 1983). Jetin odaklanması sağlandığında aşındırıcı jet, standof mesafesindeki değişime karşı çok daha duyarlı hale gelir. Genelde, yapışık nozulla malzeme arasındaki standof mesafesi 3~6 mm' dir. Söz konusu şartlar altında, su ivmelendirme nozuluyla malzeme arasındaki mesafe 5,1 mm' yi aşar (Yie, 1983).

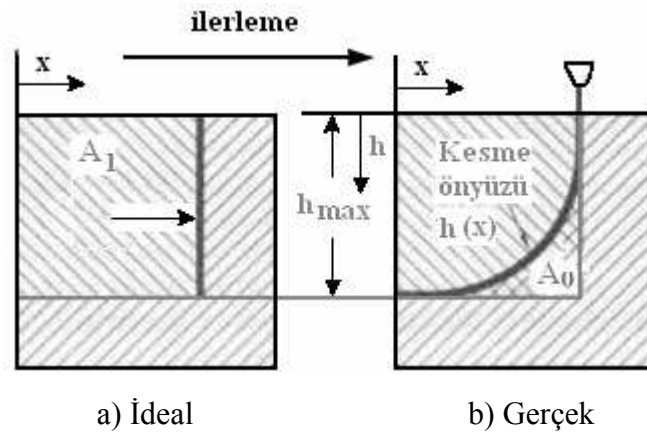


Şekil 3.14. Standof Mesafesinin Kesme Derinliğine Etkisi (Hashish, 1983)

3.2.2.1. Aşındırıcı su jetiyle ulaşılan kesme derinliğinin analizi

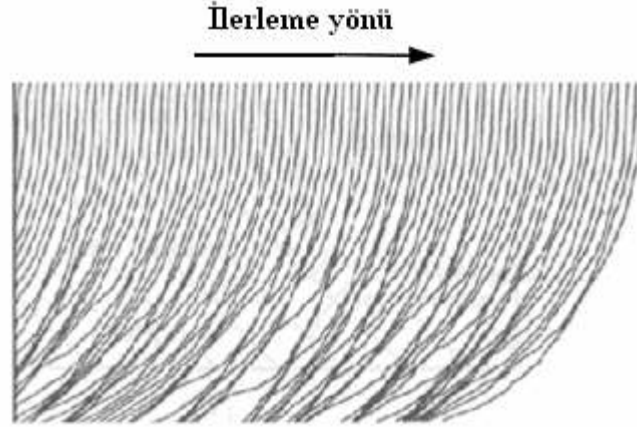
Maksimum kesme derinliğinde aşındırıcı su jetiyle verimli bir kesme işlemi için, ideal kesme profilinin Şekil 3.15' de görüldüğü gibi olması gerekir. Ancak deneysel çalışmalar ve yapılan incelemeler sonucunda, kesme yüzeyinin eğrisel olduğu görülmüştür. Şekil 3.16' dan da görüleceği üzere jetteki bu eğrisel sapmaya, kesilen yüzeyin alt kısmında oluşan çizikler neden olmaktadır. Parabol şeklinde oluşan bu çizikler, Şekil 3.15 b' de gösterilen kesme yüzey profili ile aynı özelliktedir. Jetin izlediği yol, Şekil 3.15 b' de gösterildiği gibi parabol olarak kabul edildiğinde, maksimum kesme derinliğinde kesme işleminin tamamlandığı noktada, jet kesme derinliği minimum değerdedir. Kesme işlemi sonrasında elde edilen parabol, (3.86) nolu denklemle ifade edilir.

$$h(x) = \alpha (x - g)^2 + c \quad (3.86)$$



Şekil 3.15. Aşındırıcı Su Jetiyle Kesmede Maksimum Kesme Derinliğinin (h_{max}), Şematik Gösterimi (Momber, 1995a)

Su jetinin malzemeye giriş noktası orijin olarak kabul edildiğinde, bu parabolün tepe noktasında; $x = -b$ ve $h(x) = -h_{\max}$ değerini alır. $a = h_{\max}/b^2$, $g = -b$ ve $c = h_{\max}$ için, elde edilen bağıntı (3.87) aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.16. Aşındırıcı Su Jetiyle Kesmede Gözlenen Çizikler
(Kovacevic and Yong, 1996).

$$h(x) = \frac{h_{\max}}{b^2} (x + b)^2 - h_{\max} \quad (3.87)$$

Şekil 3.15b' den de görüldüğü gibi, b ve h_{\max} değerlerinin dışında oluşan çiziklerin tanımlandığı noktalar, eğri üzerinden belirlenebilir. b ve h_{\max} değerlerini belirlemek için, maksimum kesme derinliği şartı aranmaz. Kesme önyüzündeki alan (A_0),

$$A_0 = h_{\max} b - \int_{-b}^0 h(x) dx = \frac{1}{3} h_{\max} b \quad (3.88)$$

şeklinde tanımlanır. $h(x)$ değeri, maksimum kesme derinliği (h_{\max}) değerinden daha küçük ise, (3.88) nolu bağıntı kullanılır. Buna göre, ideal ve gerçek kesme arasındaki alan farkı $A(h)$ değeri, (3.89) yardımıyla hesaplanır. Bağıntının çözümü için x' in hesaplanması gerekir.

$$A(h) = h(x)x - \int_x^0 h(x) dx \quad (3.89)$$

$$h = h(x) \quad (3.90)$$

Bunun için, mutlak değer içerisindeki iki kök arasından küçük olan seçilir. $A(h)$ 'nın A_0 ' a bölünmesiyle elde edilen fonksiyonda, $0-h_{\max}$ arasında değişen kesme derinliği, $0-1$ arasında değer alır. Enerji kayıp katsayısı ve parçalanma sayısı (ϕ), (3.91) nolu bağıntıda verilen denklemler yardımıyla hesaplanır.

$$\chi(\phi) = \frac{A(h)}{A_0} \quad , \quad \phi = \frac{h}{h_{\max}} \quad (3.91)$$

İncelenen tüm malzemeler, (3.92)' de verilen ana eğri üzerinde gösterilecek olursa,

$$\chi(\phi) = A_1 \phi^2 + B_1 \phi + C_1 \quad (3.92)$$

(3.92) ifadesine ulaşılır. Kalan enerji; sürtünme, çarpma, su-parçacık-film hareketini yavaşlatma, ısıtma ve parçacıkların koparılması gibi diğer işlemlerde kullanılmaktadır (Momber, 1995b). Kesme derinliğinin h_{\max} 'a yaklaştığı durumlarda, kullanılan faydalı enerji miktarı yani enerji kullanım verimi artacaktır. $\chi(\phi)$ değeri, kesme tabanındaki çiziklerin eğimine göre hesaplanır. (3.87) nolu bağıntının türevi alınarak, kesme derinliğine ilişkin eğim değeri, (3.93) nolu ifade ile elde edilmiştir.

$$\frac{dh(x)}{dx} = \frac{2 h_{\max} (x+b)}{b^2} = m \quad (3.93)$$

(3.93) nolu bağıntının çözümüyle bulunan x değeri, $h(x)$ 'de yerine yazılarak kesme derinliği hesaplanır.

$$\phi = \frac{h(x_m)}{h_{\max}} \quad (3.94)$$

Bağıntıdaki x_m , (3.94) nolu bağıntıda çözülen x değişkeninin koordinatıdır. Elde edilen (3.94) nolu bağıntı yardımıyla, (3.92)'de verilen $\chi(\phi)$ değerini de hesaplamak mümkündür (Momber, 1995b).

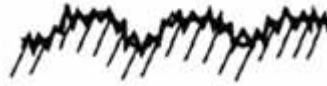
3.2.2.2. Sünek malzemelerde maksimum kesme derinliği

Bilindiği üzere, aşındırıcı su jetinin çok sayıda farklı malzemenin işlenmesi sırasında karşılaşılan sorunların başında, pürüzlü kesilmiş yüzey elde edilmesinin yanı sıra yüzeyde çiziklerin oluşması gelir. Kalın malzemelerin işlenmesinde Şekil 3.17a'da görüldüğü üzere, üst bölgede pürüzsüz yüzey elde edilirken alt bölgede çizikli yüzey elde edilmektedir. Buna ek olarak kalın malzemelerde, Şekil 3.17b'deki gibi alt bölgede değişken yapıda pürüzlülük de oluşabilir. Ancak ince malzemelerin kesiminde benzer sorunlarla karşılaşılmaz.

Yüzey yapısının iyileştirilmesi ve kesme derinliği için çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin başında çok pasolu kesme, (Wang, 2000) kesme yüzeyine doğru jet açısının değiştirilmesi, (Wang, 1999) ve nozul titreşim yöntemi gelir (Veltrup, 1976). Araştırmacı Veltrup (Veltrup, 1976) tarafından ortaya atılan ve araştırmacılar Chen ve Siores (Chen and Siores., 2001) ile Siores ve arkadaşları (Siores et al., 1996) tarafından başarıyla kullanılan kesme kafası ve nozul titreşim yöntemiyle, aşındırıcı su jetiyle kesme performansının çok daha fazla artacağı gözlenmiştir. Bu yöntemde kesme kafası, kesme düzlemi içinde kesme yönüne paralel olacak şekilde, belli açı değerinde ve titreşim frekansında açısal yönde hareket ettirilmektedir. Bu yöntem çok yeni olmakla birlikte, kesme derinliğinin tayini ile titreşimli ve normal kesme işlemlerine ilişkin kapsamlı model veya modeller, bugünkü teknolojide mevcuttur (Lemma et al., 2002). Araştırmacı Hashish, şeffaf malzemeye ait kesme işleminin gözlenebilmesi için yüksek hızlı kameradan yararlanmış ve iki kesme rejimi tespit etmiştir (Hashish, 1984a). Bunlar sırasıyla; araştırmacı Bitter' in aşınma teorisinde olduğu üzere, kesme aşınma ve deformasyon aşınma bölgesi şeklindedir (Bitter, 1963a). Bu modelde, belli bir kritik değere kadar kararlı bir şekilde aşındırılan malzemenin kesme derinliği artırılacak olursa, malzeme aşındırılmasına ait kademeler belirgin bir şekilde ortaya çıkar. Söz konusu kritik kesme derinliğinin altında, malzeme aşındırma işlemi kararsız olduğundan, kesme cidarında çizikler ve dalgalanmalar görülecektir (Hashish, 1984).



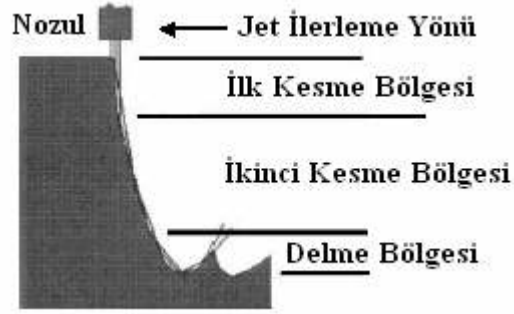
(a)



(b)

Şekil 3.17. Aşındırıcı Su Jetiyle Kesmede Pürüzsüz Üst Yüzey ile Çizikli Kaba Bölgenin Gösterimi (Hashish, 1991b)

Bu modele göre, sünek malzemelerin aşındırılması, genelde iş parçasının üst tarafında görülen kesme aşınmasında meydana gelen plastik deformasyon sonucunda gerçekleşir. Bu iki işlem, kesme aşınması ve deformasyonunda, iş parçası üzerine çarpan su jetinin, çarpma açılarındaki gözlenen değişimle birbirlerinden ayrılırlar. Yüzeğe yakın olmak şartıyla (düşük standof mesafesinde), düşük açılarda malzeme kesme işlemi, kesme aşınmasıyla gerçekleşir. Burada çarpma açısının etkisi yoktur ancak, daha büyük kesme derinliklerinde, jet çarpma açısı malzeme aşındırılmasında etkindir (Hashish, 1984a). Bu iki kesme bölgesi, pürüzsüz ve deformasyon kesmesi, Şekil 3.18’ de gösterildiği üzere, birinci ve ikinci diye adlandırılan kesme bölgelerine ayrılmaktadır. Araştırmacılar Zeng ve Munoz, çizik oluşumunun jet karakteristikleriyle çok yakından ilişkili olduğunu belirlemişlerdir (Zeng and Munoz,1997). Araştırmacılar Chao ve Geskin ise, çeşitli çalışma şartlarında kesme kafasının kontrol edilmesiyle ve robot dinamiği ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Sonuç olarak, aşındırıcı su jetiyle kesmede çizik oluşumuna etkili temel nedenin, tezgâh üzerindeki titreşimler olduğunu iddia etmişlerdir (Chao and Geskin, 1993). Yapılan araştırmalar çiziklerde gözlenen genlik farklılığına, üst yüzeyde meydana gelen küçük titreşimlerin sebep olduğunu göstermiştir (Chao and Geskin, 1993).



Şekil 3.18. Aşındırıcı Su Jetinde Kesme Bölgelerinin Şematik Gösterimi (Bitter, 1963b)

Bunlara ek olarak aşındırıcı su jetiyle kesme işleminde etkili farklı parametreler için, analitik ve deneysel veya yarı deneysel modeller geliştirilmiştir (Blickwedel and Guo, 1987, 1990; Kovacevic and Fang, 1994). Araştırmacı Hashish'e göre sünek malzemeler için toplam kesme derinliği, kesme aşınması ve plastik deformasyon sonucunda elde edilir (Hashish et al., 1984; Levy et al., 1987; Yau et al., 1987).

3.2.2.3. Çok pasolu kesme ve kesme derinliğinin belirlenmesi

Çok pasolu kesme ile yüksek ilerleme değerlerinde, aynı süre içerisinde elde edilen kesme derinliği, tek pasolu kesmeye göre çok daha fazladır. Başlangıçtaki standof mesafesi, n adet paso sonrasında elde edilen kesme derinliği ve standof mesafesinin X_{n+1} değeri,

$$X_{n+1} = X_1 + \sum_{i=1}^{i=n} z_i \quad (3.95)$$

şeklinde olacaktır. (3.95) nolu bağıntıda verilen değişkenlerin X_c ile bölünmesiyle elde edilen ifade, (3.96)' da olduğu gibi boyutsuz hale getirilebilir.

$$\left(\frac{X}{X_c} \right)_{n+1} = \left(\frac{X}{X_c} \right)_1 + \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{z}{X_c} \right)_i \quad (3.96)$$

Böylece (3.84) nolu ifadedeki kesme bağıntısı, şekline dönüşür.

$$\frac{z}{X_c} = \frac{0,297}{C_f \cdot \sqrt{R}} \sqrt{\frac{X}{X_c}} \cdot \psi^{2/3} \cdot \left[1 - \frac{\sigma_y}{2P_1 \phi} \right] \cdot \left[1 - e^{-2,256(C_f P / \eta u \phi)} \right] \quad (3.97)$$

ve

$$\frac{\Delta \dot{V} \cdot C_f}{R \cdot d_n^2} = 0,0994 \sqrt{\frac{X}{X_c}} \cdot \psi^{2/3} \cdot \left[1 - \frac{\sigma_y}{2P_1 \phi} \right] \cdot \left[1 - e^{-2,256(C_f P / \eta u \phi)} \right] \quad (3.98)$$

şekline dönüşür. (3.97) nolu eşitlik (3.96)'de yerine yazıldığında,

$$\left(\frac{X}{X_c} \right)_{n+1} = \left(\frac{X}{X_c} \right)_1 + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{0,297}{C_f \cdot \sqrt{R}} \sqrt{\left(\frac{X}{X_c} \right)_i} \cdot \psi^{2/3} \cdot \left[1 - \frac{\sigma_y}{2P_1 \phi_i} \right] \cdot \left[1 - e^{-2,256(C_f P / \eta u \phi_i)} \right] \quad (3.99)$$

(3.99) nolu denklem elde edilir. Bağlıtındaki ψ_i ve ϕ_i değerleri ise sırasıyla,

$$\psi_i = 1 - \sqrt{\frac{\sigma_c}{2P_1} \left(\frac{X}{X_c} \right)_i} \quad (3.100)$$

$$\phi_i = \frac{2}{(X/X_c)_i} \left[0,5 - 0,57\psi_i + 0,2\psi_i^2 \right] \quad (3.101)$$

dir. n adet pasodan sonra elde edilen toplam kesme derinliğine ilişkin bağıntı, (3.102)'de verilmiştir. Böylece (3.97) nolu denklemin uygun boyutsuz ifadesi, (3.103)'de verilen şekle dönüşür (Clark, et al., 1992).

$$\frac{z_a}{X_c} = \left(\frac{X}{X_c} \right)_{n+1} - \left(\frac{X}{X_c} \right)_1 \quad (3.102)$$

$$\frac{z}{X_c} = \frac{0,886}{C_f \cdot R} \cdot \left[1 - 0,5 \frac{\sigma_y}{P_1} \right] \cdot \left[1 - e^{-2,256(C_f P / \eta u)} \right] \quad (3.103)$$

3.2.2.4. Aşındırıcı su jetiyle kesmede kritik ve optimum ilerleme

Aşındırıcı su jeti kesme bağıntıları genellikle kesme derinliği, kesme eni, aşındırılan malzeme ve özgül enerjinin hesaplanması için geliştirilmiştir (Zeng, 1992; Franz, 1972). Bunlar jet parametreleri, kesme parametreleri ve malzeme özellikleri ile ifade edilir. Jet parametreleri, nozul çapı, basınç, dağılım katsayıları ve nozul sürtünme kayıpları, kesme parametreleri ise standof mesafesi, ilerleme miktarı ve paso sayılarından oluşur. Malzeme özellikleri, basma ve kopma gerilmesi, malzemeye ait yapısal özellikler ve jet ile katı arasındaki sürtünmenin hidrodinamik katsayısı olarak özetlenebilir. Kritik ilerleme değerleri, farklı kesme işlemlerini birbirlerinden ayırabilmek için kullanılmıştır. Jet ile kesme parametreleri arasında basit fonksiyonel ilişkileri içermek şartıyla, ilerleme değerlerine ait kesme bağıntıları malzeme etkileri dikkate alınarak çıkarılabilir.

Çizelge 3.1. Aşındırıcı Su Jetiyle Kesmede Gözlenen Hatalar (Zeng, 1992)

Parçadaki hatalar	Tanımlar
Jet sapması	Kesim sırasında gücün düşmeye başlamasıyla jetin arkaya doğru sapması koniklik ve köşe problemlerini doğurur.
Konikliğin artması	Yüksek hızlarda 'V' şekilli koniklik oluşur. Kesme gücü veya kesme hızı düşürülerek giderilebilir.
Köşe problemleri	Köşelerde yüksek hızda çalışıldığında jet, köşe çıkışında malzemeye dalabilir.
Jetin yayılması	Yay veya daire şekillerinin yüksek hızdaki kesimlerinde jet, koni şeklinde yayılım gösterebilir.
Malzemenin kararlılığı	Bazı malzemeler ısı ile genişirken soğuma ile büzülme gösterirler. Malzeme ısınmaz ancak ılıma söz konusudur.
Pompa sorunları	Pompa problemleri dışındaki sorunlar, parça hassasiyetini etkiler. Kesme sisteminde birden daha fazla basınç artırıcı varsa basınç artırıcılar stroklarına aynı anda başlamalıdır.
Nozul ucundaki su basıncı	Kesme kafasının yakınına monte edilmiş filtre tıkanmamalıdır. Tesisattaki çap değişikliğinde, basınç kaybı dikkate alınmalıdır.
Aşındırıcı boyutları (mesh)	Daha çok yüzey kalitesi ve kesme hızında etkilidir. Küçük taneli aşındırıcılarla düşük ilerleme hızlarında az pürüzlü yüzey elde edilir.
Tezgâh hareketi	Hassasiyet üzerinde, tezgâhın dinamik hareket karakteristikleri ve konum hassasiyeti (Kolay yön değişimi, tekrarlılık, konum hassasiyeti, malzemede düzgünlük, tezgâh taşıyıcı kılavuzlarının paralelliği vb.) etkilidir.

En uygun ilerleme değerlerini kullanarak ele alınması gereken stratejiler sırasıyla, a) İki kesik arasında sürekli malzeme aşındırılması için aralıklı kesme işlemi. Bunun için, özgül enerjinin minimum değerde olması gerekir. b) Çok pasolu kesme işlemi. Maksimum kesme derinliğine ulaşmak için paso sayıları ve ilerleme miktarlarının en uygun şekilde kombinasyonu olarak özetlenebilir (Zeng, 1992; Franz, 1972).

3.2.2.5. Aşındırıcı su jetiyle işlemede hassasiyet

Aşındırıcı su jeti tezgâhının hareketiyle, işlenen parça hassasiyeti arasında belirgin bir fark oluştuğu Çizelge 4’de gösterilmiştir. İşlenmiş parçadaki hassasiyet, işleme hatası, tezgâh hatası (XY koordinatlarındaki performans), iş parçasının kararlılığı, kalıplar, düzgünlük, sıcaklıkla kararlılık vb. gibi tanımlardan oluşur. ASJ hüzmeleri, parça hassasiyetini etkileyen en önemli karakteristik olduğundan, kontrol altında tutulması, yıllardır imalatçı firmaların ana görevi olmuştur. Çok hassas makine kullanımı, tezgâh ilerlemesindeki hassasiyeti sağlamakla birlikte, parça hassasiyeti için yeterli olmayabilir. Bilinen tezgâhlarla, 25 mm kalınlığın altındaki malzemelerin kesiminde 0,07–0,4 mm’ lik, 25 mm’ nin üzerindeki kalınlıklarda ise 0,12–2,5 mm’ lik hassasiyetin yakalanması mümkündür (Zeng, 1992).

3.2.3. Kesme verimi ve optimum kesme şartlarının belirlenmesi

Kesme verimi, aşındırılan malzeme için harcanan enerjinin giriş enerjisine oranı olarak tanımlanır. Özgül enerji (SE) ise, girişteki jet enerjisinin malzeme aşındırmak için harcanan enerjiye oranı olarak tanımlanmakta ve özellikle madencilikte çok önem taşımaktadır. Kesme verimi,

$$\eta_c = \frac{\Delta \dot{V}}{\frac{1}{2} \dot{m} V_1^2 t} \quad (3.104)$$

şeklinde dir. İfad edeki t terimi, ΔV hacminin aşındırılması için gerekli süredir. Kesme işleminde birim boy için aşındırılan hacim, (3.98) nolu bağıntıyla verilmekte, bunun için geçen süre ise, $t = 1/u$ şeklinde ifade edilmektedir. Buna göre, (3.98) nolu bağıntı ile (3.104) bağıntı birlikte düzenlendiğinde (3.105) nolu denklem elde edilir.

$$\frac{\eta_c \cdot V_1 \cdot \eta}{R} = 0,1256 \left(\frac{X}{X_c} \right) \cdot \frac{\psi^{4/3}}{\left(\frac{C_f \cdot P_1}{\eta \cdot u} \right)} \cdot \left[1 - \frac{\sigma_y}{2 P_1 \phi} \right] \cdot \left[1 - e^{-2,256 (C_f P / \eta u \phi)} \right] \quad (3.105)$$

İfad edeki ϕ ve ψ terimleri, (3.80) ve (3.82) nolu bağıntılarda tanımlanmıştır. $\eta_c = 1/SE$, eşitliği kullanılarak, (3.105) nolu bağıntıdan özgül enerjiye ait (3.106) nolu bağıntı elde edilir.

$$\frac{SE \cdot R}{V_1 \cdot \eta} = 7,96 \cdot \frac{\left(\frac{C_f \cdot P_1}{\eta \cdot u} \right)}{\left(\frac{X}{X_c} \right) \cdot \psi^{4/3} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_y}{2 P_1 \phi} \right)} \cdot \left[1 - e^{-2,256 (C_f P / \eta u \phi)} \right] \dots \dots \dots (3.106)$$

Sabit nozul parametrelerini kullanarak, bazı malzemelerin kesiminde en yüksek verime ulaşabilmek için maksimum miktarda malzeme aşındırılması gerekir. En uygun ilerleme değerine ulaşmak için, en uygun standof mesafesinin belirlenmesi gerekmektedir. En uygun standof mesafesi ise, maksimum malzeme aşındırılması şartından bulunabilir. $\eta u / C_f P_1 > 10$ için verim, maksimum değere ulaşacaktır (Clark and Burmeister, 1992).

4. AŞINDIRICI SU JETİYLE AŞINDIRMA ANALİZİ

Önceden çatlamış malzemede, çatlak yayıldığında malzeme zayıflayacağından, yüksek hızlı su çatlak içerisine girdiğinde, çatlağı yayılmaya zorlayan kuvveti doğurur. Aşındırıcı su jeti yüksek hızda çatlağa girip, çatlak duvarlarında malzeme direncinden daha büyük gerilmeler oluşturursa, jet bir kama görevi yaparak çatlağın açılmasına ve böylece malzeme içerisine doğru ilerlemesine neden olur. Aşındırıcı su jetinin bu etkisi, işlenecek yüzeyin malzeme karakteristiklerine ve özellikle malzemenin aşınma direncine bağlıdır. Malzeme yüzeyine ince metal levha konularak yapılan ASJ ile kesme deneylerinde, malzemeye ilişkin hiçbir sorunla karşılaşılmamıştır. İnce metal levha kaldırıldığında, küçük çatlaklara giren yüksek basınçlı suyun çatlakları genişletmesiyle, malzemede sorunlar meydana geldiği gözlenmiştir. Yayılan çatlakların birleşmesiyle, kopmuş malzeme parçaları aşınmaya neden olacaktır. Birim hacme düşen aşınma miktarları farklı olabilir. Hasarların yanı sıra belirlenen hızlarda ASJ, bazı malzemelerde çatlakların büyümesine sebep olurken, bazılarında ise etkisiz kalabilir. Aşındırıcı su jetinin belirli hızlarında, malzeme parçalanması söz konusu olduğundan, kesme hızı belirlenen bu değerden düşük ise, çatlak genişleyemeyeceği için parçalanma olmaz. Eğer ASJ hızı belirlenen değerden büyük ise, mikro çatlaklar büyür ve malzemede sorunlar başlayabilir. Yapısında yaprak şeklinde bulunan grafit tabakaları nedeniyle, düzensiz dağılımların görüldüğü gri dökme demir, geçiş hızı özelliği gösteren malzemeye bir örnektir. Düzensiz dağılımlar nedeniyle, jet hızı çok düşük olan gri-dökme demiri, normalde geçiş hızı 200 m/s olan bir ASJ ile kesmek mümkün değildir. Eğer ASJ hızı bu değerden daha düşük ise, mikro çatlaklara giren suyun cidarda oluşturduğu gerilme miktarı yeterli olmayacağı için, çatlakların ilerlemesi de mümkün olmaz. Bu nedenle, çatlakların büyümesinde aşındırıcı parçacıklar etkili olacaktır. ASJ hızı bu değeri aştığında; düzensizlikler–dengesizlikler artacak ve aşınma meydana gelecektir. Su hızı, geçiş hızından daha küçük ise, aşındırıcı su jetine ilave edilen parçacıkların çarpışması, aşınmaya neden olur. Aksi halde aşınma söz konusu değildir (Momber, et al., 1995).

4.1 Aşındırılan Malzeme Yüzeyinin Kontrolü

Bilindiği üzere iş parçası–reaksiyon kuvvetiyle işlem parametreleri ve iş parçası–reaksiyon kuvvetiyle kesme yüzeyi kalitesi arasında bir ilişki vardır. Kesme derinliği ve ilerleme hızı ile ilişkili olan reaksiyon kuvvetine ait bağıntı, (4.1)'de verildiği gibidir. Buna benzer şekilde, (4.2) nolu bağıntıda ifade edilen yüzey pürüzlülüğü, kesme derinliği ve ilerleme hızının bir fonksiyonudur.

$$F_w = a_1 \cdot h + a_2 \cdot v - a_3 \quad \dots(4.1)$$

$$R_a = b_1 \cdot h + b_2 \cdot v - b_3 \quad \dots(4.2)$$

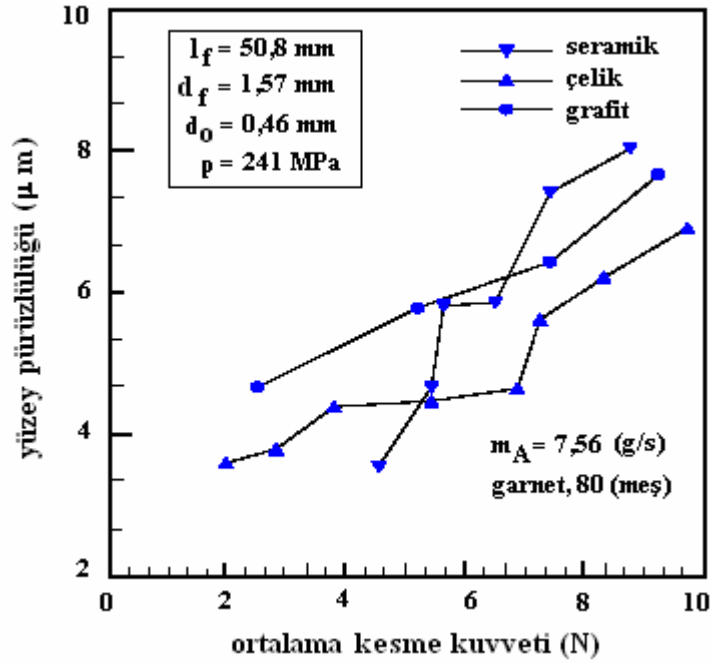
Bu iki bağıntı birleştirilerek yüzey pürüzlülüğü, reaksiyon kuvveti ve ilerleme hızının bir fonksiyonu şeklinde yazıldığında, (4.3) denklemi elde edilir.

$$R_a = c_1 \cdot v + c_2 \cdot F_w + c_3 \quad (4.3)$$

Araştırmacılar Curham ve arkadaşlarına göre, ilerleme hızının etkisi küçük ise, kesme kalitesiyle ilerleme hızı arasındaki ilişkiyi gösteren bağıntıda ilk terim ihmal edilerek,

$$R_a = C_1 + C_2 \cdot F_w \quad (4.4)$$

(4.4) şeklinde yazılabilir (Zeng, 1992). Seramik malzeme, çelik ve grafit için deneysel olarak elde edilen reaksiyon kuvvetiyle yüzey pürüzlülüğü arasında, Şekil 4.1' de gösterildiği gibi doğrusal bir ilişki vardır. Bu ilişki, zamana bağlı olarak sürekli değişen giriş değerleri ve sistemin çalışması boyunca sabit kalan giriş değerleri olmak üzere, birkaç birime bölünerek elde edilmiştir.



Şekil 4.1. Kesme Kuvvetinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi (Franz, 1972)

Aşındırıcı su jetiyle kesmede, malzeme yüzeyinin sertleşmesine ilişkin ciddi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Mikro yapı incelemeleriyle ilgili çalışmalar genelde AISI 4340, takım çelikleri, titanyum, alüminyum 6061-T6, magnezyum, Cr-Mo' li çelikler ve metal kompozitleri gibi çeşitli metallerle ilişkilidir. Araştırmacı Groppetti ve arkadaşları, aşındırıcı su jetiyle işlenmiş AISI 304 kalite paslanmaz çelikte, yüzeye çok yakın olmak üzere mikro sertlik ölçümleri (yaklaşık 37 mikron kalınlıkta) yapmışlardır (Groppetti et al., 1998). Elde ettikleri sonuçlara göre malzeme sertliğinde, yüzeyden itibaren 8 mikronluk bir artış belirlemişler. Ayrıca 20 mikron ve daha üstü değerlerde sertliğin tamamen kalktığını, hatta sıfıra kadar indiğini gözlemlemişlerdir.

4.2. Kırılğan Malzemelerde Aşınma Analizi

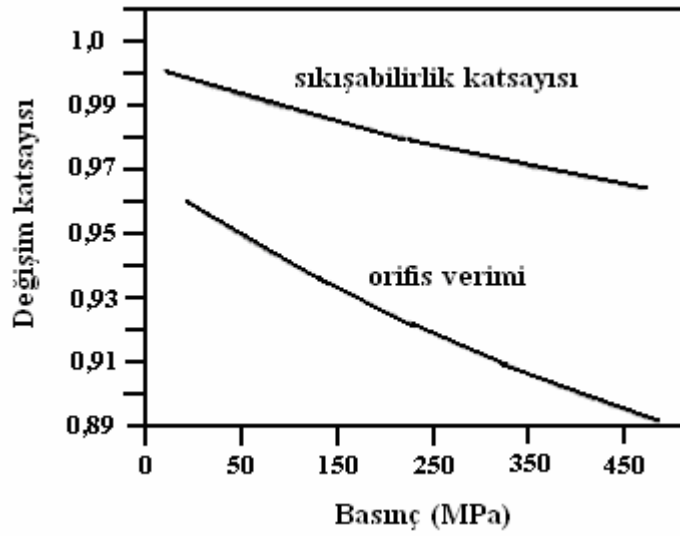
4.2.1 İşlem parametrelerinin tanımı

ASJ kesme işleminde ana parametreler; su basıncı, su jeti orifis çapı, aşındırıcı türü, aşındırıcı boyutu, aşındırıcı debisi, karıştırma tüpü çapı, nozul standof mesafesi, ilerleme hızı, kesme açısı ve malzemenin aşınmaya karşı göstereceği direnç şeklindedir. Teorik olarak ASJ hızı, basıncın karekökü ile doğru orantılıdır. Ancak suyun sıkışabilme özelliğinden dolayı, orifisteki akış verimi azalmakta ve buna bağlı olarak hız kaybı artmaktadır. Su basıncındaki artışın, aşındırıcı karıştırma verimi üzerinde olumlu bir etkisi vardır. Araştırmacı Hashish'e göre, nozul ucundaki aşındırıcı parçacık hızına ilişkin bağıntı (4.5)' de verildiği gibidir (Hashish, 1984c).

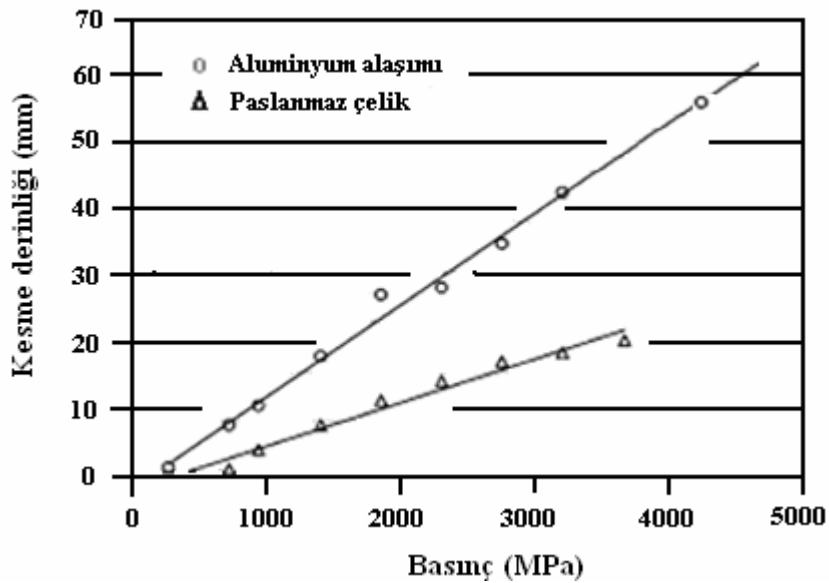
$$v = \frac{\eta_m C_v C_y}{1 + R} \sqrt{\frac{2P_w}{\rho_w}} \quad (4.5)$$

Momentum taşıma verimini etkileyen orifis verimi ve sıkıştırılabilirlik katsayısına ilişkin değerler Şekil 4.2' de verilmiştir. Su basıncının kesme derinliği üzerindeki etkisi, yaklaşık lineer bir değişim göstermektedir. Aşındırıcı su jetinin performansında, orifis boyutunun etkisi büyüktür. Genel bir kural olarak, debi ve basınç artışıyla kesme derinliği de arttığından, sabit su basıncında büyük çaplı orifis kullanılarak kesme derinliğini artırmak mümkündür. Orifis çapı seçiminde, karıştırma tüpünün çapı da göz önünde bulundurulmalıdır. Büyük çaplı orifis, karıştırma tüpünde yığılmalara neden olacağından, karıştırma tüpünde başarılı odaklama yapılamaz. ASJ işleminde kullanılan aşındırıcı türü ise, bir diğer önemli parametredir. Aşındırıcı olarak en çok kullanılan malzemeler; garnet, alümina, silikon karpit, silika kumu, çelik parçacıklar ve cam boncuklardır. Aşındırıcıların malzemeye göre verimlilikleri de değişmektedir. Ancak, sünek malzeme kesiminde aşındırıcı olarak kullanılan garnet ve alümina, yaklaşık aynı kesme gücüne sahip iken kırılğan malzemelerde alümina, garnete göre çok daha etkin bir kesme gerçekleştirir. 50~120 meş aralığındaki aşındırıcılar yüzey kalitesinde etkili olmalarına karşın, ASJ ile kesmede aynı başarıya ulaşamamışlardır. Aşındırıcı hattının tıkanmasını önlemek için, büyük boyutlu aşındırıcılar tercih edilmemelidir. Aşındırıcı

debinin artmasıyla kesme derinliği de artacaktır. Ancak bu artış lineer değildir. Çok aşırı bir debi artışı söz konusu olduğunda, karıştırma verimi düşeceği için 7,6 g/s' lik debinin üstündeki değerlerde, düzgün malzeme kesimi mümkün değildir. Hatta çoğu zaman basma hattı tıkanacağı için kesme işlemi, Şekil 4.3' den de görüldüğü üzere kesintilere uğrayabilir.



Şekil 4.2. Su Basıncının Orifis Verimi ve Sıkıştırma Katsayısına Etkisi (Hashish,1977)



Şekil 4.3. Su Basıncının Kesme Derinliğine Etkisi (Boride, 1996)

Büyük çaplı karıştırma tüpü genelde daha geniş kesik ve düşük kesme derinliğine neden olur. Aşındırılacak malzeme düşünüldüğünde, karıştırma tüpünün etkisi minimum seviyededir. Standof mesafesinin küçük değerlerdeki değişiminin (3 mm gibi), kesme performansı üzerindeki etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir. İlerleme hızı da çok kritik bir değerdir. Teorik olarak kesme derinliği, ilerleme hızıyla ters orantılıdır. Diğer parametrelerin sabit olduğu durumlarda ilerleme hızı, malzeme işleme kalınlığını kontrol etmek için başarıyla kullanılır. Kesme açısı, jet ile iş parçası üst yüzeyi arasındaki açıdır. Normalde 90°'ye ayarlanır. Araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda, kesme açısının ilerleme yönünün tersi yönünde ve 90°'den küçük seçilmesi durumunda, kesme yüzündeki eğriliğin kesikteki değişim ile karşılanabileceğini göstermişlerdir (Matsui et al., 1991). Aşınma direncini karakterize etmek için tek bir malzeme özelliği kullanılmadığından, işlenecek malzemenin aşınmaya olan direnci çok iyi tanımlanamamış bir parametredir. Sünük malzemeler için aşınma direnci, sertlik değerine çok yakındır. Kırılgan malzemelerde ise; çatlak mukavemeti, tane büyüklüğü ve çatlak dağılım parametresi gibi değişkenler aşınma direnci üzerinde etkilidir. Uygulamalarda kullanılan debi değeri, düşük çalışma basınçlarında (<100 MPa) oldukça yüksektir. Kesme ön yüzünde aşındırılan toplam malzeme miktarı, (4.6) nolu denklemin çözümüyle hesaplanır (Hashish, 1984b; 1988).

$$Q_c = \int m_M \cdot d_j \cdot d_s \quad (4.6)$$

Üstten alta doğru kesme verimi düştükçe, jet çapının da düştüğü gözlenir. Efektif jet çapının nozul çapı ve kesme verimiyle ilişkisi denklem (4.7)'de verilmiştir.

$$d_j = D \cdot \cos \theta \quad (4.7)$$

Efektif jet çapındaki değişim, kesme yüzüne ait en değerinin de değişmesine neden olacaktır. Kesme ağzındaki eğim açısı; ilerleme miktarı, ilerleme hızı, kesme derinliğiyle birlikte,

$$\frac{dh}{dt} = \frac{dx}{dt} \cos \theta \quad (4.8)$$

şeklinde tanımlanır. Lineer olarak aşındırılan malzeme miktarına ilişkin ifade, (4.6–4.8) bağıntıları kullanılarak elde edilen, (4.9) ve (4.10)' da verildiği gibi yazılabilir

$$m_M = u \cdot \cos \theta \quad (4.9)$$

$$\frac{m_M}{u} = \frac{1}{\sqrt{1 + 4a_s^2(z - b_s)^2}} \quad (4.10)$$

(4.9), (4.10) ve (4.11) nolu bağıntılar, kesme açısı veya kesme derinliği değerlerinin artmasıyla kesme veriminin düşeceğini göstermektedir. Kesme verimi belirli bir değere kadar düşürüldüğünde, jet akışına katılan aşındırıcılar kararsız hale geçerler. Böylece kesme yüzeyinde çizikler oluşmaya başlar. Kesme verimi belli bir kritik noktaya ulaştığında, kesme gücü de düşer. Bu güç kaybı, malzeme tarafından '*geri tepildi*' deyimiyle ifade edilir. Söz konusu kritik nokta, belirlenmiş kesme şartlarında maksimum kesme derinliğiyle ilişkilidir (Bitter, 1963a; 1963b; Finnie, 1958).

4.2.2. Aşındırıcı su jetiyle kırılğan malzemelerde cep oluşumu

Aşındırıcı su jetindeki suyun akışı, Şekil 4.4' de görüldüğü gibi istenmeyen bazı etkiler oluşturabilir.



Şekil 4.4. Kırılğan Beton Malzemede Cep Oluşumu (Momber, et al.,1995)

Bunların başında malzemenin sürüklenmesiyle kesme yüzeyinin altında oluşan büyük cepler gelir. Bu durum, akıcı fazı tutan matriks malzemesinin boşluktan çıkarken su akışıyla süpürülüp atılmasından ortaya çıkar. İdeal sonuca ulaşmak için aşındırıcı su jetine ilişkin değişkenlerin yanında, malzeme özelliklerinin de bilinmesinde yarar vardır (Momber, et al.,1995).

4.3. Hacimsel aşındırmada standof mesafesinin etkisi

Maksimum malzeme aşındırılması, madencilikte ve temizleme işlemlerinde çok önem taşır. Maksimum hacimsel aşındırmada en uygun standof mesafesi, birçok araştırmacı tarafından özellikle kayaların veya metallerin aşındırılması için incelenmiştir (Clark, and Burmeister, 1992), (Lichtarowicz et al., 1974; Erdmann et al.,1976). Hacimsel aşındırma için çıkarılacak boyutsuz bağıntı, tasarım ve verimli kesme işleminde parametre seçiminde yararlı olacaktır. Kesme boyunca, birim uzunluktaki hacim ifadesi (4.11)' de verilmiştir.

$$\Delta \dot{V} = z \cdot w_c \cdot 1 \quad (4.11)$$

Kesme eni kesme boyunca uniform olup, kesme başlangıcında jet çapına eşittir. (4.7) nolu ifadedeki kesme derinliği, (4.11) nolu ifadedeki efektif en değeri, (4.12) nolu ifadede yerine yazılacak olursa elde edilecek boyutsuz bağıntı,

$$\frac{\Delta \dot{V} C_f}{R d_n^2} = 0,0994 \left(\frac{X}{X_c} \right) \cdot \psi^{4/3} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_y}{2 P_1 \phi} \right) \cdot \left[1 - e^{-2,256 (C_f P / \eta u \phi)} \right] \quad (4.12)$$

olur. ϕ ve ψ , (3.80) ve (3.82) nolu ifadelerde tanımlanmıştır. Hacimsel aşındırma için $C_f P_1 / \eta u$ şeklinde dört boyutsuz sayı içeren (4.12) nolu ifade, $\psi = 1$ alınarak

sadeleştirildiğinde, 4.13 nolu ifadeye ulaşılır. Lokal jet kalınlığı, kullanılan efektif jet kalınlığından daha büyük ise, (4.12) nolu bağıntıda kullanılan benzer sonuca ulaşmak mümkündür (Lichtarowicz et al., 1974; Erdmann et al., 1976).

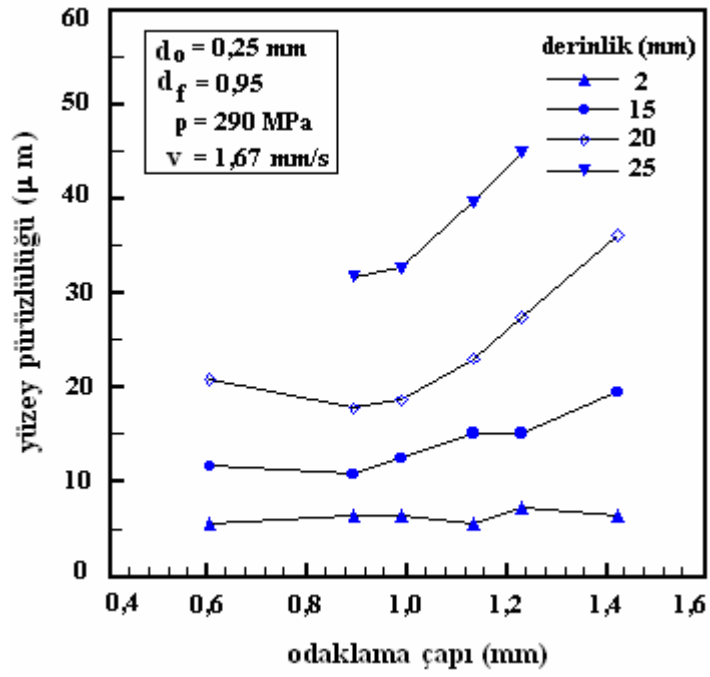
$$\frac{\Delta \dot{V} C_f}{R d_n^2} = 0,0994 \left(\frac{X}{X_c} \right) \cdot \left[1 - 1,945 \left(\frac{\sigma_y}{P_1} \right) \left(\frac{X}{X_c} \right) \right] \cdot \left[1 - e^{-0,58 (C_f P / \eta u)(X_c / X)} \right] \quad (4.13)$$

4.4. Yüzey Pürüzlülüğü

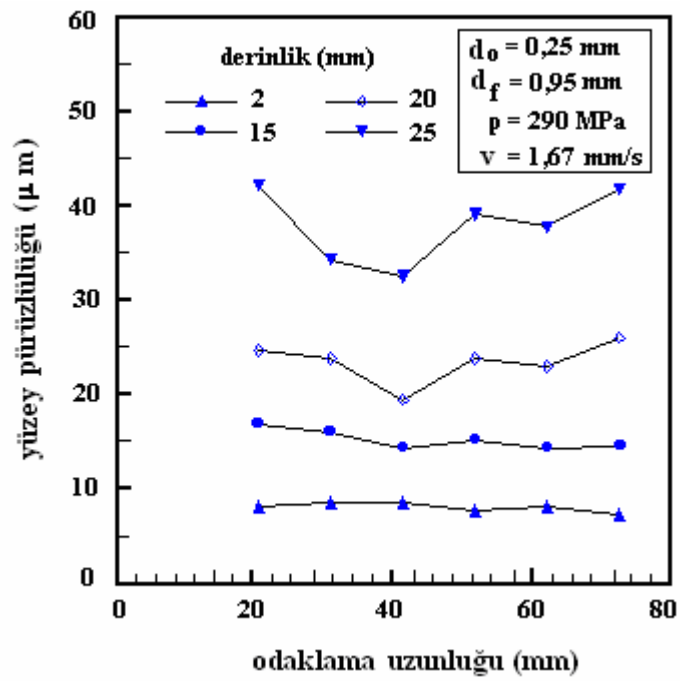
Genelde katılardaki yüzeyler, homojen ve homojen olmayan bölgelerden, aşındırıcı su jetinin oluşturduğu yüzeyler ise; küçük bölgelere ayrılmış, rasgele dağılmış yüzeysel yükseltilere sahip bölgeler ve daha düzenli dalgalı yüzeylere sahip bölgelerden oluşur. Homojen bölgeler; tayin edilebilen ve rasgele seçilmiş yüzeyler olup, yüzeydeki yükseltilere göre belirlenebilen Gauss dağılımına uygun veya uygun olmayan yüzeyler şeklinde iki grupta ele alınırlar. Aşındırıcı su jeti tarafından oluşturulan pürüzsüz kesme yüzeyine ait topografya; Gauss dağılımına uygun ve izotropiktir (Kovacevic et al., 1995). Yüzey pürüzlülüğü, kesme bölgesinin yapısıyla ilişkilidir. Her yüzey profilinin hassas kesme bölgesindeki yüzey pürüzlülüğü, çizik formlarının süperpozisyonu şeklinde modellenebilir. Böylece, bu çiziklerle yüzey kalitesi arasındaki ilişki karşılaştırılabilir. Odaklama çapının belli değerleri aşması halinde, yüzey pürüzlülüğü de artar. Şekil 4.5a'da gösterildiği üzere, artan kesme derinliğiyle birlikte odaklama çapının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi daha da belirginleşmektedir. Odaklama uzunluğunun yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi, Şekil 4.5b'de gösterilmiştir. Odaklama uzunluğundaki % 100' lük bir değişim bile, yüzey pürüzlülüğünü çok fazla etkilemez. Elde edilen bu sonuçlar, araştırmacı Kovacevic ve arkadaşlarının savunduğu, yüzey dalgalanmalarının yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu görüşünü desteklemiştir (Franz, 1972; Hashish, 1982).

Aluminyum, seramikler, metal esaslı kompozitler, cam ve fiber destekli kompozitlerde olduğu üzere, ilerlemedeki artışla yüzey pürüzlülüğünün de arttığı Şekil 4.5c'de gösterilmiştir. Yüksek ilerleme hızlarında kesme derinliğindeki artış, yüzey pürüzlülüğü değerlerini de belirgin bir şekilde değiştirirken, daha düşük ilerleme hızlarında kesme derinliğindeki artışa rağmen, yüzey pürüzlülüğü sabit kalmaktadır. Düşük ilerleme değerlerinde aşındırıcı parçacık sayılarındaki artış, daha kaliteli bir yüzey elde edilmesini sağlar. Kullanılan aşındırıcı parçacıkların bir kısmı atılırken, bir kısmı da yüzeyin temizlenmesine yardımcı olur. Çok düşük ve çok yüksek ilerleme hızlarında pürüzlülük değeri, odaklama çapından bağımsızdır (Hashish, 1982). Küçük odaklama çaplarındaki pürüzlülük değerleri çok daha düşük olmasına rağmen, büyük odaklama nozulları için benzer pürüzlülük değerlerine ulaşılabilir. Kesme derinliğinin düşük değerlerinde, ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğünü çok fazla etkilemediği, Şekil 4.5c'de gösterilmiştir. Pompa basıncının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi, Şekil 4.5d' de gösterilmiştir. Basınç artışı genelde yüzey kalitesini de artırır. Çünkü basınç artışıyla aşındırıcıların parçalanma olasılığı ve hızları artmaktadır. Parçalanma ile aşındırıcı parçacıkların boyutu küçülür. Ayrıca pompa basıncındaki artış, aşındırıcı su jetinin kinetik enerjisini de artırır. Artan enerjinin bir bölümü, yüzeyin pürüzsüz hale gelmesini sağlamakta kullanılır (Hashish, 1982). Yüksek ilerleme hızlarında, pompa basıncı yüzey pürüzlülüğünü azaltır. Kesme yüzeyinin üst kısmında Şekil 4.5d'den de görüleceği üzere, kesme derinliği arttıkça pompa basıncının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi de artar. Sabit kesme derinliğinde, pompa basıncının yüzey pürüzlülüğüne çok fazla etkisi yoktur.

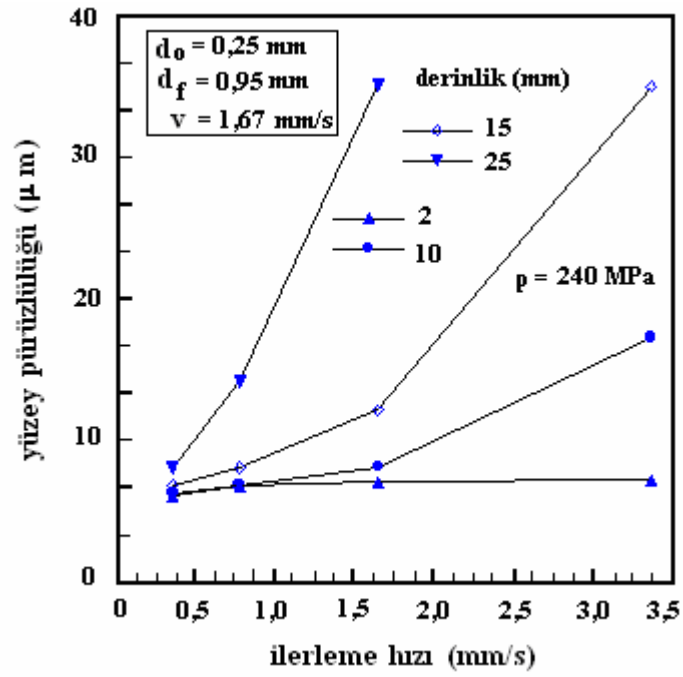
Şekil 4.6a' dan da görüldüğü üzere, aşındırıcı parçacık çapı arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır. Karıştırma işleminde yer alan aşındırıcı parçacık sayısının çok fazla olması, parçacıkların birbirleriyle çarpışma olasılığını artıracığından, çarpışan parçacıkların ortalama çapları aşınma nedeniyle azalır. Bununla beraber, daha düşük pompa basıncında paslanmaz çelik için, kritik kütleli debi değeri yaklaşık olarak 11,3 g/s' yi aştığında, yüzey pürüzlülüğü artmaktadır (Hashish, 1982). Şekil 4.6b'den de görüldüğü gibi, kesme derinliğinin çok küçük olduğu değerlerin dışında küçük çap aralıklarında, aşındırıcı parçacık kütleli debisi artarken yüzey pürüzlülüğü de aynı oranda azalır.



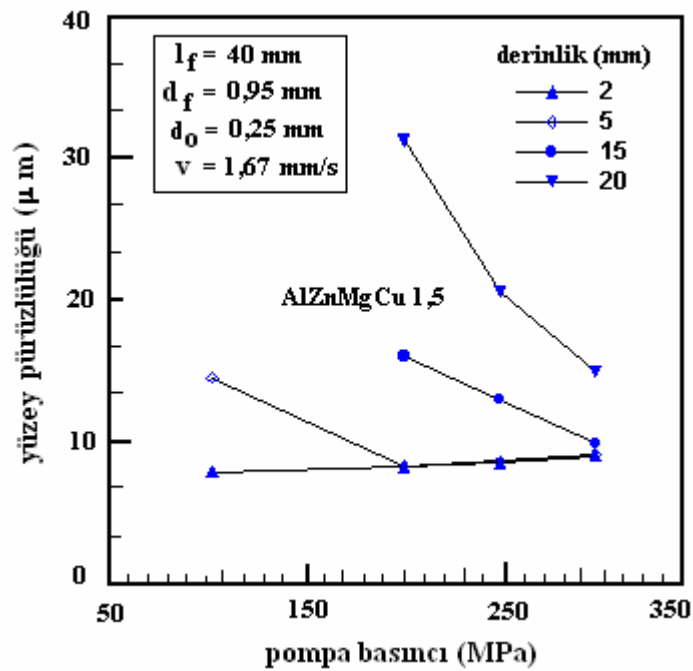
a) Odaklama çapı – yüzey pürüzlülüğü



b) Odaklama uzunluğu – yüzey pürüzlülüğü



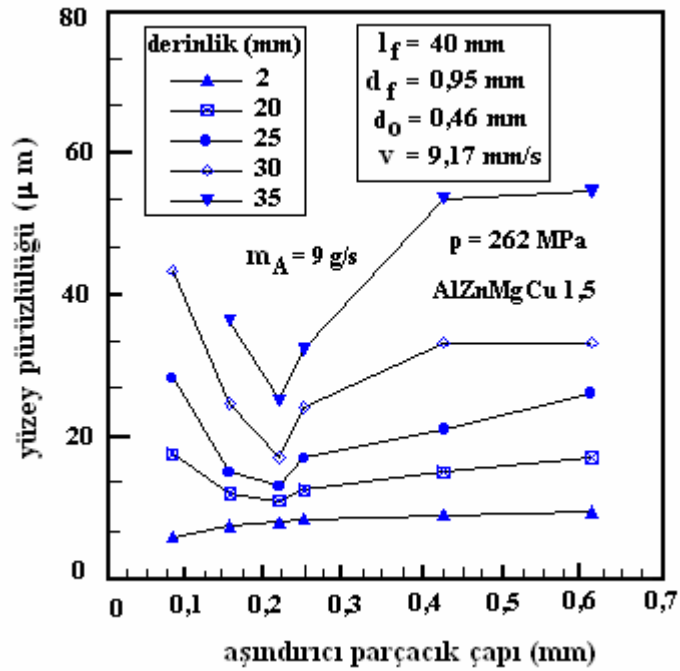
c) İlerleme hızı – yüzey pürüzlülüğü



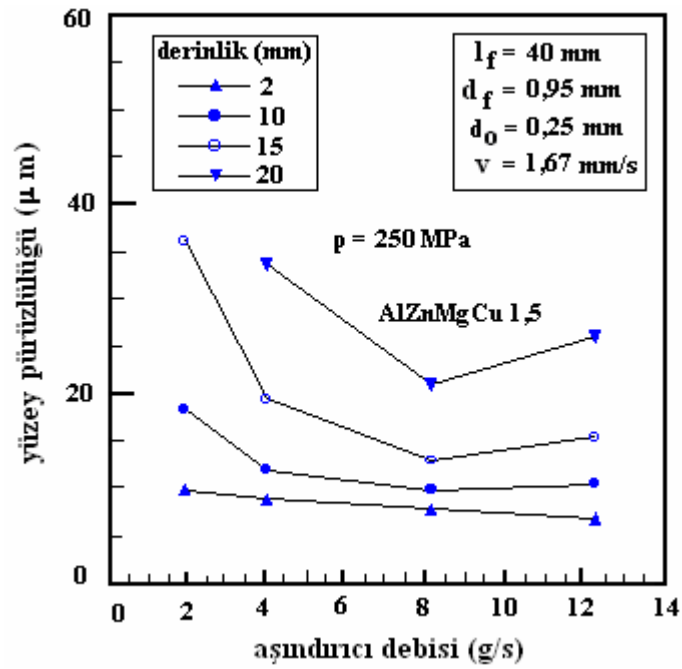
d) Pompa basıncı – yüzey pürüzlülüğü

Şekil 4.5 Yüzey Pürüzlülüğünü Etkileyen Parametreler (Burnham, 1990)

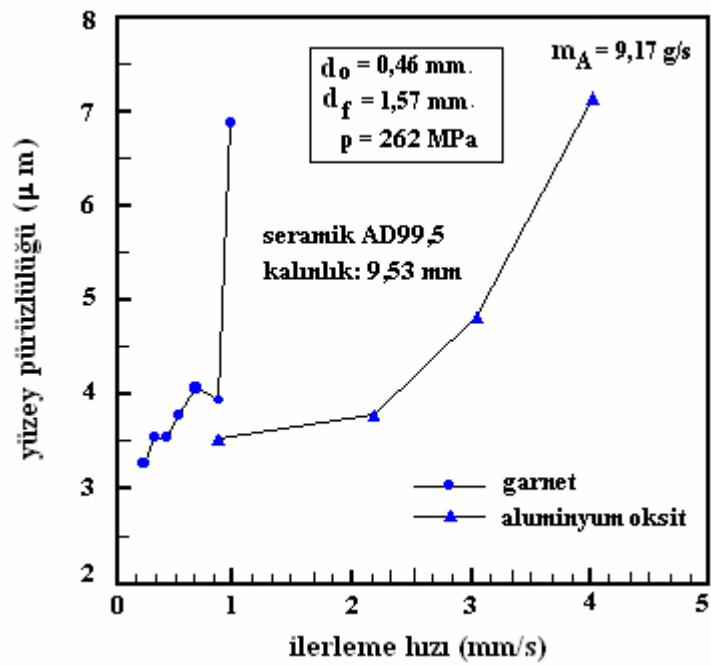
Bu etki, kesme derinliğinin yüksek olduğu değerlerde çok daha belirgindir. Belirli bir kesme derinliğine ulaşıldığı zaman, her bir parçacığın birbirleriyle çarpışma karakteristikleri, genel malzeme kaldırma karakteristiklerinden etkilenir. Ayrıca yüzey kalitesine de yardımcı olan aşındırıcı çapındaki azalmaya karşılık, jetteki düzensizliklerin de azaldığı gözlenmiştir. Kesme bölgesinin üst kısmındaki, pürüzlülük profiline ait çizik boyu, ortalama aşındırıcı çapına bağlıdır (Franz, 1972; Trumpf, 2006). Aşındırıcı su jetiyle elde edilen pürüzsüz kesme yüzeyi, aşındırıcı parçacıkların her biri tarafından oluşturulan küçük çukurların süperpozisyonuyla elde edilir. Bu çukurların boyutları, doğrudan aşındırıcı parçacık çapıyla ilişkilidir. Şekil 4.6c'de görüldüğü üzere, daha sert alüminyum oksitlerin kullanılması halinde, kesilecek seramik malzemenin yüzey pürüzlülüğü kademeli olarak azalır. Uygun aşındırıcı parçacık boyut dağılımının seçimiyle yüzey pürüzlülüğünün, kademeli olarak arttığı Şekil 4.6d'de görülmektedir. Uygun boyut modülü seçimiyle, farklı kesme derinliklerinde ortalama yüzey pürüzlülüğünde elde edilen iyileşme % 60'lara kadar ulaşabilir.



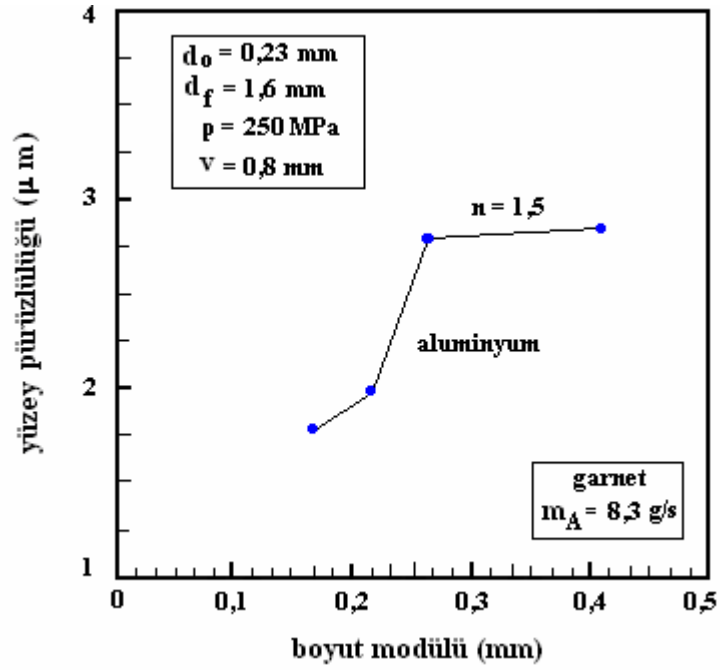
a) Aşındırıcı parçacık çapı – yüzey pürüzlülüğü



b) Aşındırıcı kütleli debisi–yüzey pürüzlülüğü

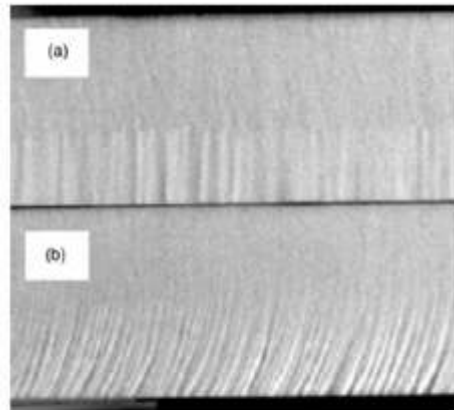


c) İlerleme hızı – yüzey pürüzlülüğü (kesme derinliği sabit)



d) Boyut modülü – yüzey pürüzlülüğü

Şekil 4.6 Aşındırıcı Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkileri
(Jablonowski et al.,1990)

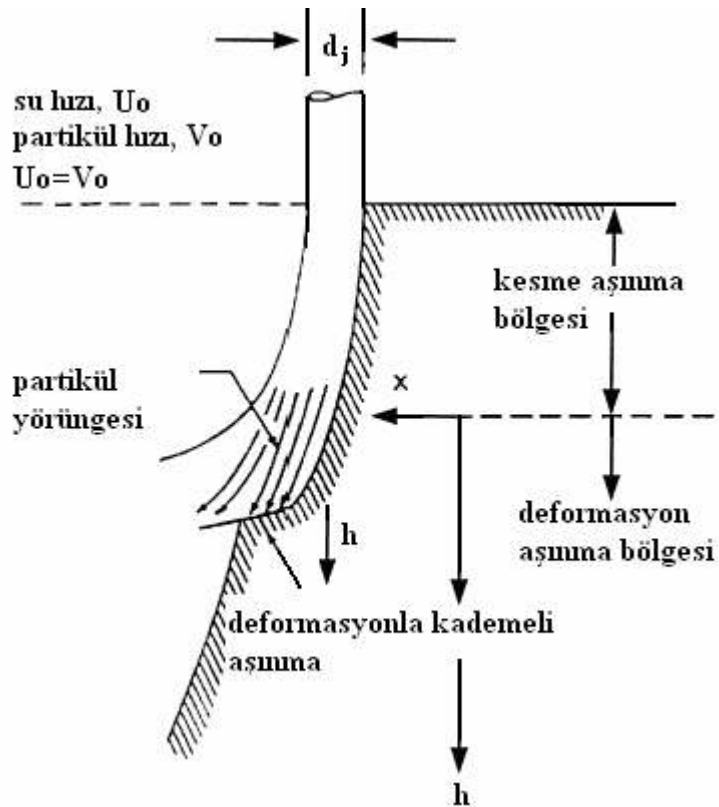


a) Salgılı kesme, ilerleme hızı, $0,33 \text{ mm/s}$
b) Salgılı kesme, ilerleme hızı, $0,25 \text{ mm/s}$

Şekil 4.7 Aşındırıcı Su Jetiyle Salgılı Kesmede Çizik Oluşumu (Stonage, 2005)

4.4.1. Aşındırıcı su jetiyle yüzelerde çizik oluşumu

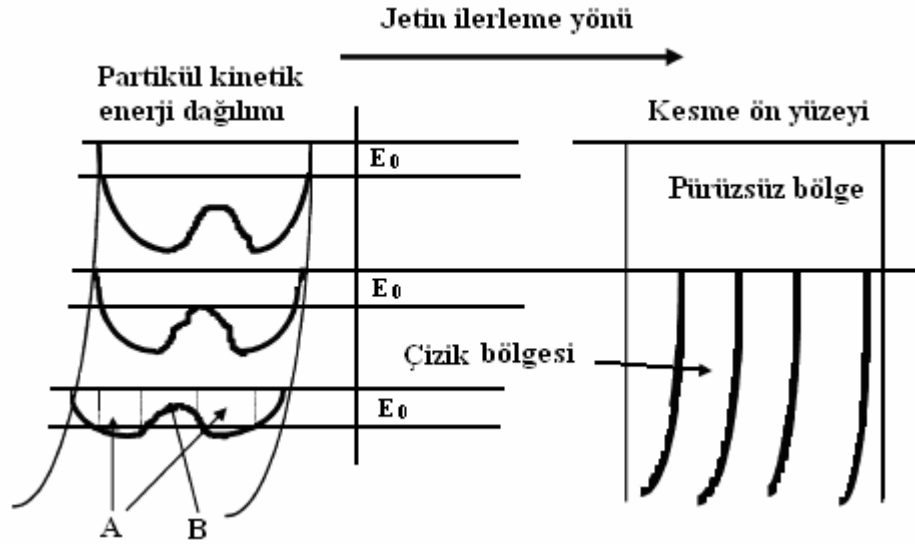
Şekil 4.7' de görüldüğü gibi, ikinci bir işlemle daha kaliteli yüzey elde etmek mümkündür. Birinci işlemde, parça veya iş parçasının kalınlığı üst pürüzsüz bölgeden daha büyüktür. İkincisinde ise, çok daha kaliteli bir iş parçası kesme yüzeyi elde edilmiştir. Araştırmacı Hashish yaptığı çalışmalarda, yüksek hızlı fotoğraf çekim tekniğini kullanarak, ASJ ile kesilen yüzelerde gözlenen çiziklerin, ASJ ile kesme işleminde mevcut karakteristik olduğunu vurgulamıştır (Liu, 2004). Şekil 4.8' de gösterildiği gibi, kesmede toplam derinlik iki farklı bölümde incelenebilir. Kesme aşınması bölgesi olarak tanımlanan üst kısım, aşındırıcı parçacıkların küçük açılarda yüzeye çarpmalarıyla malzemenin aşındırıldığı bölgedir. Alt bölge, yani deformasyon aşınma bölgesinde ise kararsız bir aşınma söz konusudur. Sürekli malzeme aşınması, büyük çarpma açılarda gerçekleşirken, çizikler veya dalgalı yüzey, kesme cidarında görülmektedir (Zeng, 1992; Franz, 1972; Hashish, 1982).



Şekil 4.8 Aşındırıcı Su Jetinde Aşınma Bölgelerinin Şematik Gösterimi (Liu, 2004)

4.4.2 Aşındırıcı su jetinin dinamik karakteristikleri ve enerjinin dağılımı

Araştırmacılara göre, kesme yüzeyinde gerçekleşen parçacık kinetik enerji dağılımındaki değişim, çizik oluşumuna neden olmaktadır (Jablonowski, 1979). Araştırmacılar çizik oluşumunda iç ve dış olmak üzere iki faktörün etkili olduğunu kabul etmektedirler. Bunlar sırasıyla, i) parçacık kinetik enerjisinin dalgali dağılımına neden olan iç faktörler; ii) jet ilerleme hızı, su basıncı, aşındırıcı debisi, kesme sisteminin titreşimi gibi işleme parametrelerindeki kararsızlık veya dalgalanmalara sebep olan dış faktörlerdir. Aşındırıcı parçacıkların ivmelenmesini sağlayan ASJ' nin, sert malzeme üzerine çarpmasıyla, malzeme aşınması gerçekleşmektedir (Ohlsson, 1995). Aşındırılan malzeme miktarı, parçacıkların kinetik enerjisi ile belirlenir. Parçacığa ait kinetik enerji gerekenden fazla ise, malzemede aşınma başlar. Ancak, jetteki parçacık kinetik enerjisinin dağılımı uniform değildir. Jet kesiti dalgali bir profile sahip olmadığından, özellikle alt kesme bölgesinde uniform olmayan malzeme aşınması görülür. Böylece yüzeyde dalgali çizik oluşur (Jablonowski, 1989). Çok sayıda aşındırıcı parçacığın bulunduğu, yeterli kinetik enerjiye sahip kesme yüzeyinin üst kısmı, çiziklerden arınmış haldedir. İş parçası kalınlığı kesme derinliğinden daha az ise, kesme ön yüzeyi boyunca pürüzsüz yüzey elde edilir. Parçacık iş parçasına daldığında, kesme için gerekli kinetik enerji değerinden daha düşük bir giriş enerjisiyle, malzemenin kesilebileceği Şekil 4.9' da gösterilmiştir. Araştırmacılar, ASJ' de yüzey kalitesini artırmak için, etken salınım tekniğini öne sürmüşlerdir. Ayrıca salınım tekniği kullanılarak, aynı giriş işlem parametreleriyle üst pürüzsüz bölge derinliğinin, seramik malzemelerde salgısızlara göre % 30 arttığını da iddia etmişlerdir. Tüm bu sonuçlar, jetteki parçacık enerji dağılımının çizik oluşumundaki etkisini açıklamaktadır. Kesme ön yüzünde, aşındırıcı parçacık dağılımının ve çizik oluşumundaki etkisinin incelenebilmesi için, nümerik simülasyon yapılabilir (KMT waterjets, 2004). Uniform dağılımda, aşındırıcı parçacığın nozuldan ayrılmasıyla kesme ön yüzeyinde çizige rastlanmaz. Kesilen yüzey üzerinde çizik oluşum nedenlerinin başında, malzeme kalınlığı ve ilerleme hızı gelmektedir. Artan malzeme sertliği ve kalınlığıyla birlikte ilerleme hızı da artırılacak olursa, çapak oluşumuna neden olur. Bu durumda, malzemenin kesilememe sorunu ortaya çıkar (Jablonowski, 1979).

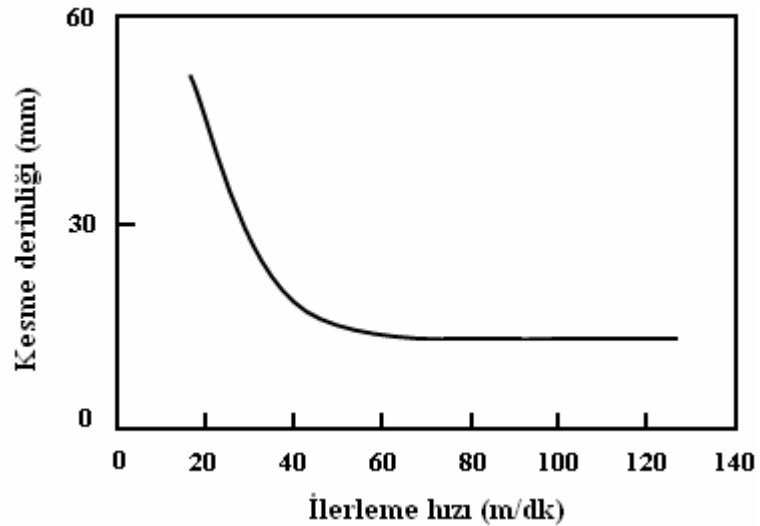


E_0 : İş parçası için kritik yıpranma enerjisi

A: Bu bölgede parçacık enerjisi E_0 ' dan daha büyüktür. Malzeme aşındırılabilir.

B: Bu bölgede parçacık enerjisi E_0 ' dan daha küçüktür. Aşınma mümkün değildir.

Şekil 4.9 Çizik Oluşum Aşamalarının Şematik Gösterimi (Franz, 1972)



Şekil.4.10 İlerleme Hızının Kesme Derinliği Üzerindeki Etkisi (Hashish, 1982)

4.5 Aşındırma Modelleri

ASJ ile kesme işlemiyle birçok araştırmacı yakından ilgilenmiş ve bu konuda çok çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Finnie, (Finnie, 1958, 1960), Van Riemsdijk (Van and Bitter, 1959), Bitter (Bitter et al., 1963a), Sheldon (Sheldon and Kanhare, 1972) Hutchings ve arkadaşları (Hutchings and Levy, 1989), Levy (Levy and Chik, 1983), Hashish (Hashish, 1987a) adlı araştırmacılar aşındırıcı su jetiyle kesme için değişik modeller üzerinde çalışmışlardır. Bunlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

4.5.1 Finnie modeli

Sünek malzemelerin aşındırılması üzerine ilk modellemeyi yapan araştırmacı Finnie, bir atalet yükü ile baskı altında tutulan malzemenin, keskin köşeli aşındırıcı parçacık yardımıyla mikro yapıda kesildiğini iddia etmiştir (Finnie, 1958). V_a hızına sahip parçacık, kesme yörüngesi üzerinde bulunan kesme ağzında, Şekil 4.11' de görüldüğü üzere bir dudak oluşturur. Parçacığın, kütle merkezi etrafında geriye dönük bir θ açısı altında dönerken izlediği yörünge (4.14) ve (4.15) nolu bağıntılar yardımıyla,

$$x_t \cong x + R_a \theta \quad (4.14)$$

ve

$$y_t \cong y \quad (4.15)$$

şeklinde tanımlanır. Parçacık hareketi ise, (4.16–4.18) denklemleriyle ifade edilir.

$$m_a \frac{d^2x}{dt^2} = -R_x \quad (4.16)$$

$$m_a \frac{d^2 y}{dt^2} = -R_y \quad (4.17)$$

$$R_x = b \cdot L \cdot \sigma_f \quad ; \quad L = \psi \cdot y_t \quad (4.18)$$

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -R_a R_x \quad (4.19)$$

Parçacık hareketine ilişkin bağıntıların, zamana göre alınan ikinci türevleri belirtilen koordinat yönünde ivmelenmeyi verir. Malzeme direnç kuvveti (R_x) ve temas boyu (L), (4.18)' de tanımlanmıştır. Malzeme direnç kuvvetinin formüllerinde kullanılan alan ($b \cdot L$)'ye göre çıkarılmıştır. Düşey direnç kuvvetlerinin yatay kuvvetlere oranının ($K = R_y/R_x$) sabit olduğu kabul edilerek, (4.15 – 4.18) arasındaki bağıntılarla birlikte kullanılan bu parametreler yardımıyla, (4.20–4.22) nolu aşınma denklemleri elde edilmiştir.

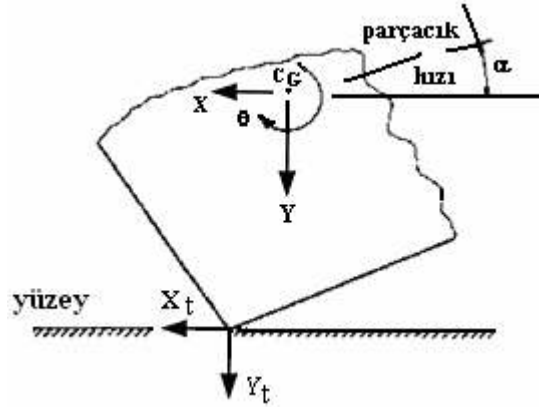
$$m_a \frac{d^2 x}{dt^2} = \sigma_f \cdot \psi \cdot b \cdot y \quad (4.20)$$

$$m_a \frac{d^2 y}{dt^2} = \sigma_f \cdot \psi \cdot b \cdot K \cdot y \quad (4.21)$$

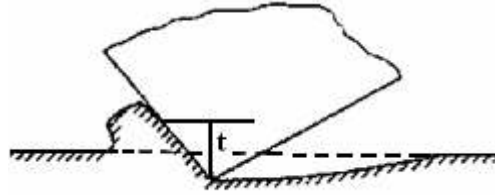
$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \sigma_f \cdot \psi \cdot b \cdot R_a \cdot y \quad (4.22)$$

Başlangıç sınır şartlarında integrali alınan bu bağıntılar düzenlendiğinde,

$$\left. \begin{aligned} t=0 &\Rightarrow \left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= V_a \cos(\alpha), \quad \frac{dy}{dt} = V_a \sin(\alpha) \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_0}{dt} \end{aligned} \right\} \\ \theta=0 &\Rightarrow \left. \begin{aligned} x &= \frac{V_a \sin(\alpha)}{\beta K} \sin(\beta t) + \left[V_a \cos(\alpha) - \frac{V_a \sin(\alpha)}{\beta} \right] t \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (4.23)$$



a) Aşındırıcı parçacığın yüzeye çarpmasının şematik gösterimi



b) Malzeme aşındırılmasının şematik gösterimi

Şekil 4.11 Aşındırıcı Parçacığın Malzemeye Çarpma Şekilleri (Finnie, 1958)

$$y = \frac{V_a \sin(\alpha)}{\beta} \sin(\beta t) \quad (4.24)$$

$$\theta = \frac{m_a R_a V_a \sin(\alpha)}{\beta K} [\sin(\beta t) - \beta t] + \frac{d\theta_0}{d\theta} t \quad (4.25)$$

$$\beta = \left(\frac{\psi \sigma_f b K}{m_a} \right)^{1/2} \quad (4.26)$$

denklemleri elde edilir. (4.24) nolu bağıntıdan hareketle ilk hal için geçerli olan ifade,

$$t^* = \frac{\pi}{\beta} \quad (4.27)$$

(4.27) şeklindedir. Başlangıçtaki açısal hız sıfır alındığında ($x_t = 0$), ikinci halde elde edilen çarpma süresi (4.28)' de verildiği gibidir.

$$\gamma = 1 + \frac{m R_a^2}{I} \text{ olmak üzere, } t^{**} = \frac{1}{\beta} \cos^{-1} \left(1 - \frac{K}{\lambda \tan(\alpha_0)} \right) \quad (4.28)$$

(4.28) nolu bağıntıdaki ifadeler birbirine eşitlendiğinde çarpma açısı, (4.29) denkleminde elde edilir.

$$\alpha_0 = \tan^{-1} \left(\frac{K}{2\lambda} \right) \quad (4.29)$$

Tek bir aşındırıcı parçacık tarafından süpürülen δV hacmi ise,

$$\delta V = \int_0^t y_t dx_t \cong \int_0^t y d(x + R_a \cdot \theta) \quad (4.30)$$

ile hesaplanabilir. x , y ve θ için $\alpha \leq \alpha_0$ ' da, ayrıca $t = t'$ ve $\alpha \geq \alpha_0$ için, $t = t^{**}$ şartı sağlandığında, aşındırılan hacim ifadesi,

$$\alpha \leq \alpha_0 \Rightarrow \delta v = \frac{m_a V_a^2}{\psi \sigma_f K} \left[\sin(2\alpha) - \frac{2\gamma}{K} \sin^2 \alpha \right] \quad (4.31)$$

$$\alpha \geq \alpha_0 \Rightarrow \delta v = \frac{m_a V_a^2}{2\psi K} \left(\frac{\cos \alpha^2}{\lambda} \right) \quad (4.32)$$

olur. (4.32) nolu bağıntı, çarpma açısı (α) sıfıra eşitlenerek, maksimum hacim aşındırılmasına ait ifade (4.33) yardımıyla hesaplanır.

$$\delta v_{\max} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{K}{\lambda} \right) \quad (4.33)$$

Genelde δv_{\max} ve α_0 'ın nümerik değerleri aynıdır. Araştırmacı Finnie, K için “2” değerini önermiştir. Ortalama değeri $(1/2)mr^2$ 'den daha küçük olan atalet momenti (I) için, uygulamada kullanılan değer $(1/3)mr^2$ 'den küçüktür. Finnie'ye göre, aşındırılan malzeme hacmi için çarpım katsayısı (λ); 2~3 arasında değer alırken deformasyon katsayısı (ψ) değeri, yaklaşık “2” mertebesindedir (Finnie, 1960).

4.5.2. Bitter modeli

Araştırmacı Bitter, geliştirdiği modelde enerji denge analizinden yararlanmıştır. Buna göre, parçacığın deformasyon aşınmasına sebep olan normal yöndeki hız bileşeni ile paralel hız bileşeninin oluşturduğu kesik etkisiyle, malzemenin aşındırıldığı iddia edilmektedir. Deformasyon aşınmasında, malzemeye α açısında çarpan parçacığın sahip olduğu kinetik enerjinin normal bileşeni (4.34)'de verilmiştir.

$$\frac{1}{2} m_a (V_a \sin \alpha)^2 = Q_e + Q_0 + Q_p \quad (4.34)$$

Q_0 , Q_a sırasıyla, elastik ve elastik-plastik deformasyon bölgelerinde depolanmış elastik enerjiyi; Q_p ise plastik kesik yaratacak şekilde sürekli kaybolan enerjiyi ifade etmektedir. Bitter'in Hertz teorisine göre plastik deformasyon, (4.35) nolu denklemde verilen V_0 'dan daha küçük jet hızlarında oluşur (Timoshenko and Goodier, 1969).

$$V_0 = \frac{\pi^2 \sigma_y^{5/2}}{2(10)^{1/2} (\rho_a)^{1/2}} \left[\frac{1-V_a^2}{E_a} + \frac{1-V^2}{E} \right]^2 \quad (4.35)$$

Böylece, Hertz teorisine göre malzemedeki elastik dalma ifadesi,

$$h_e = \frac{\pi^2 \sigma_y^2 r_a}{4} \left[\frac{1-V_a^2}{E_a} + \frac{1-V^2}{E} \right]^2 \quad (4.36)$$

şeklinindedir. Elastik-plastik bölge dışındaki elastik enerji (Q_e) ise,

$$Q_e = \left[\frac{5 \rho_a}{2 \rho_y} \right]^{1/2} r_a \cdot V_0 \quad (4.37)$$

dir. Bu enerji, (4.37)' de verilen geometrik ilişkiden görüleceği üzere, elastik çarpmada sınırlayıcı hal için gerekli enerjiye eşittir. Böylece (4.38)' deki bağıntı elde edilir.

$$\pi r_a^2 - \pi r_p^2 = 2 \pi r_a (h_p + h_e) - 2 \pi r_a h_p = 2 \pi r_a h_e = \pi r_e^2 \quad (4.38)$$

Aşındırıcı parçacık kütesine ait elastik enerjiye ilişkin sonuç ifade,

$$Q_e = \frac{1}{2} m_a V_0^2 = \frac{8 \pi}{15} \sigma_y r_a h_e^2 \quad (4.39)$$

şekline dönüşür. Kesik yaratabilmek için sürekli yutulan plastik enerji (Q_p) ise,

$$Q_p = \int_0^{h_p} \pi r_p^2 \sigma_y dh = \int_0^{h_p} \pi (2r_a h) \sigma_y dh = \pi \sigma_y r_a h_p^2 \quad (4.40)$$

şeklindedir. Plastik deformasyon alanında depolanmış elastik enerji ise,

$$Q_e = 0,5 \pi \sigma_y r_p^2 h_e \quad (4.41)$$

dir. (4.41) nolu ifade, (4.34) nolu bağıntıda yerine konulacak olursa, (4.42) nolu bağıntı elde edilir.

$$\left. \begin{aligned} Q_e &= \left[\frac{15}{4} Q_e \cdot Q_p \right]^{1/2} + Q_p \\ Q_p &\cong (Q - Q_e)^2 = \frac{1}{2} m_a (V_a \sin \alpha - V_0)^2 \end{aligned} \right\} \quad (4.42)$$

(4.42) denklemi kullanılarak, deformasyon aşınmasıyla birim hacmi aşındırmak için gerekli enerji hesaplanır. Bu denklemde ikinci terimler ihmal edilerek, (4.43) nolu denklemde verilen deformasyon aşınmasıyla süpürülen parçacık hacmi (δV_d) ifadesine ulaşılır (Timoshenko and Goodier, 1969).

$$\delta V_d = \frac{m_a (V_a \sin \alpha - V_0)^2}{2 \varepsilon_d} \quad (4.43)$$

4.5.3 Kesme aşınması modeli

Kesme aşınması modeli, çarpan parçacığın (x') paralel hız bileşeniyle ilişkilidir. Bu model, kesme sırasında aşındırıcı parçacığın karşılaştığı iki farklı duruma göre oluşturulmuştur. a) parçacığın kesmeyi takiben malzemeden ayrılması, ($x'_f \neq 0$) b) parçacığın belli mesafe kesildikten sonra durması ($x = 0$). Paralel hız bileşeniyle kesme işleminde, birim hacimdeki malzeme aşınması için gerekli enerji dengesi,

$$x'_f \neq 0 \Rightarrow -m_a \frac{dx}{dt} = A' \varepsilon_c \quad (4.44)$$

şeklinde yazılabilir. Kesmenin olduğu alan, parçacık çapı ve kesme derinliği parametreleriyle birlikte değerlendirildiğinde,

$$A' = \frac{4}{3} r_p h_p = \frac{4}{3} \sqrt{d_a} h_p^{3/2} \quad (4.45)$$

(4.45) nolu bağıntı elde edilir. Araştırmacı Bitter, $V_a \sin(\alpha) \leq y' \leq 0$ iken; sinüzoidal fonksiyon kullanmıştır (Bitter, 1963b). Söz konusu fonksiyon, (4.46) ve (4.47)' de verilmiştir.

$$h_p = h_{p,\max} \sin[j(t - t_0)], \quad j = \left(\frac{\pi d_a \sigma_y}{2 m_a} \right)^{1/2} \quad (4.46)$$

$$x'_1 - x'_0 = \frac{0,873 \cdot (4/3) \cdot \sqrt{d_a} \cdot (h_p)^{3/2} \varepsilon_c}{j \cdot m_a} \quad (4.47)$$

$y' = 0$ iken, çarpma öncesi aşındırıcı parçacık hızının paralel bileşeni x'_0 ve x'_1 şeklindedir. $y' = 0$ olan bölgede normal yönde momentum denklemi, (4.48)' de olduğu gibidir.

$$-m_a y' \frac{dy}{dt} = \pi r_p^2 \sigma_y + \frac{2}{3} \pi r_a^2 \sigma_y = \pi d_a y \sigma_y + \frac{2}{3} \pi d_a h_e \sigma_y \quad (4.48)$$

Bu ifadenin $y = h_p$ 'de $y' = 0$ ve $y' = 0$ 'da $y' = y$ için integrali alındığında,

$$y' = j \left[2 (h_p^2 - y^2) + \frac{8}{3} h_e (h_p - y) \right] \quad (4.49)$$

(4.49) denklemi elde edilir. İlgili bölgede $y' = 0$ için paralel hız bileşenindeki düşme,

$$x'_0 - x'_f = \int dx' = \int_{y=0}^{h_p} \frac{dx'}{dt} \left(\frac{dy}{y'} \right) \quad (4.50)$$

ile tanımlanır. İntegrasyonla elde edilen $x'_0 - x'_f$ ifadesine $x'_1 - x'_f$ eklenecek olursa,

$$x'_i - x'_f = \frac{4(d_a)^{1/2} (h_p)^{3/2} \varepsilon_c}{j m_a} [0,873 + f(C)] \quad (4.51)$$

(4.51) denklemi bulunur. (4.51)' deki $f(C)$ değeri ise, (4.52) yardımıyla hesaplanır.

$$f(C) = \int_0^1 \frac{c^{3/2}}{1 - c^2 - \frac{4}{3} \frac{h_e}{h_p} (1 - c)} d_c \quad (4.52)$$

(4.46) nolu bağıntıda verilen “j” ifadesi, (4.49)’ da yerine yazıldığında, (4.53) nolu denklem elde edilir.

$$h_e \cong \frac{(2)^{1/2}}{j} y'_e = \frac{(2)^{1/2}}{j} V_e \quad (4.53)$$

Plastik deformasyonda kesme derinliği ifadesi ise, (4.54) nolu denklem yardımıyla bulunur.

$$h_p = \frac{\sqrt{2} [V_a \sin(\alpha) - V_0]}{j} \quad (4.54)$$

(4.52)’ deki integrali hesaplamak için, (4.53) ve (4.54) nolu bağıntılardaki h_e ve h_p ’ yi kullanarak, (4.51) nolu bağıntı,

$$x'_i - x'_f \cong 2 \cdot C \cdot \varepsilon_c \cdot \frac{[V_a \sin(\alpha) - V_0]^2}{\sqrt{V_a \sin(\alpha)}} \quad (4.55)$$

şekline dönüşür. İfadede kullanılan C değeri ise,

$$C = \frac{0,288}{\sigma_y} \left[\frac{\rho_a}{\sigma_y} \right]^{1/4} \quad (4.56)$$

dir. Bu kısaltmada $(V_a \sin(\alpha)/V_e) \gg 1,5$ kabul edilmiştir. Kesme işlemi sırasında aşındırılan hacim (4.57)’ de olduğu üzere, harcanılan enerjinin malzeme özgül enerjisine bölünmesiyle bulunabilir.

$$\delta V_{c1} = \frac{\frac{1}{2} m_a (V_a^2 \cos^2 \alpha - x_f'^2)}{\varepsilon_c} \quad (4.57)$$

x'_f yerine, $V_a \cdot \cos(\alpha_0)$ konularak elde edilen bağıntı ise, (4.58)' de verilmiştir.

$$\delta V_{c1} = 2 C m_a \frac{[V_a \sin(\alpha) - V_0]^2}{\sqrt{V_a \sin(\alpha)}} \left[V_a \cos(\alpha) - \frac{C (V_a \sin(\alpha) - V_0)^2}{\sqrt{V_a \sin(\alpha)}} \varepsilon_c \right] \quad (4.58)$$

Araştırmacı Bitter'e göre, $x'_f = 0$ için kesme sırasında paralel hız bileşeni ile x'_f ve y' değerleri sıfıra düşer. (4.50) nolu ifade $x'_0 = 0$ için düzenlendiğinde, hacimsel aşındırmayı etkilemeyen depolanmış elastik enerji dikkate alınmadan sadeleştirilmiştir. Parçacığa aktarılan elastik enerji ve aşındırılan hacim, denklem (4.58)' de verilmiştir. h_p ve kesme aşınması (δv_{c2}) değerleri ise, (4.59 – 4.61)' de verilen ifadeler yardımıyla hesaplanabilir.

$$x'_f = 0 \Rightarrow \frac{1}{2} m_a x_2'^2 = \frac{2}{3} \sqrt{d_a} (h_p)^{3/2} h_e \sigma_y \quad (4.59)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} m_a x_f'^2 &= \frac{1}{2} m_a K_1 [V_a \sin(\alpha) - V_0]^{3/2} \\ K_1 &= 0,82 \sigma_y [\sigma_y / \rho_a]^{1/4} \left[\frac{1 - V_a}{E_a} + \frac{1 - V}{E} \right] \end{aligned} \right\} \quad (4.60)$$

$$\delta V_{c1} = \frac{\frac{1}{2} m_a (V_a^2 \cos^2 \alpha - x_f'^2)}{\varepsilon_c} \quad (4.61)$$

(4.59) nolu ifadedeki x_2' 'yi kullanarak elde edilen denklem (4.62)' de verilmiştir.

$$\delta V_{c2} = \frac{\frac{1}{2} m_a [V_a^2 \cos^2 \alpha - K_1 (V_a \sin(\alpha) - V_0)^{3/2}]}{\varepsilon_c} \quad (4.62)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha \leq \alpha_0 &\Rightarrow \delta v = \delta v_d + \delta v_{c1} \\ \alpha \leq \alpha_0 &\Rightarrow \delta v = \delta v_d + \delta v_{c2} \end{aligned} \right\} \quad (4.63)$$

V_0 ve K_1 değerleri ihmal edilip, (4.61) ve (4.62) nolu bağıntılar birbirine eşitlenerek denklem sadeleştirildiğinde, (4.63)' de tanımlanan α_0 kritik açısı bulunur (Bitter, 1963a; 1963b).

$$\frac{\cos \alpha_0}{\sin^{3/2} \alpha_0} = \frac{0,576 (\rho_a)^{1/4} (V_a)^{1/2} \varepsilon_c}{\sigma_y^{5/4}} \quad (4.63)$$

4.5.4. Kararlı hal modeli

Kararlı halde, lokal aşınma miktarının kesme ön yüzüyle uyum içerisinde olması şarttır. Bunun için, (4.64) ve (4.65) nolu denklemler yazılabilir.

$$W = U \cos(\theta) \quad (4.64)$$

$$C_m \frac{d\theta}{ds} = U \cos(\theta) \quad (4.65)$$

Gerçek koordinatlarda kesme şekline ulaşmak için, (4.65) nolu bağıntının integrasyonu ile (4.66) nolu ifade elde edilir.

$$s = \frac{C_m}{U} \ln \left[\frac{1 + \tan(\theta/2)}{1 - \tan(\theta/2)} \right] \quad (4.66)$$

$\theta = 90^\circ$ 'de, maksimum derinliğe ulaşılırken küçük açılarda, en basit modelde, $s = R(\theta - \theta_0)$ ve $R = (C_m/U)$ şeklindedir. C_m ' nin bir fonksiyonu olan (4.66) nolu bağıntıya eğrisellik üst yasası uygulandığında, (4.67) nolu ifadeye ulaşılır.

$$C_m(s) \left[\frac{d\theta}{ds} - \kappa_0 \right]^X = U \cos(\theta) \quad ; \quad C_m(s) = \frac{A'}{1 + \beta \cdot s} \quad (4.67)$$

Buna göre, jette etkili sürtünme jetin hızını düşürür. Maksimum kesme derinliğinin düştüğü bu modelde, $X = 0,5$ ve $\kappa_0 = 0$ için (4.68)' de verilen basit analitik bir çözüm elde edilir.

$$s = R \tan(\theta + \theta_0) \quad (4.68)$$

Kararlı hal modelinde, $R = (C_m/U)^2$, $X = 1$ için, bu ifade (4.66)' da verilen bağıntının tamamlayıcısıdır. Bu modelde kesme yüzeyi eğriselliği, (4.67)' de verilen denklemlerle tanımlanmıştır. Diğer bir ifade ise (4.69)' da verilmiştir. c_1 ve c_2 , eğrisellik fonksiyonunun sabitleridir.

$$U \cos(\theta) = C_m \kappa + \psi \left(c_1 \frac{\partial \kappa}{\partial s} + c_2 \frac{\partial^2 \kappa}{\partial s^2} + \dots \right) \quad (4.69)$$

4.5.5. Dinamik model

Kararlı hal dışındaki kesme şartlarında, kesme hattının ilerleme yönündeki hareketine zaman bağımlılığı da ilave edilecek olursa, (4.70–4.72) bağıntıları

$$W = (U + x') \cos(\theta) \quad (4.70)$$

$$x' = \dot{s} \sin(\theta) \quad (4.71)$$

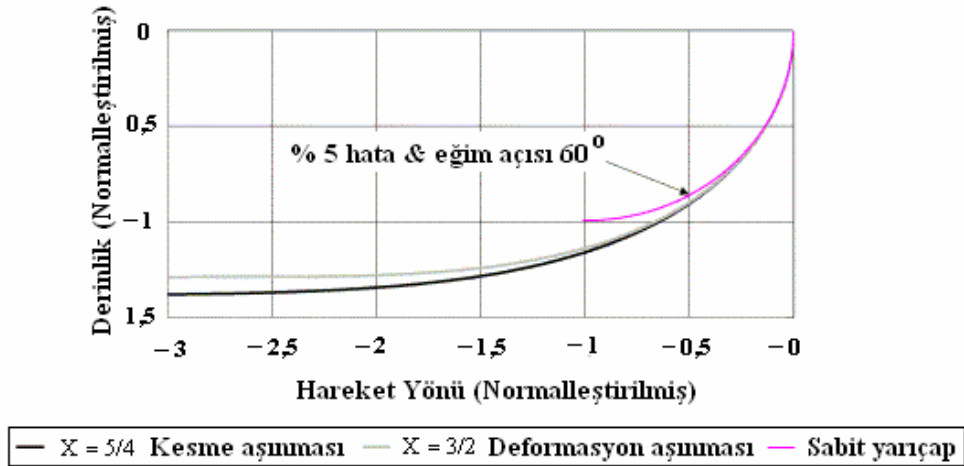
$$C_m(s) \left[\frac{d\theta}{ds} - \kappa_0 \right]^X = [U + \dot{s} \sin(\theta)] \cos(\theta) \quad ; \quad C_m(s) = \frac{A'}{1 + \beta s} \quad (4.72)$$

yazılabilir. (4.72) nolu bağıntının birinci dereceden türevi alındığında, (4.73) elde edilir.

$$\dot{s} = \left[\frac{C_m(s)}{\cos(\theta)} \left(\frac{d\theta}{ds} - \kappa_0^2 \right)^x - U \right] \frac{1}{\sin(\theta)} \quad (4.73)$$

4.5.6. Deformasyon ve kesme aşınması modellerinin karşılaştırılması

Malzeme ve kesme parametreleri göz önünde tutularak, kesme ve deformasyon aşınmaları için eğrilik yarıçapı hesaplanabilir. Kesme yüzeyi şekli her iki aşınma türü için aynı iken, eğrilik yarıçapı ve kesme hızındaki başlangıç açısı farklılık gösterir. Lokal eğrilik yarıçapı ($ds/d\theta$); deformasyon aşınmasında ilerleme hızına $(-0,667)$ 'lik üsle, kesme aşınmasında ise $(-0,8)$ üssü ile bağlıdır.



Şekil 4.12 Farklı Eğrilik Modelleri için Aşınma Tipi – Kesme Yüzeyi Arasındaki İlişki
 {Sabit yarıçapta ($X = 1$) } (Deam et al., 2004)

$$s = R_0 U^A (\theta - \theta_0) \quad ; \quad -0,667 > P_1 > -0,8 \quad (4.74)$$

$$\theta_0 = K \cdot U^{P_2} \quad ; \quad 0,333 < P_2 < 0,4 \quad (4.75)$$

(4.74) ve (4.75)' de kullanılan R_0 ve K , deneylerle tayin edilmiş katsayılardır. Normal şartlar altında kesme ve deformasyon aşınmaları için kartezyen koordinatlarda çizilecek eğri, Şekil 4.12' de gösterilmiştir.

4.6. Kesme aşınmasının çarpma açısı üzerindeki etkisi

Araştırmacı Bitter, yaptığı çalışmada çarpma sayısı üzerinde aşınma miktarını, (4.76)' da olduğu üzere,

$$W_t = W_D + W_C \quad (4.76)$$

şeklinde açıklamıştır (Bitter, 1963a; Finnie, 1958). İfadede yer alan W_D değeri ise,

$$W_D = \frac{1/2 \dot{M} (V \sin \alpha - K)^2}{\varepsilon} \quad (4.77)$$

dir. α_0 kritik çarpma açısından daha küçük çarpma açılarındaki kesme aşınması için gerekli ifade, (4.78)' de olduğu üzere düzenlenebilir.

$$W_{C1} = \frac{2 \dot{M} C (V \sin \alpha - K)^2}{\sqrt{V \sin \alpha}} \left(V \cos \alpha - \frac{C (V \sin \alpha - K)^2}{\sqrt{V \sin \alpha}} \rho \right) \quad (4.78)$$

Kesme kanalı eğriliğindeki çarpma miktarına göre tahmin edilen çarpma açısını da içeren aşınma ifadeleri (4.79–4.81) denklemleriyle verilmiştir.

$$W_t = \dot{M} \left[\frac{(V\alpha - K)^2}{2\varepsilon} + \frac{2C(V\alpha - K)^2}{\sqrt{V\alpha}} \left(V - \frac{C(V\alpha - K)^2}{\sqrt{V\alpha}} \rho \right) \right] \quad (4.79)$$

$$W_t = \frac{\dot{M}}{2^2 wh} \alpha \left[\frac{(V\alpha - K)^2}{2\varepsilon} + \frac{2C(V\alpha - K)^2}{\sqrt{V\alpha}} \left(V - \frac{C(V\alpha - K)^2}{\sqrt{V\alpha}} \rho \right) \right] \quad (4.80)$$

$V\alpha \gg K$ kabul edilerek denklem sadeleştirildiğinde, (4.81) nolu bağıntı elde edilir.

$$W_t = \frac{\dot{M}}{4wh} \alpha \left[\frac{(V\alpha)^2}{2\varepsilon} + 2CV(V\alpha)^{3/2} \right] \quad (4.81)$$

4.7. Aşındırıcı Su Jetinin Modellenmesi

4.7.1. Lineer aşındırıcı su jetiyle kesme sisteminde basitleştirilmiş modelleme

Sünek malzemeler için aşındırıcı parçacıkların düşük çarpma açılarında aşındırma hacmi, δv 'nin $\delta \dot{v}$ ile m_a 'nın ise dm_a ile yer değiştirilmesi sonucunda elde edilen (4.84) nolu ifade ile hesaplanabilir. $\psi = 2$, $K = 2$ ve $I = 0,5 m_a r_a^2$ değerleri kullanılarak elde edilen $\delta \dot{v}$ hacmi,

$$\delta \dot{v} = \frac{dm_a V_a^2}{4\sigma_f} [\sin(2\alpha) - 3\sin^2(\alpha)] \quad (4.82)$$

(4.82) ile hesaplanır. Küçük çarpma açılarında, (4.82)'deki $\sin(2\alpha)$ terimi 2α şeklinde yazılarak ihmal edilebilir. Sonuç ifade,

$$\delta \dot{v} = \frac{dm_a V_a^2}{2\sigma_f} \alpha \quad (4.84)$$

şeklinindedir. (4.84) nolu ifadedeki dm_a değeri ise,

$$d\dot{m}_a = \dot{m}_a (dx/d_j) \quad (4.85)$$

dir. Aşındırıcı parçacıkların jet içerisinde uniform olarak dağıldığı düşünüldüğünde, (4.84) nolu ifade (4.85) nolu ifadede yerine yerleştirilerek, (4.86) denklemi elde edilir.

$$\delta\dot{v} = \left[\frac{\dot{m}_a}{d_j} \right] (dx) \left[\frac{V_a^2}{2\sigma_f} \right] (\alpha) \quad (4.86)$$

Kararlı hal şartlarında yeniden düzenlenen (4.86) bağıntısıyla ulaşılan ifade,

$$\delta\dot{v} = dh \cdot u \cdot d_j \quad (4.87)$$

şeklindedir. Küçük standof mesafelerinde kesik eninin jet çapına eşit olduğu düşünülmüştür. Kesik üstündeki çarpma açısı α_t ' dir. Parçacık sapmasının sonucu olarak, kesme aşınmasından dolayı elde edilen kesik ucunda, söz konusu açı sıfıra düşer. Bu değişimin lineer olduğu düşünüldüğünde ulaşılan ifade,

$$\frac{d\alpha}{dx} = -\frac{\alpha_t}{c d_j} \quad (4.88)$$

$$dx = -c d_j \left[\frac{d\alpha}{\alpha_t} \right] \quad (4.89)$$

olur. (4.89) nolu ifade, (4.86) nolu ifadede yerine yazıldığında,

$$\delta\dot{v} = -c d_j \left[\frac{d\alpha}{\alpha_t} \right] \frac{V_a^2 \alpha}{2\sigma_f} \quad (4.90)$$

elde edilir. Bu ifade (4.87) nolu ifadeye eşitlenip, $dh/dx = (dh/d\alpha)(d\alpha/dx)$ 'in integrali alındığında elde edilen kesme derinliği (h_c) değeri, (4.91)' de tanımlandığı gibidir.

$$h_c = \frac{c \dot{m}_a V_a^2 \alpha_t}{4 \sigma_f d_j u} \quad (4.91)$$

(4.92)' de tanımlandığı gibi $h = 0$ kabul edilerek, (4.85) ve (4.86) bağıntıları kullanılarak α_t açısı tayin edilebilir. Elde edilen sonuç ifade (4.93)' de verilmiştir.

$$\left. \frac{dh}{dx} \right|_{h=0} = \frac{\dot{m}_a V_a^2 \alpha_t}{2 \sigma_f d_j^2 u} \quad (4.92)$$

$$\alpha_t = \left. \frac{dx}{dh} \right|_{h=0} \quad \text{için} \quad \alpha_t = \left[\frac{2 \sigma_f d_j^2 u}{\dot{m}_a V_a^2} \right]^{1/2} \quad (4.93)$$

Bu ifade (4.91)' de yerine yazıldığında, (4.94) nolu denklem

$$h_c = c \left[\frac{\dot{m}_a V_a^2}{8 \sigma_f u} \right]^{1/2} \quad (4.94)$$

bulunur. (4.93) nolu ifade ile, kesme aşınmasının kesme işlemine katkısının olup olmadığı anlaşılır. Bu ifade yardımıyla bulunan α_t açısı α_0 kritik açısından büyükse, kesme aşınması oluşmaz. Hatta tüm kesme işlemi deformasyon aşınmasının etkisi altında kalır. Araştırmacı Finnie' ye göre, aşağıdaki bağıntı yardımıyla kritik açı değeri hesaplanabilir (Finnie, 1958).

$$\alpha_0 = \tan^{-1} \left(\frac{K}{6} \right) \cong \frac{\pi}{10} \quad ; \quad K = 2 \quad (4.95)$$

Kesme aşınması söz konusu olduğu sürece c katsayısı,

$$c = 1 - \frac{\alpha_t}{\alpha_0} \quad (4.96)$$

dir. Deformasyon aşınmasıyla elde edilen kesme derinliğini hesaplamak için δv yerine $\delta \dot{v}$ ve $(1-c)\dot{m}_a$ yerine \dot{m}_a yazılıp, $V_a \sin(\alpha)$ eşitliğinde $\alpha = 90^\circ$ alınarak elde edilen sonuç ifade (4.97)'de verildiği gibidir.

$$\delta \dot{v} = \frac{\dot{m}_a (1-c) V_a^2}{2 \varepsilon_d} \quad (4.97)$$

$(1-c)\dot{m}_a$ değeri, deformasyon aşınmasında malzeme aşındırılmasına katılan aşındırıcıların oransal kütleleridir. Bu durumda, hacimsel aşındırma miktarı (4.98) ile hesaplanır.

$$\delta \dot{v} = \left[\frac{\pi}{4} d_j^2 \right] \frac{dh}{dt} \quad (4.98)$$

(4.92) ve (4.93) nolu bağıntıların birleştirilmesiyle (4.99) ve (4.100) denklemleri

$$\int_0^{h_d} dh = \frac{\dot{m}_a (1-c) V_a^2}{2 \varepsilon_d} \int_0^{d_j/u} dt \quad (4.99)$$

$$h_d = \frac{2 \dot{m}_a (1-c) V_a^2}{\pi \varepsilon_d u d_j} \quad (4.100)$$

elde edilir. (4.99) ve (4.100) nolu bağıntıların birleştirilmesiyle elde edilen toplam kesme derinliği (boyu) değeri, (4.101) denklemiyle hesaplanabilir.

$$h = c \left[\frac{\dot{m}_a V_a^2}{8 \sigma_f u} \right] + \frac{2 \dot{m}_a (1-c) V_a^2}{\pi \varepsilon_d u d_j} \quad (4.101)$$

(4.102) nolu eşitlik, aşındırıcı parçacık hızının basit momentum bağıntısından yararlanılarak yazılmıştır.

$$\dot{m}_w V_w = (\dot{m}_w + \dot{m}_a) V_a \quad (4.102)$$

$p \propto (1/2) \cdot \rho_w \cdot V_w^2$ ifadesi, (4.101) nolu denklemlerle birleştirildiğinde elde edilen bağıntı (4.103)' de verilmiştir.

$$h = \frac{c}{2(1+R_a)} \left[\frac{\dot{m}_a p}{\rho_w \sigma_f u} \right]^{1/2} + \frac{4\dot{m}_a (1-c) p}{\pi \rho_w \varepsilon_d u d_j (1+R_a)^2} \quad (4.103)$$

İfadede ilk terim kesme aşınmasını, ikinci terim ise deformasyon aşınmasının etkisini ifade etmektedir. Yukarıdaki analizde, aşındırıcı parçacık hızının yörünge boyunca sabit kaldığı ve bu hızın sıvı ve parçacık arasındaki momentum değişiminden elde edildiği kabul edilmektedir (Finnie, 1958; 1960).

4.7.2. Geliştirilmiş aşındırıcı su jetiyle kesme modellemesi

Araştırmacı Hashish tarafından düzenlenen daha önceki modellemede, aşındırıcı parçacık şekli ve yoğunluğu dikkate alınmamıştır. Geliştirilen modellemede yapılan ana değişiklikler sırasıyla, a) dalma derinliği ele alındığında, Bitter'in erozyon modellemesinde olduğu üzere, malzeme direnç kuvvetleri zamanın bir fonksiyonu olarak kabul edilmesi (Bitter, 1963b), b) gerçek şartlara çok yakın olmak üzere değiştirilen aşındırıcı parçacık malzeme temas geometrisinin x, y ve θ yönlerinde olduğunun kabul edilmesi. Bu kabullere göre elde edilen hareket bağıntıları, (4.104–4.106) denklemleriyle ifade edilmiştir (Hashish, 1987b).

$$m_a \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{4}{3} \sigma_f y (ydc)^{1/2} \quad (4.104)$$

$$m_a \frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{\pi}{2} \sigma_f y dc \quad (4.105)$$

$$m_a \frac{d\theta^2}{dt^2} = \frac{2}{3} \sigma_f d_a y (ydc)^{1/2} \quad (4.106)$$

Başlangıçtaki şartlar, $t = 0$ 'da; $y = 0$ ve $y = V_a \sin(\alpha)$ ve $t = 0$ 'da; $x = 0$ ve $x = V_a \cos(\alpha)$ iken, $x_t = x - d_a \theta / 2$ ' dir. (4.107–4.110) nolu denklemler çözülerek, parçacık ucuna ait yörünge elde edilir (Hashish, 1987b).

$$y = \frac{V \sin(\alpha)}{\beta_1} \sin(\beta_1 t) \quad (4.107)$$

$$\dot{x}_t = \left[V_a \cos(\alpha) - \Omega \left(\frac{V_a \sin(\alpha)}{\beta_1} \right) \right] \int_0^t (\sin \beta_1 t)^{3/2} dt \quad (4.108)$$

$$\beta_1 = \left(\frac{\pi \sigma_f d_c}{2 m_a} \right)^{1/2} \quad (4.109)$$

$$\Omega = \frac{8 \beta_1^2}{3 \pi (d_c)^{1/2}} \left[1 + \frac{m_a r_a^2}{I} \right] \quad (4.110)$$

Araştırmacı Bitter'in geliştirdiği kesme aşınması analizine benzer şekilde, parçacık–iş parçasına ait oluşabilecek durumlar üç madde halinde tanımlanabilir (Bitter, 1963b). Bunlar sırasıyla; a) Parçacığın malzemeden ayrılması $\alpha < \alpha_0$ ' da gerçekleşir. b) Parçacık hızının yatay bileşeni sıfır, düşey bileşeni ise negatif olduğunda, parçacık geri sıçramaktadır. Yani $\alpha_0 < \alpha < \alpha_1$ oluşmaktadır. c) Düşey bileşen pozitif kaldığı süre içinde bile, parçacık hızının yatay bileşeni sıfıra düşer. Araştırmacı Hashish tarafından ifade edilen aşındırılan hacim, (4.111)' de verilmiştir (Hashish, 1987b).

$$\delta \dot{v} = \frac{7}{\pi} \frac{R_f^3 m_a}{\rho_a} \left[\frac{V_a}{V_c} \right]^{5/2} \sin(2\alpha) \sin^{1/2}(\alpha) \quad (4.111)$$

Bu ifadede (4.111), kesme aşınma bölgesinde oluşan çekme ihmal edilmiştir. Köşeli aşındırıcı parçacığın ortalama çapı ve deformasyon bölgesindeki aşındırıcı çapı kullanılarak elde edilen yassılık oranı,

$$R_f = \frac{d_c}{d_a} \quad (4.112)$$

dir. Karakteristik hız (V_c) değeri, (4.113) nolu bağıntı tarafından bulunur.

$$V_c = \left[\frac{3\sigma_f R_f^3}{\rho_a} \right]^{1/2} \quad (4.113)$$

Parçacığın malzemeden sıçraması halinde, aşındırılan hacim,

$$\delta v = \frac{\pi d_c^3}{4} \left[\frac{V_a}{V_c} \right]^2 \cos^2(\alpha) \left[1 + \gamma \frac{(\alpha - \alpha_0)}{(\alpha_1 - \alpha_0)} \tan^2(\alpha) \right] \quad (4.114)$$

(4.114) ile hesaplanacaktır. Bu ifade, sınır şartlarını sağlayan ancak teorik bir çözümdür. Bu çözüm, trigonometrik fonksiyonun cebirsel olanla eşitlenmesiyle elde edilebilir. Parçacığın büyük açılarda çarpması halinde yani, parçacığın malzemeye daha fazla nüfuz ettiği durumda elde edilen aşındırılan hacim için, (4.115) nolu ifade kullanılabilir.

$$\delta v = \frac{\pi d_c^3}{4} \left[\frac{V_a}{V_c} \right]^2 \sin^2(\alpha) \left[2 - \frac{(\pi/2 - \alpha)}{(\pi/2 - \alpha_1)} + \frac{1}{\gamma \tan^2(\alpha)} \right] \quad (4.115)$$

Araştırmacı Hashish (4.111) nolu ifadeyi, kesme aşınmasında dalma derinliği için verilen basitleştirilmiş modellemede yerine yazarak, (4.116) nolu bağıntıyı elde etmiştir (Hashish, 1989a). Araştırmacı Hashish' in yaptığı çalışmalar özetlenecek olursa; kesme aşınmasında olduğu üzere, küçük çarpma açılarında $\sin(2\alpha) \cong 2\alpha$ ve $\sin(\alpha) \cong \alpha$ yazılacağından (4.111) nolu ifade,

$$\delta \dot{v} = \frac{14}{\pi} \frac{d\dot{m}_a}{\rho_a} \left[\frac{V_a}{V_c} \right]^{5/2} (\alpha)^{1,5} \quad (4.116)$$

şekline dönüşür (Hashish, 1989a). Bulunan bu ifadeyi (4.85) nolu ifadede yerine yerleştirip, sonuç denklemi (4.86) nolu ifadede yerine koyacak olursak,

$$\int_0^{h_c} \frac{dh}{(V_a/V_c)^{5/2}} = \frac{c d_j}{2,5} \left[\frac{14 \dot{m}_a}{\pi u d_j^2 \rho_a} \right] \alpha_t^{1,5} \quad (4.117)$$

eşitliği (4.118) elde edilir. Benzer düzenlemelerle, (4.117)' de kullanılan kesme üst yüzeyindeki çarpma açısı da (4.118) yardımıyla hesaplanabilir.

$$\alpha_t = \left[\frac{u d_j^2 \rho_a}{14 \dot{m}_a} \right]^{5/2} (V_a/V_c) \quad (4.118)$$

elde edilir. Aşındırıcı parçacık hızının sabit olduğu kabul edilerek, (4.116) ve (4.117) nolu bağıntılar birleştirildiğinde kesme derinliğine ilişkin ifade,

$$h = \frac{c d_j}{2,5} \left[\frac{14 \dot{m}_a}{u d_j^2 \rho_a} \right] (V_a/V_c) \quad (4.119)$$

şeklinde yazılabilir. c sabiti (4.96) nolu bağıntıdan bulunabilir. Bu sonuçlar α_t ve δv için düzenlenmiştir (Hashish, 1989a). Genelde kesme aşınma derinliği (h_c), oldukça küçük olduğu için, aşındırıcı su jetinde cidar sürtünmesinden dolayı oluşan ivmelenme ihmal edilebilir. Deformasyon aşınması derinliği daha önce verilen denklemler yardımıyla hesaplanabilir. Cidar sürtünmesi de dikkate alınarak momentum denge bağıntısı (4.120)' de olduğu üzeredir. Bu ifadede aşındırıcı su jetinde, aşındırıcıların ve suyun aynı hıza sahip oldukları kabul edilmektedir.

$$(\dot{m}_a + \dot{m}_w) \bar{V}_j = (\dot{m}_a + \dot{m}_w) V_a - F_f \quad (4.120)$$

Sürtünme kuvveti (F_f) değeri ise, (4.121) ile hesaplanır. Görüleceği üzere, ifadede (4.120) parçacık hızı sabit alınarak denklem sadeleştirilmiştir.

$$F_f = C_f A_w \frac{\rho_j \bar{V}_j^2}{2} \quad (4.121)$$

Jet kesme alanı ise,

$$A_w = \frac{\pi d_j h}{2} \quad (4.122)$$

şeklinde ifade edilir. (4.120) ve (4.121) nolu bağıntılar düzenlenerek, elde edilen aşındırıcı parçacık hızı,

$$V_a = \bar{V}_j - \left[\frac{\pi C_f}{4(\dot{m}_a + \dot{m}_w)} \right] (d_j \rho_j h V_j^2) \quad (4.123)$$

olur. Böylece, aşındırılan hacim için kullanılacak sonuç ifade,

$$\int_0^{h_a} \frac{dh}{(1 - K_w q h)^2} = \frac{2(1-c) \dot{m}_a (V_j - V_0)^2}{\pi \sigma_f u d_j} \quad (4.124)$$

dir. Yutma katsayısı (K_w) değeri ise, (4.125) yardımıyla hesaplanabilir.

$$K_w = \frac{C_f}{d_j} \quad (4.125)$$

$$q = \frac{V_j}{(V_j - V_0)} \quad (4.126)$$

(4.111) nolu denklemin integrali alınarak, deformasyon aşınmasından dolayı kesme derinliğini de içine alan toplam kesme derinliği ifadesi, (4.127)' de verildiği gibi tanımlanacaktır (Hashish, 1989b).

$$h = \frac{1}{\frac{\pi \sigma_f u d_j}{2(1-c) \dot{m}_a (V_j - V_0)^2} + \frac{C_f}{d_j} \frac{V_j}{(V_j - V_0)}} \quad (4.127)$$

4.8. Aşındırıcı Su Jeti Sistemlerinde Ses Oluşumu

➤ Ses oluşum kaynakları

ASJ sisteminde oluşan seslerin genelde beş ayrı kaynaktan ileri geldiği iddia edilir. Bunlar sırasıyla,

1. ASJ ile kesme kafası arasındaki ortak yüzeyde,
2. ASJ sisteminin kesme kafası ile malzeme arasında hava ortamından geçişi sırasında,
3. Malzeme aşındırma bölgesinde jet ile iş parçasının oluşturduğu ortak yüzeyde,
4. Kesme ortamıyla toplayıcı tankın oluşturduğu ortak yüzeyde oluşan sesler ve
5. Ortamdan yayılan seslerdir.

İlk kaynakta oluşan sesler; a) yüksek basınçlı su ile orifisin yarattığı ortak yüzeyde, b) aşındırıcı ile su jetinin karıştırıldığı karıştırma odasında ve jet ile karıştırma odası iç cidarında oluşturulan ortak yüzeyde oluşan sesler ile aşındırıcı taneciklerle emilen havanın çıkaracağı seslerdir. İkinci kaynakta oluşan sesler ise; a) hava ortamında jet yüzeyindeki dalgalanmadan kaynaklanan sesler, b) karışma işlemi sırasında emilen havanın genişmesinin doğuracağı sesler, c) yüksek hızlı paçacıklarla jet etrafındaki havanın ortak yüzeyinin neden olacağı sesler, d) jetteki türbülansın etkisiyle oluşan sesler ile jet etrafında oluşacak vorteksin neden olacağı seslerdir. Üçüncü kaynakta oluşan sesler ise oldukça karmaşık olup, işlem parametrelerine ve malzeme özelliklerine bağlıdır. Ses, genelde aşındırıcı paçacıkların malzeme üzerine çarpmasıyla, malzeme üzerinde oluşan çatlaklardan dolayı ortaya çıkmaktadır. Yapılan tüm çalışmalarda üretilen ses ile standof mesafesi arasında yakın bir ilişki tespit edilmiştir. Bu ilişkiye göre, standof mesafesindeki artışla birlikte ses üretimi de artmaktadır (Hashish, 1982).

Anahtar ses kaynakları ve çevreyi – sağlığı etkileyen sesler,

- ASJ ile kesmede arka planda oluşan sesler,
- Odaklama tüpünün çıkışındaki sesler,
- Kesme işlemindeki sesler,
- İş parçasından atık malzeme çıkışı sırasında oluşan sesler şeklinde özetlenebilir.

ASJ ile kesme sisteminde, sistemin teknik ve ekonomik performansını etkileyen nozul en kritik parçalardan birisidir. Nozulda aşınma, kademeli olarak artan iç çapla tanımlanır. Çap büyüdükçe karıştırma işleminde sorunlarla karşılaşıldığı için, kesme kabiliyeti ve buna bağlı olarak kesme yüzey kalitesi de düşer. Nozul çapının değişmesi akış debisini etkileyeceğinden, akustik sinyal seviyesi ve deseni de değişir. ASJ ile yapılan çalışmalarda üretilen seslerle ilişkili olarak elde edilen bilgiler aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

1. Yüksek frekanslı enerji (4000–8000 Hz), su jeti ses spektrumuna sahiptir. Jet üretim ünitesi, düşük frekanslı ses üretim kaynağıdır (Burnham, 1990).
2. Su jetinin ses emisyonu basınçla artar. Bu artış özellikle orta-yüksek değerlerdeki frekans aralığında görülür. 1 kHz' in üzerindeki çalışma basınçlarında, her 200 bar'lık artışa karşılık ses şiddetindeki artış 9 dB olmaktadır. Daha alt değerlerdeki frekans aralığında ise, 200 bar'da 6 dB' lik bir artış gözlenmiştir (Burnham, 1990).
3. Sabit su basıncında ses emisyonu, nozul çapıyla artar. Orta frekans değerlerinde 0,5~1,2 mm' lik çap artışları için, 10–15 dB' lik bir artış söz konusudur (Hashish, 1982). Ses emisyonu, nozul ile malzeme arasındaki standof mesafesine bağlıdır. Jet boyuyla ses şiddeti doğru orantılıdır. Yuvarlak jet nozullarının kullanımında, orta-yüksek frekans aralığında ses şiddeti standof mesafesiyle artmaktadır (Hashish, 1993).

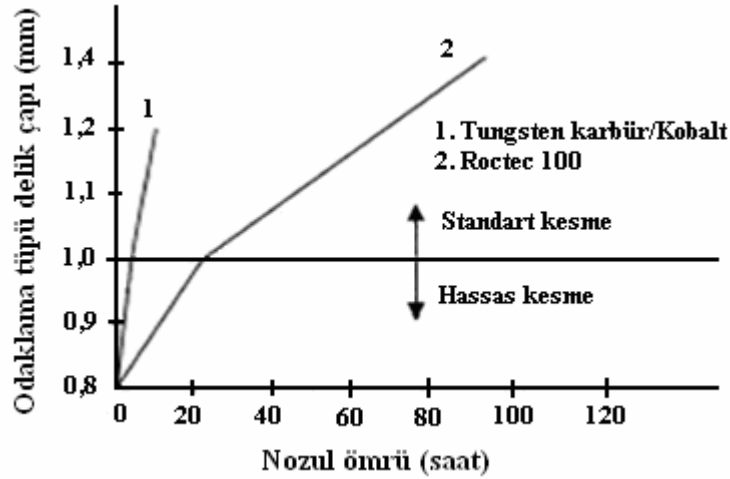
4.9. Aşındırıcı Su Jeti Sistemlerinde Maliyet Analizi

4.9.1. Kesme ve işleme maliyetini etkileyen parametreler

Bilineceği üzere, aşındırıcı maliyeti başta gelen faktörlerden birisidir. Kaliteli aşındırıcı seçimiyle işleme süresi dolayısıyla maliyet düşecektir. Yüksek kesme hızına ulaşmak için, 60 veya 80 meş gibi daha kaba taneli aşındırıcılar seçilmelidir. Yüzey kalitesini artırmak için 100, 120 veya 150 meş boyutunda daha küçük taneli aşındırıcılar tercih edilmelidir. Aşındırıcı jetler bazı malzemelerde dalma, bazı malzemelerde ise tabakalara ayırma sorunu yaratabilir. Malzeme işlemede seçilmiş ünite için tanımlanan

hız aralığında, ASJ ile kesme işleminde 750 cm/dk'lık ilerleme hızlarına ulaşmak mümkün olmakla birlikte, 250 cm/dk'ı aşan hızlarda yapılan kesme işlemine pek rastlanmamaktadır. Çünkü işlemede kesme hızı, sınırlayıcı ana faktördür. Geri dönüş hızının daha yüksek olması istenir. Ancak bu hızın kesme üzerindeki etkisi, ilerlemeye göre çok daha düşüktür. Sade su jetiyle kesmede daha yüksek hızlar gerekir. Basınçlı su üretiminde kullanılacak en uygun pompa kapasitesi, yapılacak işe bağlıdır. Kalın malzeme işleniyorsa, nozula daha büyük güç aktaracak bir pompa; yumuşak ve daha ince malzeme işlenecek ise, daha küçük kapasiteli pompa seçilmelidir. Bilindiği üzere ASJ ile kesmede kesme işlemi, kesme kafasından çıkan su jetiyle gerçekleştirilir. Ancak benzer çok sayıda parça işlenecek ise, birden fazla kafa kullanılabilir. Kafanın arızalanması halinde sistemde durma söz konusu olacağından, çok kafa kullanımında arızalı kafa devreden çıkarılıp işlemeye devam edilebilir. ASJ ile kesme işlemlerinde nozuldaki güç çok daha önemli olduğundan, motor gücü yerine nozul veya kesme gücünden söz edilir. Nozulda üç kritik ölçü söz konusudur. Bunlar sırasıyla orifis çapı, karıştırma borusu çapı ve karıştırma borusu boyudur. Orifis; yüksek basıncın olduğu, havanın nozula girdiği ve karıştırma odasına yüksek hızla gelen suyun basıncının artırıldığı birimdir. Orifis çapı büyüdükçe, daha yüksek debi ile birlikte gerekli basıncı sağlayabilmek için, daha güçlü bir pompaya ihtiyaç duyulur (Kulekci and Güray, 2000). Aşınma süresi, kesme kalitesi ve kesme süresinin belirlenmesinde karıştırma borusu çapı etkilidir. Çünkü karıştırma borusu çapı, kesik çapıyla doğrudan ilişkilidir. Küçük çap kullanıldığında, kesme miktarı ve kesme hassasiyeti artarken çalışma ömrü ve kesik eni azalmakta, büyük çap kullanıldığında ise kesme miktarı ve kesme hassasiyeti düşmektedir. Karıştırma borusu boyu, nozulun odaklama kabiliyetini doğrudan etkiler. Uzun borular, kısa olanlara göre daha iyi odaklama yaparlar. Aşındırıcı kullanarak gerçekleştirilen işlemlerde, işlem sonrası açığa çıkan atıklar sorun yaratabilir. Bunlar; parçalanmış aşındırıcı parçacıklar, kesilen malzeme talaşı ve kirli sudan oluşur. Kurşun gibi zehirli malzemelerde olduğu üzere, katı parçacık içeren aşındırıcı atıkların toprağa gömülmesinde de gerekli önlemler alınmalıdır. Kirlenen su, genellikle gri renktedir. Kirlenen su, filtre edildikten sonra tekrar kullanılırsa da özellikle gıda sanayinde zehirlenme söz konusu olduğu için dikkat edilmelidir (Kulekci and Güray, 2000). Her parçacık, aşındırıcı su jetine düşük bir hızda girerek ivmelendirildikten sonra, odaklama tüpünün iç cidarına çarpar. Bu çarpışma, aşındırıcı parçacıkların hız bileşenleri su

jetine paralel oluncaya kadar devam eder (Raissi et al., 1996). Odaklama tüpünün çalışma karakteristiği, giriş bölgesinin geometrisine ve odaklama tüpünün i çapına bağlıdır (Labus, 1991). İ ap küçüldükçe toplam enerji yoğunluğu artar. Ancak odaklama tüpüne ait minimum çap değeri, parçacık boyutuna bağlı olarak değişir. Güvenilir alışma için odaklama tüpü çapı, parçacık çapının beş katı veya daha üstünde olmalıdır (Labus, 1991). Uzun tüplerde, kısa olanlara göre daha yapışık hüzme elde edilmekle beraber, i kısımda daha büyük cidar sürtünmesi oluştuğu için jet hızı düşmektedir ( jmerts et al., 1994; Hashish et al, 1993). Uzun süre güvenilir ve kararlı kesme işlemi sağlayabilmek için t p malzemesi olarak, gelişmiş aşınmaya karşı dayanıklı malzeme kullanılmalıdır. Şekil 4.13' de gösterildiği üzere, kesme işleminde kullanılan aşındırıcılar, karbür tüpte bile aşınma meydana getirebilirler. Malzeme işlenmesi sırasında aşındırıcı parçacık, odaklama tüpü yardımıyla belirgin bir Şekil değişikliğine uğrasa bile, hassas kesme kesinlikle gerçekleşmez. Yeni geliştirilen malzemelerle t p ömrü artırılmaktadır. Nozul dizaynında ve malzemedeki gelişmeler, kesme hızında ve hassasiyet değerlerinde artış sağlamaktadır (Boride Inc.,1996).



Şekil 4.13 Farklı Malzemelerden İmal Edilmiş Odaklama Tüplerinde alışma  mr 
(Boride Inc.,1996)

ASJ, malzeme içinden geçerken başlangıç enerjisinin % 75'lere varan kısmını, jet içerisinde bırakır (Kalpakjan, 1995). Ancak ASJ, malzeme ile karşılaşmazsa jetin sahip olduğu tüm enerji yakalayıcıya ulaşacağından yakalayıcının sağlam, güvenilir ve uzun ömürlü olması gerekir. İşleme düzeni, iş parçası geometrisi düzeneğinin bulunduğu ortam, çevresel gereksinimler ve kullanılan jet türü dikkate alınarak, yakalayıcı tipi belirlenir (Summers, 1991). Seyyar bir yakalayıcı içerisinde genellikle çelik bilyalara benzer, enerji yutucu elemanlar bulunan küçük tüp veya kutular mevcuttur. Enerji yutucu malzemeler harcandığı için, ara sıra yakalayıcıdaki kutuların yeniden doldurulması gerekecektir. Yakalayıcıdaki aşınmayı önleyebilmek için, koruyucu taban malzemesi gerekir. İş parçası sabit ve kesme kafası düşey-yatay yönlerde hareketli olduğu zaman, tank şeklinde yakalayıcı kullanılır. Yakalayıcı kesme tablası sınırlarını tanımlayan tank boyutu, çalışma alanına eşittir (Summers, 1991). Tank için öngörülen su yükü 0,6 m civarındadır. Yakalayıcı, iş parçasının ve nozul elemanlarının tek yönde ilerlediği durumlarda kullanılır. ASJ sistemlerinde kullanılan aşındırıcılar, nehir veya kum yataklarından seçilebilir. Ayrıca kayaç yataklarından çıkarılıp, kırıcılarla değişik boyda keskin şekilli aşındırıcılar elde etmek de mümkündür. Aşındırıcı parçacık olarak farklı garnet taşları $[Fe_3Al_2, SiO_4]_3$ kullanılarak farklı verim değerleri elde edilir (Öjmerts, 1993; Ohman, 1993). Yumuşak malzemeler için, daha ucuz olması nedeniyle zeytin çekirdeği bile kullanılabilir. Bu durumda kesme veriminde düşüş görülmesi de mümkündür. Alüminyum oksit veya silikon karbür gibi aşındırıcılar, elektro-füzyon metoduyla imal edilmektedirler. Bunlar, yüksek kesme verimine sahip işlemede tercih edilen keskin, sert ve tepkili aşındırıcılardır. Kullanımda karşılaşılan tek sorun, karıştırma tüpünün çok hızlı aşınmasıdır. Aşındırıcılar için yapılan yeni çalışmalarda, suda eriyebilen türlere ulaşılmıştır. Suda eriyebilen aşındırıcılar, iş parçası üzerinde parçalanabilmekte ve su akımıyla eriyip uzaklaşmaktadırlar (Woodward, 1993). Uygulamada çok ince taneli aşındırıcı gerektiğinde (220 meş~0,065 mm), aşındırıcıların giriş tankında önceden karıştırılması daha faydalı olur (Öjmerts, 1993; Schmelzer, 1994). Karıştırılmış aşındırıcılar, kesme kafasında ASJ' ne katılırlar. Ancak taşıyıcı akışkanın kütlelerinden dolayı, aşındırıcıların ASJ' ne katılması sırasında kesme veriminde düşüş gözlenir (Öjmerts, 1993). Bu nedenle, yüksek debilerde daha yüksek pompa gücü gerekir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan ve garnetin yerini alacağına

kesin gözüyle bakılan aşındırıcı, oto ön camının özel kırıcılarda kırılmasıyla elde edilmektedir. Kullanılmış cam, garnete göre % 90 daha ucuzdur. Aşındırıcılar ivmelendirilirken, odaklama tüpünde diğer aşındırıcı parçacıklarla çarpışmaları sonucunda parçalanırlar (Schmelzer, 1994). ASJ ile kesmede kullanılan, garnet türü aşındırıcı parçacıklar için önerilen meş değerleri; 50, 65, 85, 120, 150 ve 220 olarak belirlenmiştir (Kulekçi, 2002).

➤ **Kuruluş maliyeti:** ASJ tesisinin ilk yatırımında pompalar, nozullar ve basınç artırıcıyla birlikte, maliyet 100,000~150,000 YTL arasında değişir. Oldukça basit üç ve beş eksen sistemi, 150,000 YTL' lik, yüksek hassasiyete sahip robot sisteminin ilavesi, 650,000 YTL' lik ve ayrıca özel nozul ve aşındırıcı düzeni ise 120,000 YTL' lik ek bir yük getirir (Heston, 1998).

Çizelge 4.1. Boron ve Tungsten Karbür Nozullarının Karşılaştırılması (Omax, 2005)

Maliyet	Boron karbür	Tungsten karbür
Nozul maliyeti (yakıt-YTL)	120	53
Nozul ömrü (saat)	200	28
Maliyet (YTL/h)	0,60	1,8
Maliyet (YTL/200 saat)	120	360
Değiştirilen nozul sayısı (adet)	1	7
Maliyet (YTL/400 saat)	240	720
Değiştirilen nozul sayısı (adet)	2	14
Maliyet (YTL/600 saat)	360	1080
Değiştirilen nozul sayısı (adet)	3	21
Maliyet (YTL/800 saat)	480	1440
Değiştirilen nozul sayısı (adet)	4	28
Maliyet (YTL/1000 saat)	600	1800
Değiştirilen nozul sayısı (adet)	5	35

➤ **Çalıştırma Maliyeti:** Bu maliyet nozul, enerji, su ve işçilik içerir. Aşındırıcı debisi 225 gr/dk~1,250 kg/dk arasında değişir. En çok kullanılan aşındırıcı, garnet olmak üzere maliyet 0,35~045 YTL/gr mertebesindedir. Kullanılan elemanların ömrü; basınç değerleri, kullanılan su ve aşındırıcı kalitesine göre değişir. SJ sistemlerinde, Çizelge 4.1’ de verilen, safir orifis kullanımında nozul ömrü yaklaşık 50 saat iken, artan su kalitesiyle bu değer 300 saate kadar çıkmaktadır (Heston, 1998).

4.9.2. Farklı basınçlarda kesme maliyetinin karşılaştırılması

ASJ ile kesmede, basınç arttıkça belli bir değere kadar artan kesme hızı, kesme maliyetini düşürürken, bakım onarım masraflarını artırır. Hız, aşındırıcı türüne göre değişir. Birçok tezgâhta, kırılmış veya toz garnet türü aşındırıcı kullanır. Bunlar arasındaki tek fark, kırılmış olanlarda keskin köşe bulunma olasılığının daha fazla olmasıdır. Keskin köşeli aşındırıcılarla kesme çok daha hızlı ve düzgün yapılmaktadır. Ancak kaliteyle birlikte maliyet de artmaktadır. Meş sayısının da kesmede etkili olduğu hatta kalitesiz aşındırıcı kullanımının nozul tıkanmasına yol açtığı bilinmektedir. Çizelge 4.2’ de, verilen toplam maliyet değerine işçilik de eklenmiştir. Her saat için 40 YTL’ lik bir işçilik masrafı söz konusudur. Toplam maliyet % 5, işçilik maliyeti % 2,6 ve kullanılan aşındırıcı miktarı % 10 düşerken, parça maliyeti % 13 düşmektedir. Genel maliyet pek fazla değişmemekle beraber, saatte kesilen parça sayısı artmaktadır.

Çizelge 4.2. Farklı Parametrelerde Maliyet Karşılaştırılması (Heston, 1998)

Maliyet	3750 bar	4100 bar	Basınç farkı
Kesme süresi (dk)	6,73	6,06	%10 iyileşme
Kesme maliyeti (1/cm)	0,234 YTL	0,21 YTL	%10 iyileşme
Toplam maliyet (1/parça)	3,885 YTL	3,705 YTL	% 5 iyileşme
Toplam maliyet (1/h)	35,655 YTL	35,685 YTL	– % 0,15
Toplam maliyet/h (işçilik)	8,1 YTL	7,485 YTL	%7,6 iyileşme

5. MATERYAL ve METOT

5.1. GİRİŞ

Bu çalışmada, aşındırıcı su jetiyle kesilen birçok malzemenin kalınlık, su basıncı, aşındırıcı kütleli debisi, nozul çapı, karıştırma tüpü çapı ve ilerleme hızı gibi kesme işlemine ait parametre değerleri, YSA modeliyle belirlenmiştir. Modelde kullanılan veriler literatürde mevcut olan, hassas kesme için öngörülen ampirik (gerçek) değerlerdir. Omax firmasının hazırlayıp sunduğu bu değerlere “www.omaxcorp.com” isimli web sayfasından ulaşılmıştır (Omax, 2005). Sözkonusu değerler, farklı basınç ve kalınlıktaki alüminyum, takım çeliği, yumuşak çelik, paslanmaz çelik, pleksiglas, bakır, beyaz mermer, cam, kurşun ve titanyum için hazırlanmıştır. Bu değerler yardımıyla aşındırıcı kütleli debisi, karıştırma tüpü çapı ve nozul çapını değiştirerek, söz konusu malzemelerin hassas kesmeye uygun ilerleme hızlarına ulaşmak mümkündür.

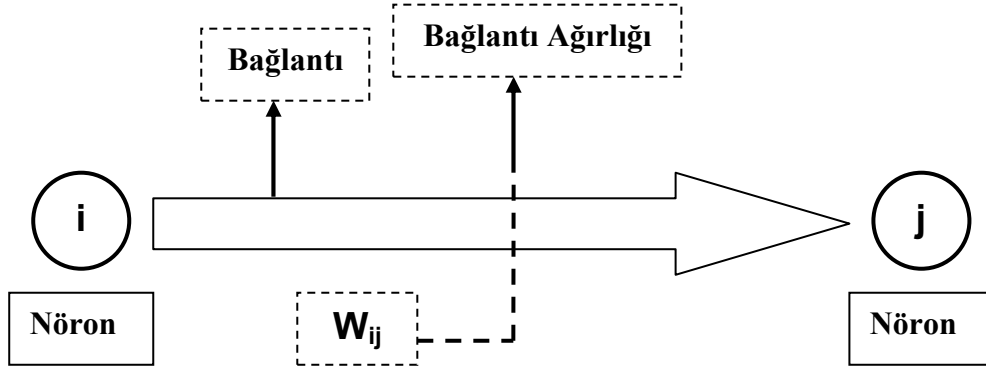
Bu modellemede öğrenme algoritması olarak, mühendislikte ve pek çok alanda, işletiminin kolay, yapısının basit ve öğrenme kapasitesinin yüksek olması nedeniyle genelde tercih edilen, geriye yayılma algoritması kullanılmıştır. İleri beslemeli sinir ağının çözümünde kullanılan denetimli öğrenme tipi seçilmiştir. Ağın genel yeteneği, sisteme uygun giriş-çıkış parametrelerinin seçimi, veri tabanının dağıtımı, eğitim ile test verilerinin belirlenmesi ve ağın veri tabanını sunma formatıdır. Eğitim algoritması, gizli tabaka, nöron sayısı ve gizli tabaka ile çıkış tabakasındaki transfer fonksiyonunun seçimi, modellemenin sonucunda yüksek doğruluk ve performansta değerler elde etmek için çok önemlidir. YSA’ da mevcut olan eğitim algoritmalarının amacı, hataları en aza indirmektir. Burada, malzeme kalınlığı ve basınç değişkeni giriş parametresi olarak, ilerleme hızı ise çıkış parametresi olarak kullanılmıştır. Oluşturulan YSA modeli iki girişli, tek gizli tabakalı, tek çıkışlı bir yapıya sahiptir. Ağın eğitiminde kullanılan toplam veri 84 adettir. YSA sistemindeki ağ yapısı yumuşak çelik, paslanmaz çelik ve takım çeliği için oluşturulurken, toplam verilerin % 14’ü test, % 86’sı eğitim verileri olarak seçilmiştir. Yumuşak çelik, paslanmaz çelik ve takım çeliği dışındaki malzemeler için seçilen test değerleri toplam verilerin % 20’sini, eğitim değerleri ise % 80’ini oluşturmaktadır. Söz konusu test değerleri rasgele seçilmiştir.

5.2. Yöntem

5.2.1. Yapay sinir ağlarının (YSA) tanımı

YSA teknolojisi, insan beyninin temel işlem elemanı olan nöronu, şekilsel ve işlevsel olarak basit bir şekilde taklit eden ağlar yardımıyla, biyolojik sinir sisteminin basit bir simülasyonu için oluşturulan programlar sistemidir. Bir başka deyişle basit, biyolojik sinir sisteminin çalışmasını simüle etmek için tasarlanan, birbirine bağlanmış çok sayıda elemanlar (nöronlar) içeren matematiksel sistemlerdir. Bu nöronlar, çeşitli şekillerde birbirlerine bağlanarak öğrenme, hafızaya alma ve veriler arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarma kapasitesine sahip ağı oluştururlar (Diebold and Mariano, 1995; Gülseçen, 1993). Benzer karakteristiğe sahip nöronlar, YSA' da katmanlar halinde yapılandırılırlar. YSA' ya ait matematiksel fonksiyon, veri alan nöronlara ve çıktı üreten nöronlara sahip ağı tarafından şekillendirilir. Şekil 5.1' de gösterildiği üzere, YSA' da üç ana elemandan söz edilir. Bunlar sırasıyla; işlem elemanı olan nöron, girdi ve çıktı yolunu sağlayan bağlantı ve bu bağlantıların sağlamlığını gösteren bağlantı ağırlığıdır. Genelde YSA' nın yapısı oluşturulduktan sonra, matematiksel algoritmalarla bir tanesi kullanılarak, doğruluk yüzdesi yüksek çıktıların elde edilmesi için gerekli ağırlık değerleri belirlenir. Örnekler kullanılarak belirlenen bu ağırlıklar, girdi değişkenleri ile tahmin edilen değişkenler arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarırlar. Eğitilen YSA, yeni veriler için yeni tahminler üretilir. Bir ağı performansı, düşünülen sinyal ve hata kriteri ile ölçülür (Minsky and Papert, 1969). Ağı çıktısı, amaçlanan çıktı ile karşılaştırılarak hata payı elde edilir. Geriye yayılma olarak adlandırılan algoritma, hata payını azaltacak şekilde ağırlıkları ayarlamak için kullanılır. İşlem defalarca tekrar edilip, ağı eğitilerek performans ölçümleri bazında optimum çözüme ulaşılabilir.

Yaklaşık bir buçuk kilo ağırlığında, ceviz görüntüsünde bir organ olan beyin, 60 yıllık bir ömürde saniyede 600 birimlik bilgiyi hafızada kaydetme, işleme ve programlama kapasitesine sahiptir. Bir başka deyişle, dakikada 3600/dk, saatte 216,0000 ve günde 5,184,0000 bitlik donanım içermektedir.

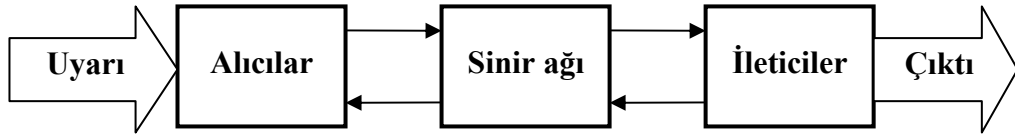


Şekil 5.1. Yapay Sinir Ağlarının (YSA) Temel Elemanları

Beyin üzerine araştırmalar yapan Dr. V. Grey Walter, insan beynine benzeyen bir makinenin yapılabilmesi için 300 trilyon Watt değerinde elektrik enerjisine ihtiyaç olduğunu ifade etmiştir (Pirim, 2006). Bilindiği gibi; öğrenme, hatırlama, düşünme gibi tüm insan davranışlarının temelinde sinir hücreleri bulunmaktadır. İnsan beyninde tahminen 10^{11} adet sinir hücresi ve bu sinir hücreleri arasında sonsuz diyebileceğimiz sayıda sinaptik birleşme denilen sinirler arası bağ olduğu düşünülmektedir. İnsan beyninin bu karmaşıklığı göz önüne alındığında, günümüz teknolojisinin insan beynine oranla henüz çok geride olduğu açıktır (Altıntaş, 2005). İnsan beyninde olduğu üzere, YSA sistemleri de deneyerek öğrenme yeteneğine sahip oldukları için, insanın düşünce ve gözlemlerine çözüm üretmektedir. Bilindiği üzere öğrenme, nöronlar arasındaki sinaptik bağlantıların ayarlanması ile oluşur. İnsanlar, doğumlarıyla birlikte yaşayarak öğrenme sürecine girerler. Bunun için beyin devamlı bir gelişme gösterir. Yaşayarak elde edilen tecrübelerle sinaptik bağlantılar düzenlenerek, öğrenme gerçekleşir. Aynı durum, YSA için de geçerlidir. Bir başka deyişle YSA, basit işlem birimlerinden oluşan, deneysel bilgileri biriktirmeye doğal bir eğilimi olan ve bunların kullanılmasını sağlayan, paralel olarak dağıtılmış bir işlemcidir (Haykin, 1999). YSA, büyük bir problemin bir parçası ile ilgilenen, çok sayıda nöronlardan oluşabilir. Nöron, bir girdiyi bir ağırlık kümesi ile çarparak, doğrusal olmayan bir şekilde dönüşümünü sağlayıp, bir çıktı değeri oluşturur (Kramer and Sangiovanni-Vincentelli, 1989). YSA için ana özellik, karmaşık bir bilgi işleme sistemine sahip olması ve birbirleri ile bağlantılı çok sayıda işlem elemanı (nöron) içermesidir. Ağ katmanlarını oluşturan nöron sayısının belirlenmesi önemli bir sorundur. YSA yönteminin modele dayalı değil, veriye dayalı bir yöntem olduğu göz ardı edilmemelidir.

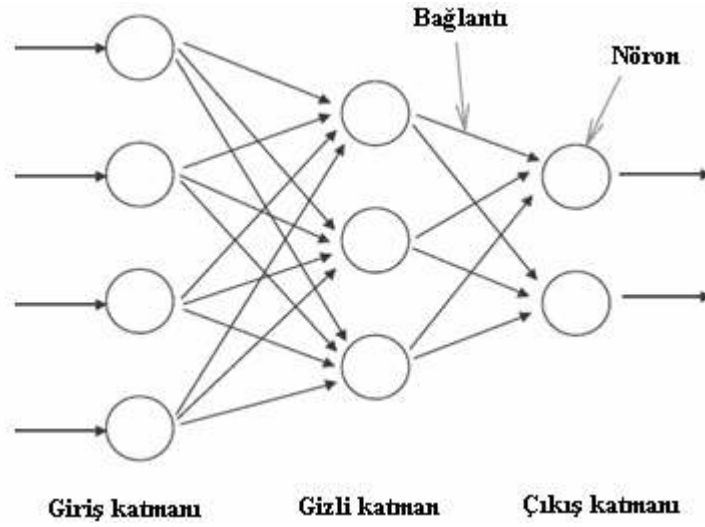
5.2.2. Ağ yapısı

YSA sisteminin çalışmasını anlayabilmek için, insan beyninin yapısını ve çalışma şeklini anlamak gerekir. Ancak insan beyni, karmaşık yapısı ile anlaşılması ve anlatılması oldukça zor bir konu olup, çalışma şekli henüz tam olarak çözülememiştir. Bilinen somut gerçek, insan beynini yöneten sinir sisteminin merkezini oluşturan nöronlar yardımıyla, bilgi akışını işleyerek aldığı uygun kararları gerekli yerlere ilettiğidir. Çok basit görünmekle birlikte, aslında oldukça karmaşık olan bu yapının Haykin tarafından düzenlenmiş gösterimi Şekil 5.2’ de olduğu üzeredir.



Şekil 5.2. Sinir Sisteminin Blok Diyagramı (Haykin, 1999)

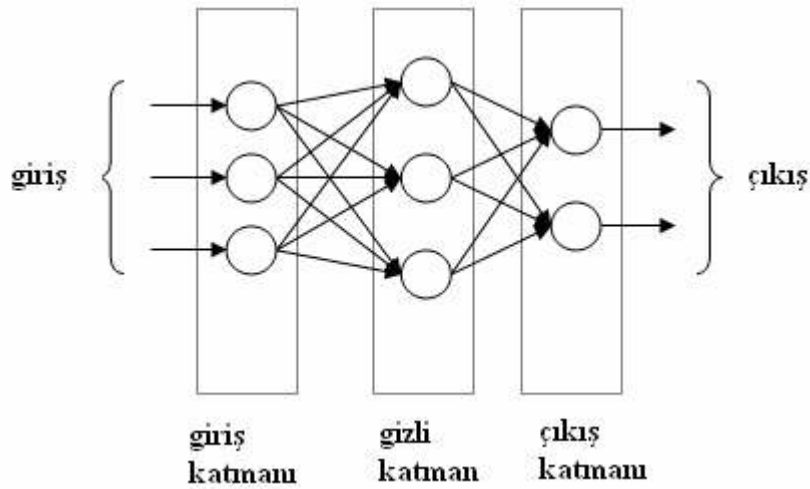
Şekil 5.2’ den de görüleceği üzere, çevreden veya başka bir organdan gelen sinyaller, alıcılar yoluyla sinir ağına iletdikten sonra, işlemden geçirilip çıktı sinyalleri oluşturulur. Daha sonra bu sinyaller ileticiler yardımıyla dış ortama veya diğer organlara iletilirler. Sinir ağı olarak Şekil 5.2’ de gösterilen ortadaki bölüm, beyin temel yapı taşları olan nöronların bir araya geldiği sinir sisteminin merkezini ifade etmektedir. Beyin işlevini, bu yapı taşları ile yerine getirir. Nöronların en belirgin özelliği, vücudun diğer bölümlerinin tersine yeniden üretilmeyen belirli bir hücre türü olmasıdır. Temel yapısal ve fonksiyonel birimleri olan diğer bağlantılar, nöronlar arası etkileşimi sağladığından beyin yapısında da önemli bir yer tutar. Yapay nöronlar, beyin karmaşık yapısından oldukça uzak olmakla birlikte, genel yapı olarak tutarlıdır. Diğer bir ifadeyle YSA; karmaşık, çok yönlü ve güçlü bir organizma olan beyin, en temel elemanlarını kopyalamaya çalışan bir sistemdir. Elemana ait işlem ise, transfer fonksiyonu olarak anılan bir bağıntıdır. Söz konusu eleman, diğer nöronlardan sinyalleri alıp bunları birleştirip, dönüştürerek sayısal bir sonuç ortaya çıkartır. Aslında bu elemanlar beyindeki gerçek nöronlara benzer şekilde, bir ağ içinde birbirlerine bağlanarak yapay sinir ağlarını meydana getirirler (Gülseçen, 1993).



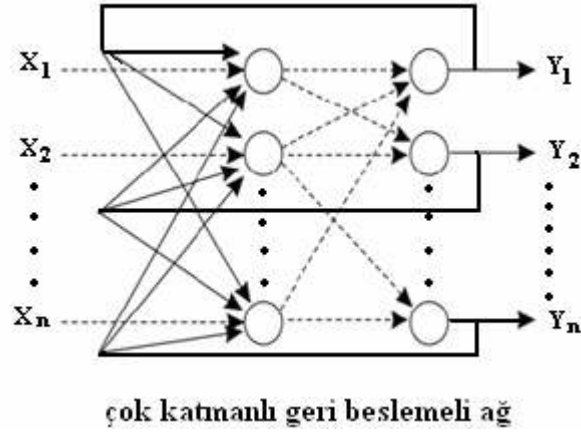
Şekil 5.3. Yapay Sinir Ağı (YSA) Modeli (Saraç, 2004)

YSA' daki nöronlar, basit bir şekilde katmanlar halinde gruplandırılarak bir diğeriyle ilişkilendirilirler. Genelde, tüm YSA' lar benzer bir yapıya sahiptirler (Minsky and Papert, 1969). Şekil 5.3' den de görüleceği üzere, bazı nöronlar girdileri almak için, bazı nöronlar ise çıktıları iletmek için dış mekân ile bağlantılıdır. Geri kalan tüm nöronlar ise gizli katmanlarda olup, sadece ağ içinde bağlantıları vardır. Bir yapıyı tasarlamamanın en kolay yolu elemanları tabakalara ayırmaktır. Bu tabakaların üç bölümü vardır. Bunlar sırasıyla, nöronları katmanlar halinde gruplandırmak, katmanlar arasındaki bağlantıları gruplandırmak ve son olarak toplama ve transfer fonksiyonlarını gruplandırmak şeklinde özetlenebilir. Uygulamalarda genellikle en az üç katman (girdi katmanı, gizli katman ve çıktı katmanı) içeren ağlar tercih edilir. Girdi katmanı, dışarıdan girdileri alan nöronları içerir. Çıktı katmanı ise, çıktıları dışarı ileten nöronları içeren katmandır. Girdi ve çıktı katmanları tek katmandan oluşurken, bu iki katman arasında birden fazla gizli katman bulunabilir (Willshaw and Malsburg, 1976). Ağ yapılarında genellikle gizli katmandaki nöron, sadece bir önceki katmanın tüm nöronlarından sinyal alır. Nöron, işlemini yaptıktan sonra çıktısını bir sonraki katmanın tüm nöronlarına gönderir. Bu yapı, ağın çıktısı için bir ileri besleme yörüngesi oluşturur. Bir nöronun diğerine olan iletişim hattı, sinir ağları için önemlidir. Diğer bir bağlantı şekli ise geriye yayılma. Geriye yayılma, bir katman çıktısının önceki katmana gönderilmesidir. Ağ, yapılandırıldıktan sonra eğitime hazır durumdadır.

Bağlantı ağırlıklarının belirlendiği bu aşama, deneyim yoluyla öğrenme için çok önemlidir. Gerekli testlerin yapılabilmesi için, verilerin bir bölümünün ayrılabilceği kadar geniş bir veri setinin bulunması şarttır. Burada veri setine yönelik analiz önem kazanacaktır. Genelleme özelliğinin kaybolması ve ağıın yeni verilerle kullanılmaması durumunda, gizli katmandaki nöron sayısının çok fazla olmaması önerilmektedir. Bazı ağlarda ileri besleme, bazılarında ise geri besleme yapısı söz konusudur. İleri beslemede, sinir ağları ile işlem elemanları arasındaki bağlantılar bir döngü oluşturmadıklarından, genelde hızlı bir şekilde sonuca ulaşılır. Geri beslemeli ağlarda ise, bağlantılar döngü içerdikleri için yeni (ek) veri kullanırlar. Döngü sebebiyle girdinin karşılığını yavaş bir şekilde oluşturduklarından, eğitime süreçleri uzun sürmektedir. İleri ve geri beslemeli ağ yapıları, Şekil 5.4a ve 5.4b’de gösterilmiştir. Geri beslemeli sinir ağlarının zaman serisinde, öngörü problemi için kullanılan önemli bir çeşidi Elman’ da verilen ve “Elman ağı” olarak bilinen geri beslemeli YSA’ dır (Elman, 1990). Elman ağıında, ileri beslemeli YSA’ dan farklı olarak bağlam katmanı yer almaktadır. Bu katman, gizli tabaka çıktılarını ağırlık katsayısı ile çarparak, tekrar gizli katmana girdi olarak vermektedir. Bağlam katmanının ağırlıkları, sabit veya değişken değerlerden oluşabilir. Bağlam katmanının ağırlık değerleri sabit alındığında, Elman ağıının optimizasyonu için, ileri beslemeli YSA’ dan yararlanılan geriye yayılım algoritmasını kullanmak mümkündür.



Şekil 5.4a İleri beslemeli ağ yapısı



Şekil 5.4b Geri beslemeli ağ yapısı

Şekil 5.4. İleri ve Geri Beslemeli Ağ Yapısı (Elman, 1990)

Öngörülen doğruluğun ölçülmesinde kullanılacak olan ölçü seçimi için, yapılan analizin konusu ve amacı çok önemlidir. Doğruluk ölçülerinin temelini, sapmayı ölçmek için kullanılan ortalama hata (ME – Mean Error) kavramı oluşturur.

$$ME = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T e_{t+k,t} \quad (5.1)$$

Yukarıdaki formülde T, öngörü aralığı; t, zaman operatörü; k, öngörü uzunluğu; e ise öngörü hatasıdır. Ortalama hata kavramının temel alındığı ve yaygın şekilde kullanılan başlıca doğruluk ölçüleri arasında, korelasyon katsayısı ya da ortalama karekök hatası (MSE - Mean square error), karekökteki ortalama hata (RMSE - Root mean square error) ve ortalama mutlak hata (MAE - Mean absolute error) kavramları mevcuttur.

Bu ölçülerin formülleri aşağıda olduğu üzeredir.

$$MSE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T e_{t+k,t}^2 \quad (5.2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T e_{t+k,t}^2} \quad (5.3)$$

$$MAE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |e_{t+k,t}| \quad (5.4)$$

Doğruluk ölçüleri arasında en çok kullanılanı MSE' dir. Bu ölçünün en önemli özelliği, öngörü hatasının değişkenlerin toplamlarına ayrışabilmesidir. Bu özellik MSE' nin, gerçekleşme ve öngörülere ait birleşik dağılımın, ikinci momentine bağlı olduğunu gösterdiğinden, yararlı bilgiler sağlayan bir ölçü olarak kabul edilebilir. Ancak, gerçek dağılımla ilgili tam bir bilgi sağlayamadığını da belirtmek gerekir. Ayrıca, doğruluk ölçülerinde öngörü hatası (e) yerine, öngörü hatasının yüzdesi kullanılabilir. Bu durumda, ölçüler sırasıyla MPE, MSPE, RMSPE ve MAPE olarak adlandırılır.

$$MPE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T p_{t+k,t} \quad (5.5)$$

$$MSPE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T p_{t+k,t}^2$$

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T p_{t+k,t}^2} \quad (5.6)$$

$$MAPE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |p_{t+k,t}| \quad (5.7)$$

5.2.3. Yapay sinir ağlarının gelişimi ve kullanım alanları

➤ Gelişimi

YSA, beynin bazı fonksiyonlarını ve özellikle öğrenme yöntemlerini benzeşim yolu ile açıklamak için tasarlanmıştır. Bilinen metot ve bilgisayarların yetersiz kaldığı, sınıflandırma, kümeleme, duyu-veri işleme gibi alanlarda başarılı sonuçlar verir. YSA sisteminin özellikle tahmin problemlerinde, çok fazla bilgi ile eğitilmeleri için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir (Dickey and Fuller, 1979). YSA ile gerçekleştirilen tahmin ve öngörüdeki doğruluk yüzdesinin çok yüksek olması, bu modelleme yönteminin çok

daha yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Söz konusu ilgi, öngörü doğruluğuna yönelik önemli gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. YSA, çok sayıda değişkenle çalışma olanağı sağladığı için, öngörüdeki çeşitliliğin model seçiminde oluşturduğu sorunlara çözüm üretmektedir. Bu nedenle YSA, öngörü modellemesi alanında geniş anlamda kullanılmaktadır (Anderson and McNeil, 1992). YSA sisteminin tarihi gelişimi, insanların nörobiyoloji konusuna ilgi duyması ve elde ettikleri bilgileri bilgisayar bilimine uygulamaları ile başlamaktadır. İnsanoğlu, mağara duvarlarına hayvan figürleri çizerek başladığı veri işleme sürecine, artık insan gözüyle görülemeyecek küçüklükteki “chip” lerle devam etmektedir. Bu gelişim, yaklaşık 4000 yıl gibi uzun bir süreye dağılmakla birlikte, gerçek gelişim son 50 yılda ortaya çıkmıştır (Clements and Hendry, 1993). Örneğin, bilgisayar sektörünün önemli firmalarından IBM’in bir yöneticisi, “Bilgisayar ne kadar küçülürse küçülsün bir odadan daha küçük olamaz” demiştir. Sektörün önde gelen isimlerinden birinin, böyle büyük bir yanılğı içinde olması, bilgisayar teknolojisinin ne kadar hızlı geliştiğini çok güzel açıklamaktadır (Yurtoğlu, 2005). Bu noktada karşımıza “yapay zekâ” kavramı çıkmaktadır. Günümüzde insanlığın en büyük hayallerinden biri haline gelen, üzerine filmler çekilen, kitaplar yazılan yapay zekâ konusunu iyi anlayabilmek için felsefeden, bilgisayar bilimine, elektrik-elektronikten, biyoloji ve psikolojiye kadar çok geniş çapta çalışmalar yapılmaktadır. Teknolojik gelişme, günümüzde önemli aşamalar kaydetmiş, özellikle son zamanlarda yapay zekâ çalışmaları büyük bir ivme kazanmıştır. Aslında yapay zekâ, bilgisayarlara düşünme yeteneğinin verilmesidir. Uzun yıllardan beri yapılan yapay zekâ çalışmaları mühendislik, nöroloji ve psikoloji gibi alanlara hızla yayılmıştır. Yapay zekâ çalışmalarına destek sağlayan alanlardan bir tanesi de yapay sinir ağları teknolojisidir. YSA teknolojisi, öğrenebilen sistemlerin temelini oluşturmaktadır. YSA sistemlerinin gösterdiği gelişmeler aşağıda özetlenmiştir.

1. İlk denemeler: Başlangıçta genel mantığın kullanıldığı başlangıç simülasyonları yapılmıştır. Araştırmacılar McCulloch ve Pitts (1942), YSA modelleri geliştirmişlerdir. Bu modellerde nöronların çalışma şekilleri hakkında bazı varsayımlar üzerinde çalışılmıştır.

2. Günümüzdeki gelişmeler: YSA' nın gelişiminde tek etkili alanın nörobiyoloji olmadığı, bunun yanı sıra psikoloji ve mühendislik alanlarının da YSA simülasyonundaki gelişmelere yardımcı olduğu bilinmektedir.

3. Beklenmeyen olumsuz gelişmeler: Araştırmacılar Minsky ve Papert, 1969 yılında yazdıkları kitapta, tek katmanlı sistemlerin çok katmanlı sistemlere göre bazı sınırlamalar içerdiğini ele almışlardır. Minsky ve Papert tarafından ortaya atılan sorun, yapay sinir ağlarına ait literatürde, XOR Problemi olarak tanımlanır.

4. Ulaşılan yenilikler: Bazı araştırmacılar, yapı tanımlama gibi sorunlarla ilgili çalışmalara devam etmiş, hatta bazı zıt fikirler oluşmuştur. Araştırmacılar Grossberg ve Carpenter'in (1995) yaptıkları çalışmalar sonucunda, algoritmaları araştıran bir düşünce okulunun temelleri atılmıştır.

5. Yeni gelişmeler: 1970'li yılların sonlarıyla 1980'li yılların başlarındaki ilerleme ve gelişmeler YSA' ya olan ilginin yeniden canlanmasında yardımcı olmuştur. Seminer ve konferanslar düzenlenerek, değişik alanlardaki araştırmacılara forum imkânıyla etkileşim olanağı sağlanarak, konuyla ilgili programlar ve detaylı kitaplar hazırlanmış ve üniversitelerde dersler açılmıştır.

6. Mevcut durum: Gerçekleşen ilerlemeler, YSA konusunda ileriye dönük yapılacak araştırmalar için bilgi birikimi sağlamıştır. Bu birikim sonucunda, sinir sistemiyle ilgili işlemciler oluşturularak, karmaşık problemlerin çözümü için detaylı uygulamalar geliştirilmektedir.

➤ **Kullanım alanları**

Gerçek yaşamdaki problemlerde oldukça geniş bir uygulama alanı elde eden YSA, günümüzde birçok endüstride başarılı şekilde kullanılmaktadırlar. YSA, 1950'li yıllarda ortaya çıkmalarına rağmen, ancak 1980'li yılların ortalarında genel amaçlı kullanım için yeterli seviyeye gelmişlerdir. Bugün, sayıları giderek artan çok ciddi problemler üzerinde uygulanmaktadır. Verideki eğilim veya yapıyı en iyi tanımlayan yöntem oldukları için, tahmin ve öngörü işlemleri açısından uygundur. YSA' nın

uygulama alanları altı grup içerisinde toplanabilir. Bu gruplar sırasıyla, aşağıda özetlenmiştir.

Arızanın tespit ve analizi: Bir sistemin, cihazın ya da elemanın düzenli çalışma şeklini öğrenen bir YSA sistemiyle, uygulamada karşılaşılan arızalar tanımlanabilir.

Tıp alanı: EEG ve ECG gibi tıbbi sinyallerin, kanserli hücrelerin analizi, protez tasarımı, transplantasyon zamanlarının optimizasyonu ve hastane giderlerinin optimizasyonu vb.

Savunma sanayi: Silahların otomasyonu ve izlenmesi, nesnelere/görüntüleri ayırma ve tanıma, yeni algılayıcı sistem tasarımı ve gürültü önleme v.b.

Haberleşme: Görüntü ve veri sıkıştırma, otomatik bilgi sunma servisleri, konuşmaların gerçek zamanda çevirisi vb.

Üretim: Üretim sistemlerinin optimizasyonu, ürün analizi ve tasarımı, ürünlerin kalite analizi ve kontrolü, planlama ve yönetim analizi gibi alanlarda özellikle tercih edilir.

Otomasyon ve Kontrol: Uçaklarda otomatik pilot sistemi otomasyonu, ulaşım araçlarında otomatik yol bulma/gösterme, robot sistemlerin kontrolü, doğrusal olmayan sistem modelleme ve kontrolü, elektrikli sürücü sistemlerin kontrolü gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Makine ve sistem mühendisliğinde ise, metal kesme tezgahlarındaki kontroller, akustik salınım ve iş parçası kuvvetiyle iş parçası yatağının kontrolü, güç tüketimi, iş parçasını ivmelendirme, hücreli imalat için grup teknolojisi, parça gruplarının tasarımı, hareket eden nesnelere için engelsiz yol planlaması, makine parametrelerinin optimizasyonu, makine arızalarının sınıflandırılması, malzemelerde ısı transferinin belirlenmesi, uçak kanat kutuları yapısının tasarımıyla; esnek kollu robotun kontrolü, bir model helikopterin havada kontrolü, çok değişkenli (mafsallı) robotun yörünge koordinasyonu, iki sıvı tank sisteminin akış seviye kontrolü, anestezi derinliğinin kontrolü ve ölçülmesi, bir robot için optimum yolun bulunması, banyo suyu sıcaklığının kontrolü, endüstriyel robot kontrolü gibi birçok alanda uygulanmaktadır (Öztemel, 2003)

5.3. Modelleme için Yapılan Kabuller

➤ Hata Değerlerinin Hesaplanması

Ortalama karekökteki yüzde hata,

$$RMSE = \left(\left(\frac{1}{p} \right) \sum_j |t_j - o_j|^2 \right)^{1/2} \quad (5.9)$$

ile tayin edilebilir. Korelasyon katsayısı veya sapma kesrindeki % değişim ise,

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_j (t_j - o_j)^2}{\sum_j (o_j)^2} \right) \quad (5.10)$$

şeklinde dir. Böylece mutlak ortalama yüzde hata,

$$MAPE = \frac{1}{p} \sum_j \left(\left| \frac{t_j - o_j}{t_j} \right| \right) \cdot 100 \quad (5.11)$$

(5.9), (5.10) ve (5.11) nolu denklemler yardımıyla hesaplanabilir. Denklemlerde yer alan “t”, hedef değer, “o”, çıkış değeri, “p” ise, toplam veri sayısını ifade etmektedir.

Bu modellemede ele alınan malzemeler sırasıyla; cam, titanyum, alüminyum, bakır, pleksiglas, kurşun, beyaz mermer, yumuşak çelik, paslanmaz çelik ve takım çeliğidir. Kesme veriminde etkili parametrelerden karıştırma tüpü çapı, nozul çapı, aşındırıcı kütleli debisinin sabit, pompa basıncı ve malzeme kalınlıklarının değişken olduğu kabul edilmiştir. Modelleme sonucunda belirlenen ilerleme hızları, hassas kesme için geçerlidir. Modelleme için yapılan kabuller Çizelge 5.1’de detaylı olarak ifade edilmiştir.

Çizelge 5.1. Modelleme için Yapılan Kabuller

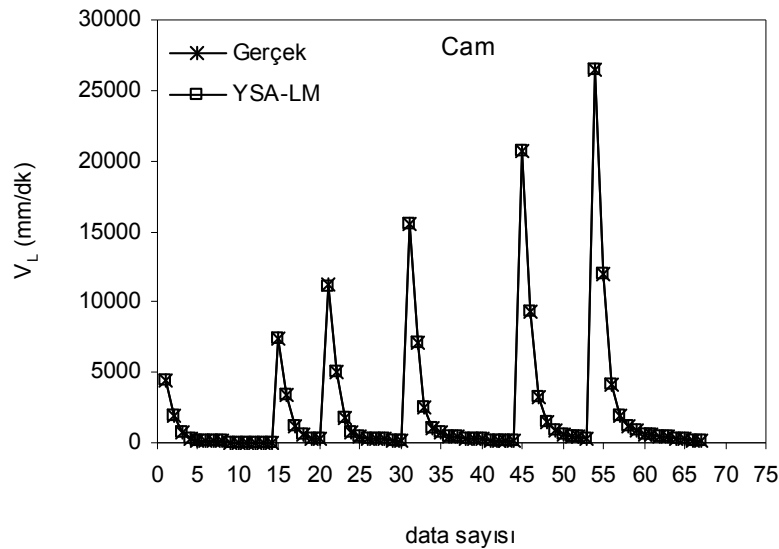
Malzeme Tipi		Malzeme Kalınlığı (mm)						
Bakır	Aluminyum	1	2	5	10	15	20	25
		30	35	40	45	50	75	100
Cam	Titanyum	1	2	5	10	15	20	25
		30	35	40	45	50	75	100
Beyaz Mermer	Kurşun	1	2	5	10	15	20	25
		30	35	40	45	50	75	100
Yumuşak Çelik	Paslanmaz çelik	1	2	5	10	15	20	25
		30	35	40	45	50	75	100
Takım Çeliği	Pleksiglas	1	2	5	10	15	20	25
		30	35	40	45	50	75	100
Nozul çapı (mm)		0,35						
Aşındırıcı Debisi (kg/dk)		0,30						
Karıştırma Tüpü Çapı (mm)		0,762						
Pompa Basıncı (bar)		3000						
Malzeme Tipi		Su Basıncı (bar)						
Bakır	Aluminyum	1500	2000	2500	3000	3500	4000	
Cam	Titanyum	1500	2000	2500	3000	3500	4000	
Beyaz Mermer	Kurşun	1500	2000	2500	3000	3500	4000	
Yumuşak Çelik	Paslanmaz çelik	1500	2000	2500	3000	3500	4000	
Takım Çeliği	Pleksiglas	1500	2000	2500	3000	3500	4000	

5.4. Gerçek Değerlerin YSA ile Modellenmesi

Yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden birisi olan kesme hızı için, gerçek değerler ile YSA metodu kullanılarak hesaplanmış değerler (test değerleri) arasındaki ilişki, on farklı malzeme için irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, çizilen grafikler yardımıyla ifade edilmiştir. Çizilen bu grafiklerde, SCG (Scaled conjugate gradient backpropagation) ve LM (Levenberg –Marquardt backpropagation) transfer fonksiyonu kullanılarak eğitilen ağın test değerleri ile gerçek değerlerini karşılaştıran, korelasyon katsayısındaki (R^2) değişim, ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ve ortalama karekökteki yüzde hata (RMSE) sonuçları da verilmiştir.

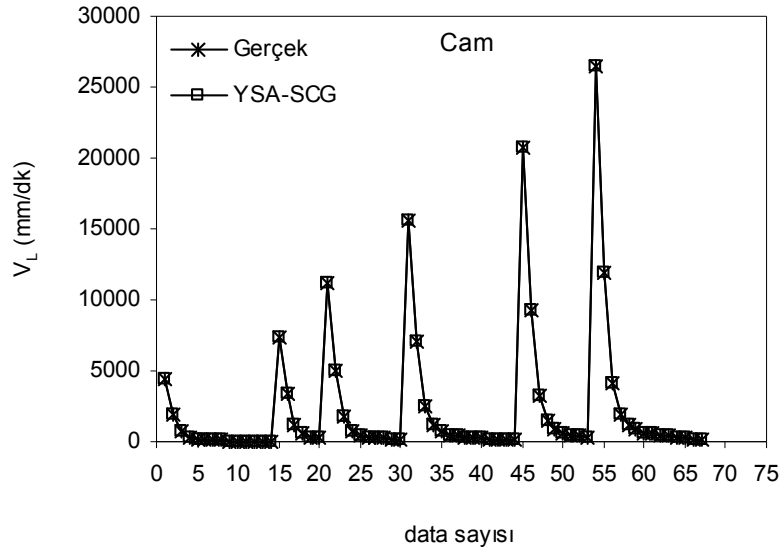
5.4.1. Cam için elde edilen YSA sonuçları

ASJ sisteminde cam kesme için yapılan modellemede toplam 84 adet veri kullanılmıştır. Bunlardan 67 tanesi eğitim verileri olarak belirlenmiştir. Bu veriler, LM eğitim algoritmasında eğitilmiştir. Eğitim sonucunda elde edilen YSA değerlerindeki kesme (ilerleme) hızı ile gerçek kesme hızı değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.5’ de gösterilmiştir.

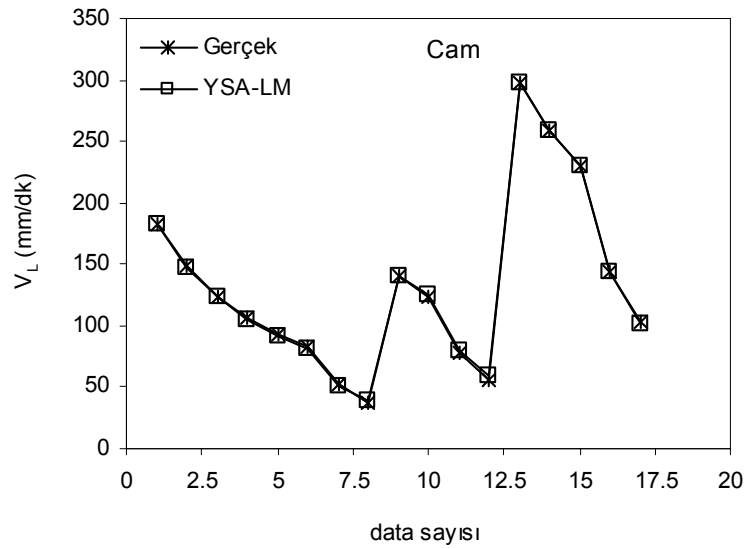


Şekil 5.5. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-LM)

LM eğitiminde kullanılan verilerin aynısı, SCG algoritmasında yeniden eğitilmiş ve elde edilen sonuçların gerçek değerlerle uyum içerisinde olduğu Şekil 5.6' da gösterilmiştir.

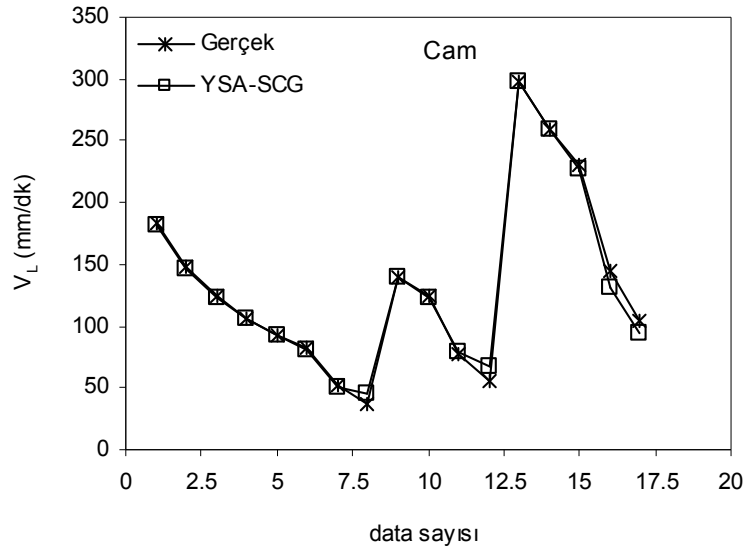


Şekil 5.6. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-SCG)



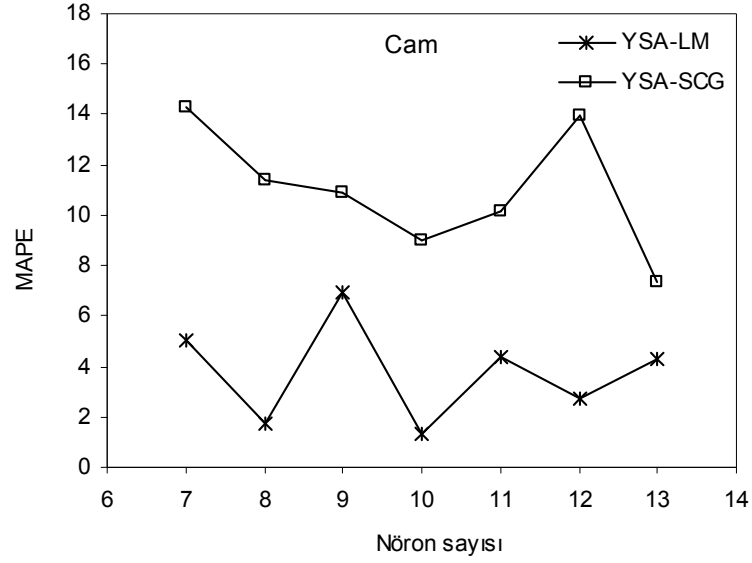
Şekil 5.7 Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-LM)

Cam kesmeye ait toplam 84 verinin 17 tanesi test verileri olarak seçilmiştir. Seçilen bu veriler önce LM, daha sonra SCG algoritmalarında eğitilerek YSA ağı oluşturulmuştur. YSA değerleriyle gerçek veriler arasında her iki algoritma için elde edilen ilişki, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’ de gösterilmiştir. Gerçek verilerle YSA değerleri karşılaştırıldığında, LM eğitim algoritmasının SCG’ ye göre çok daha başarılı olduğu açıkça görülmektedir.



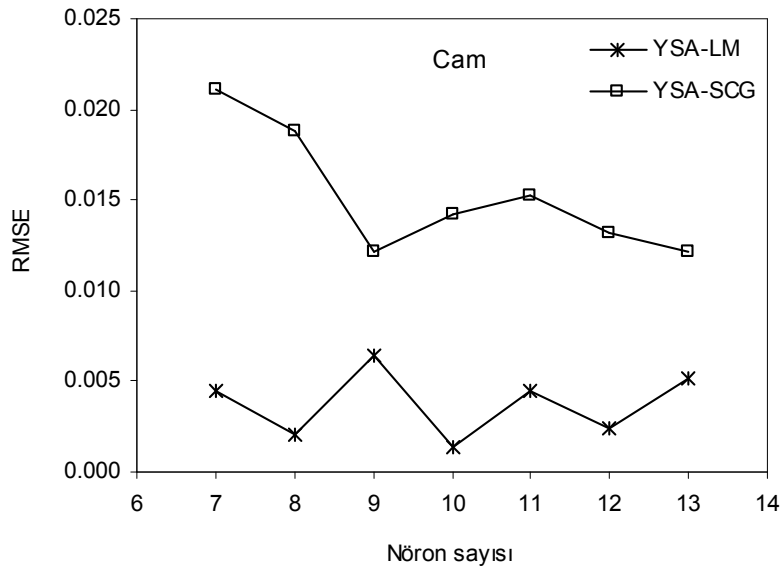
Şekil 5.8. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-SCG)

Cam kesme için oluşturulan YSA sisteminde test değerleri dikkate alınarak, en iyi ağ yapısındaki nöron sayılarıyla ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) arasındaki ilişki, Şekil 5.9’ da verilmiştir. Oluşturulan en iyi ağ yapısında, LM eğitim algoritması için 10 nöronda, SCG eğitim algoritması için ise 13 nöronda, MAPE değerinin minimum olduğu Şekil 5.9’ da açıkça görülmektedir. Bu modellemede kullanılan test değerleri, toplam veri setinden rasgele seçilmiştir.

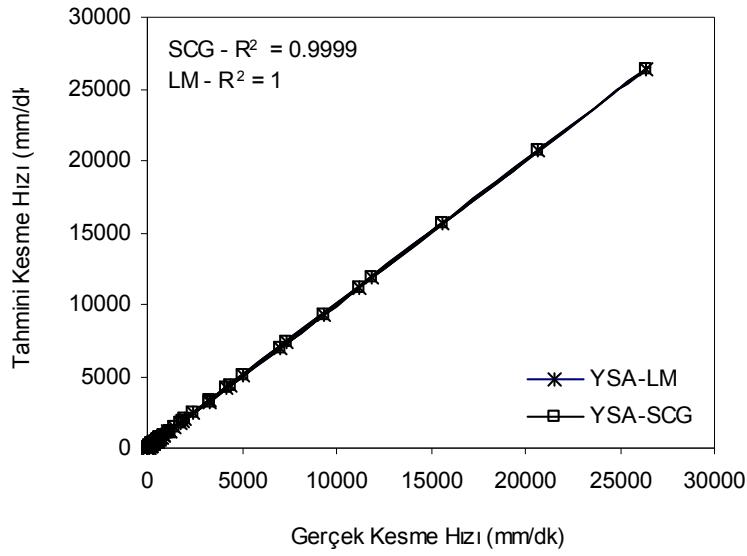


Şekil 5.9. Ortalama Mutlak Yüzde Hatanın Nöron Sayısıyla Değişimi (MAPE – Test)

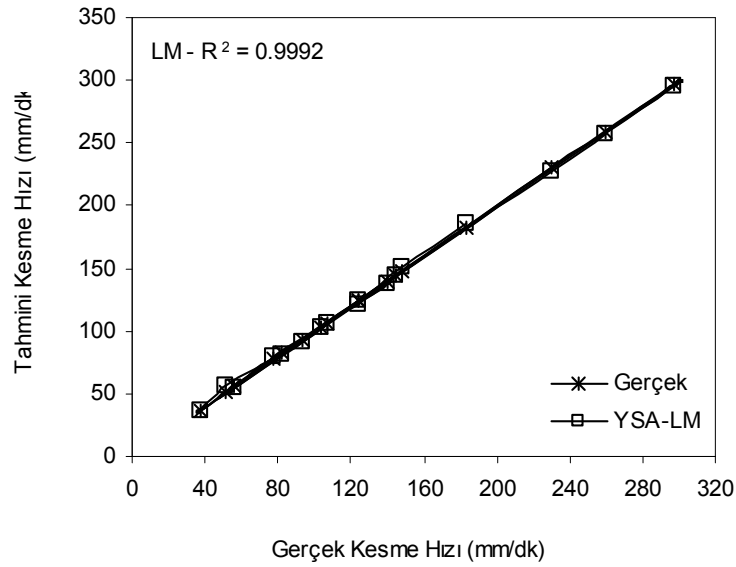
Test değerleri dikkate alınarak elde edilen Nöron sayısı–RMSE arasındaki ilişki, Şekil 5.10’ da görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, ortalama hata kareleri kökü (RMSE), LM için 10 nöronunda, SCG için 9 nöronunda optimum değere ulaşmaktadır. Bir başka deyişle, en küçük RMSE değerinde minimum hata elde edilmektedir.



Şekil 5.10. Ortalama Hata Kareleri Kökünün Nöron Sayısıyla Değişimi (RMSE – Test)

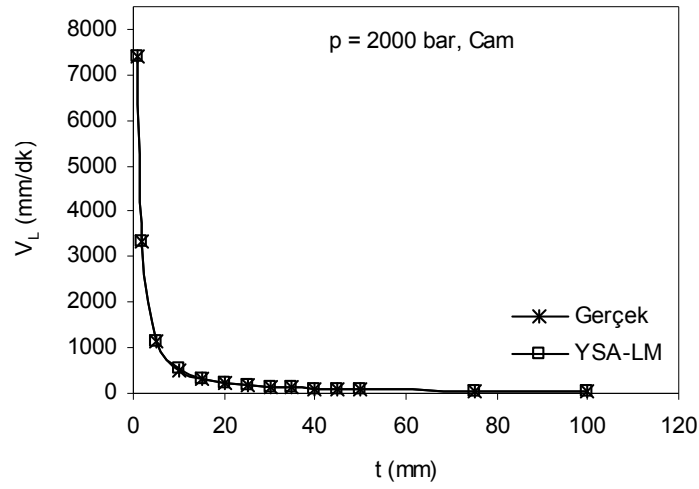


Şekil 5.11. Korelasyon Katsayısının Değişimi (R^2 – Eğitim – YSA)

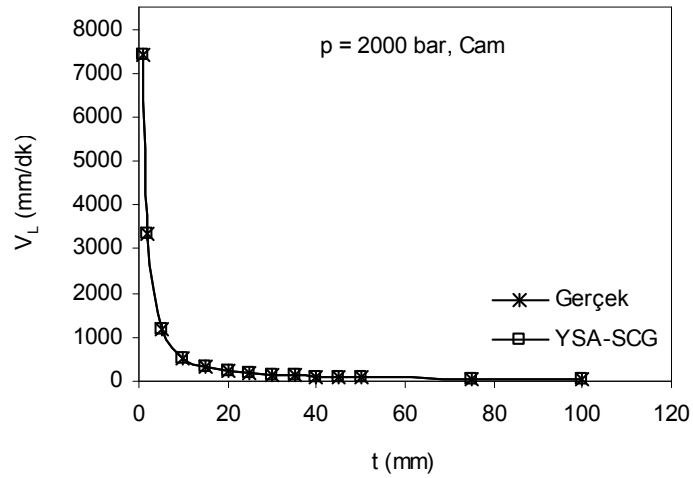


Şekil 5.12. Korelasyon Katsayısının Değişimi (R^2 – Test – LM)

Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’ de sırasıyla, eğitim ve test değerleri için korelasyon katsayısının değişimi gösterilmiştir. YSA değerlerindeki ortalama mutlak hatanın minimum değerinde $R^2 = 1$ ’e yaklaşır. Şekilden de anlaşıldığı gibi, eğitim ve test değerlerindeki hata sırasıyla, LM için % 0,12 – % 1,34 arasında değişirken SCG için % 2,59 – % 7,36 arasında değişmektedir.

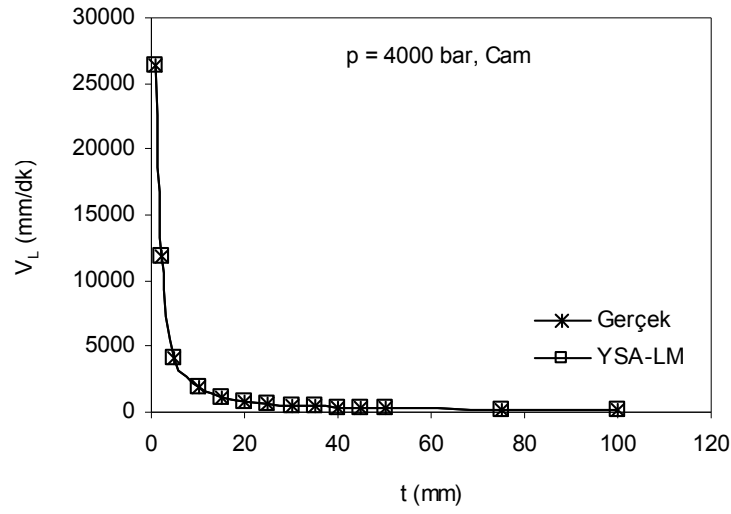


Şekil 5.13 Geçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 2000 bar, YSA-LM)

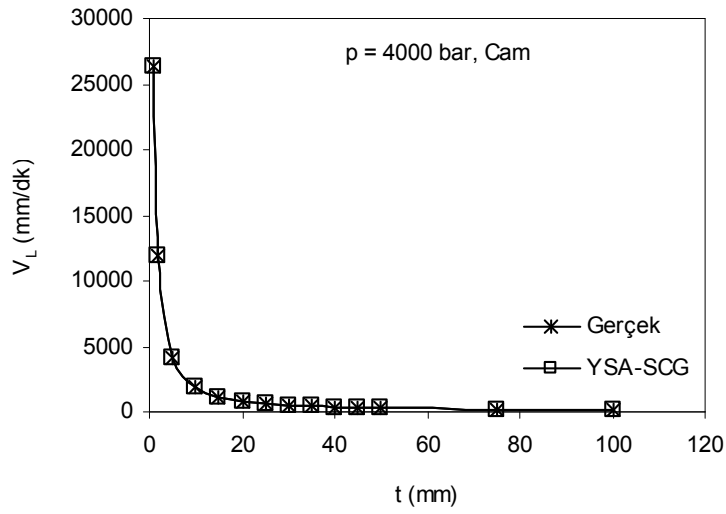


Şekil 5.14. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 2000 bar, YSA-SCG)

Sabit çalışma basıncında (2000 bar) kesilen cam için elde edilen YSA sonuçları Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'de gösterilmiştir. Kesme hızının kalınlığa göre değişimi, LM ve SCG algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritma için elde edilen verilerin gerçek değerlerle çakışması, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini göstermektedir.

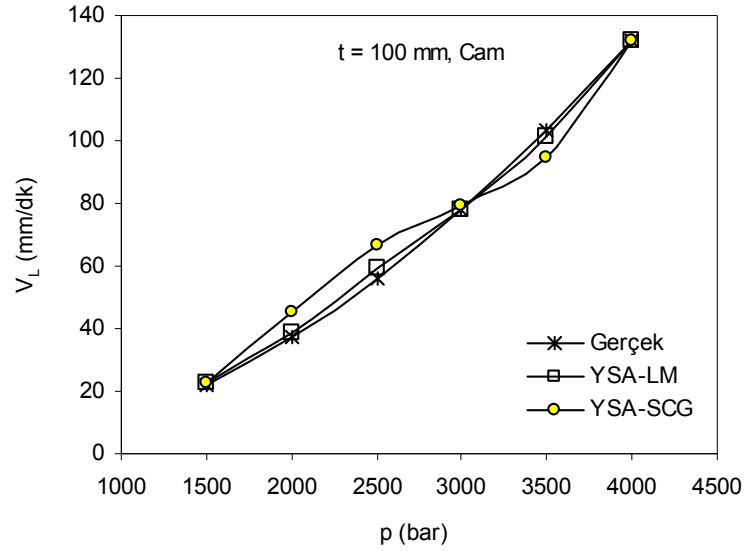


Şekil 5.15. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 4000 bar, YSA-LM)



Şekil 5.16. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 4000 bar, YSA-SCG)

Kesme hızıyla malzeme kalınlığı arasında 4000 bar basınçta elde edilen ilişki, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16' da görülmektedir. Şekil 5.15 ve Şekil 5.16' da gösterilen grafikler, sırasıyla LM ve SCG eğitim algoritmalarına göre oluşturulmuştur. Şekil 5.17 'de; t = 100 mm kalınlıktaki camın kesilmesi için gerekli basınç ve kesme hızı değerleri görülmektedir.



Şekil 5.17. Gerçek Kesme Hızının Basınca göre Değişimi (t = 100 mm)

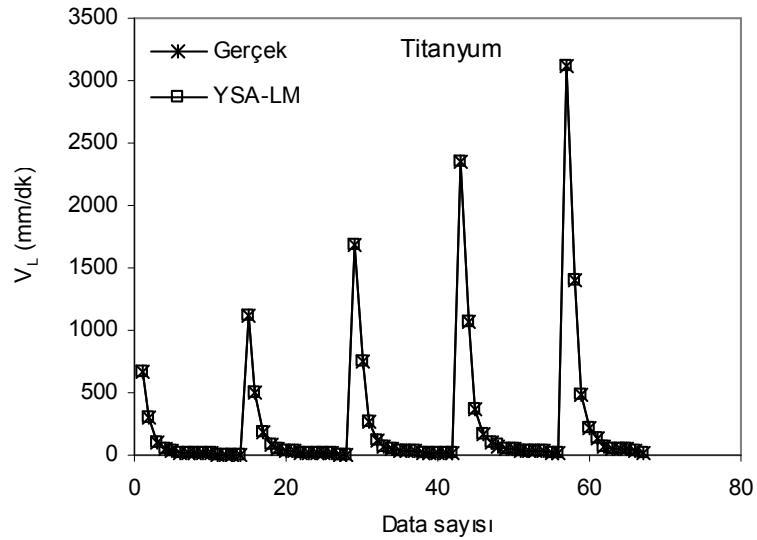
Çizelge 5.2. Aşındırıcı Su Jeti Sisteminde Cam Kesme için YSA Değerleri

Malzeme	Cam					
Eğitim Algoritması	Levenberg-Marquardt Backpropagation (LM) Scaled Conjugate Gradient Backpropagation (SCG)					
Transfer Fonksiyonu	Tansig (Hyperbolic tangent sigmoid)			Gizli tabaka		
Transfer Fonksiyonu	Purelin (Linear transfer fonksiyonu)			Çıkış tabaka		
LM	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
7	0,71	0,0019	1	5,03	0,00451	0,99910
8	0,77	0,0023	1	1,72	0,00210	0,99980
9	0,53	0,0015	1	6,92	0,00644	0,99820
10	0,24	0,0005	1	1,34	0,00138	0,99992
11	0,57	0,0020	1	4,36	0,00447	0,99912
12	0,12	0,0003	1	2,76	0,00238	0,99975
13	0,25	0,0007	1	4,27	0,00512	0,99885
SCG	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
7	13,65	0,02953	0,99997	14,32	0,02112	0,98037
8	8,99	0,03107	0,99997	11,39	0,01885	0,98435
9	3,22	0,01377	0,99999	10,89	0,01217	0,99347
10	6,86	0,01644	0,99999	8,97	0,01424	0,99107
11	6,98	0,01688	0,99999	10,14	0,01524	0,98977
12	2,59	0,00775	1,00000	13,93	0,01320	0,99233
13	6,76	0,01643	0,99999	7,36	0,01219	0,99346

Çizelge 5.2’ de verilen test değerleri incelendiğinde, LM algoritması için 10 nöron, SCG algoritması için 13 nöron sayısında, en iyi sonuçlar elde edilmiştir. LM ve SCG algoritmasında MAPE değerleri sırasıyla % 1,34 ve % 7,36 olarak hesaplanmıştır.

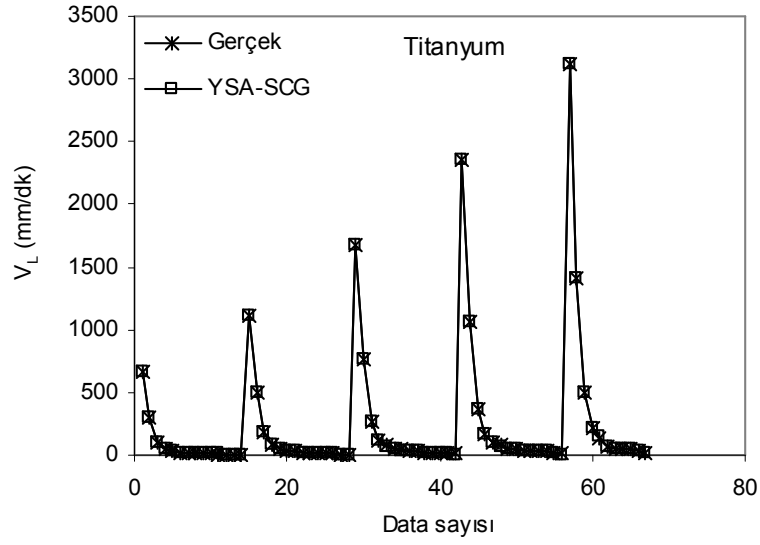
5.4.2. Titanyum için elde edilen YSA sonuçları

ASJ sisteminde titanyum kesme için yapılan modellemede toplam 84 adet veri kullanılmıştır. Bunlardan 67 tanesi eğitim verileri olarak belirlenmiştir. Bu veriler, LM eğitim algoritmasında eğitilmiştir. Eğitim sonucunda elde edilen YSA değerlerindeki kesme (ilerleme) hızı ile gerçek kesme hızı değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.18’ de gösterilmiştir.

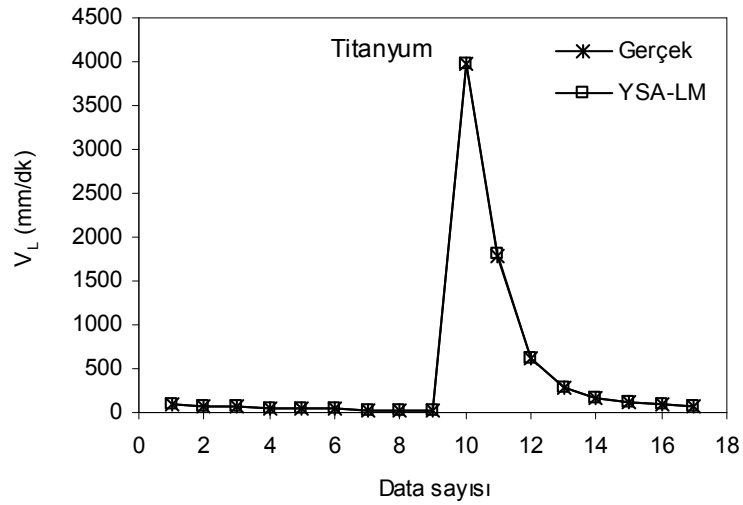


Şekil 5.18. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-LM)

LM eğitiminde kullanılan verilerin aynısı, SCG algoritmasında yeniden eğitilmiş ve elde edilen sonuçların gerçek değerlerle uyum içerisinde olduğu Şekil 5.19’ da gösterilmiştir.



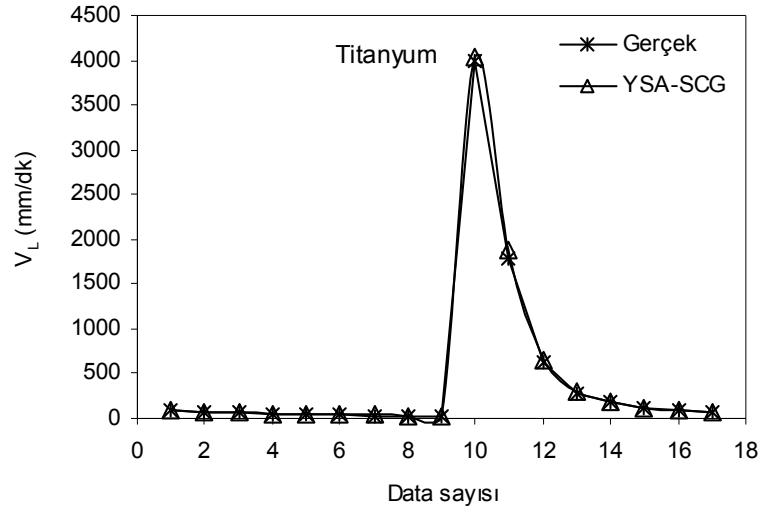
Şekil 5.19 Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-SCG)



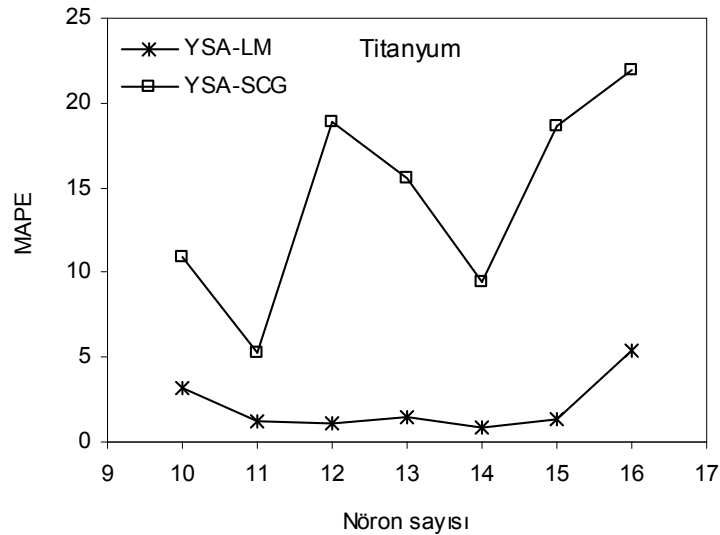
Şekil 5.20. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-LM)

Titanyum kesmeye ait toplam 84 verinin 17 tanesi test verileri olarak seçilmiştir. Seçilen bu veriler önce LM, daha sonra SCG algoritmalarında eğitilerek YSA ağı oluşturulmuştur. YSA değerleriyle gerçek veriler arasında her iki algoritma için elde

edilen ilişki, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’ de gösterilmiştir. Gerçek verilerle YSA değerleri karşılaştırıldığında, LM eğitim algoritmasının SCG’ ye göre çok daha başarılı olduğu açıkça görülmektedir.

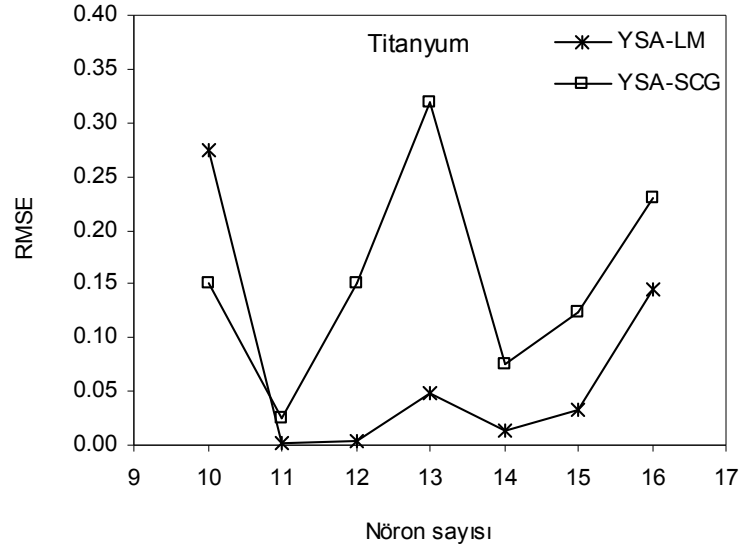


Şekil 5.21. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-SCG)



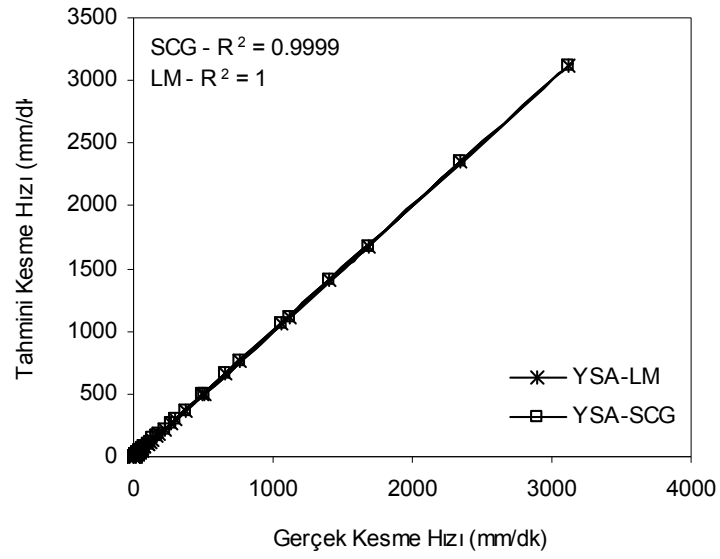
Şekil 5.22. Ortalama Mutlak Yüzde Hatanın Nöron Sayısıyla Değişimi (MAPE – Test)

Titanyum kesme için oluşturulan YSA sisteminde test değerleri dikkate alınarak, en iyi ağ yapısındaki nöron sayılarıyla ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) arasındaki ilişki, Şekil 5.22’ de verilmiştir. Oluşturulan en iyi ağ yapısında, LM eğitim algoritması için 12 nöron sayısında, SCG eğitim algoritmasında ise 11 nöron için MAPE değerinin minimum olduğu Şekil 5.22’ de açıkça görülmektedir. Bu modellemede kullanılan test değerleri, toplam veri setinden rasgele seçilmiştir.

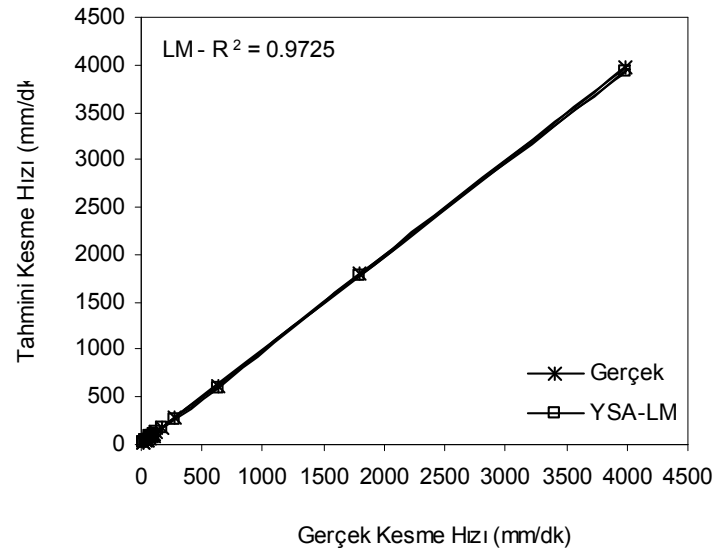


Şekil 5.23. Ortalama Hata Kareleri Kökünün Nöron Sayısıyla Değişimi (RMSE – Test)

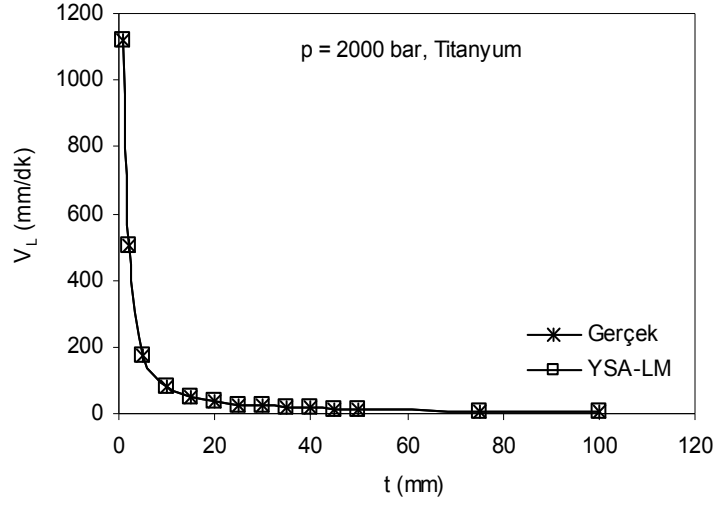
Test değerleri dikkate alınarak elde edilen Nöron sayısı – RMSE arasındaki ilişki, Şekil 5.23’ de görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, ortalama hata kareleri kökü (RMSE), LM için 11 nörona, SCG için ise 11 nörona optimum değere ulaşmaktadır. Bir başka deyişle, en küçük RMSE değerinde minimum hata elde edilmektedir. Şekil 5.24 ve Şekil 5.25’ de sırasıyla, eğitim ve test değerleri için korelasyon katsayısının değişimi gösterilmiştir. YSA değerlerindeki ortalama mutlak hatanın minimum değerinde $R^2 = 1$ ’e yaklaşır. Şekilden de anlaşıldığı gibi, eğitim ve test değerlerindeki hata sırasıyla; LM için % 0,03 – % 1,05 arasında değişirken, SCG için % 5,68 – % 5,30 arasında değişmektedir.



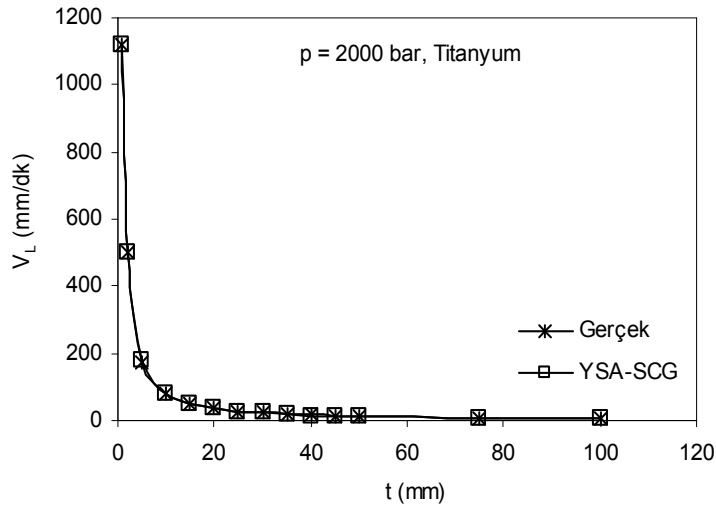
Şekil 5.24. Korelasyon Katsayısının Değişimi (R^2 – Eğitim – YSA)



Şekil 5.25. Korelasyon Katsayısının Değişimi (R^2 – Test – LM)

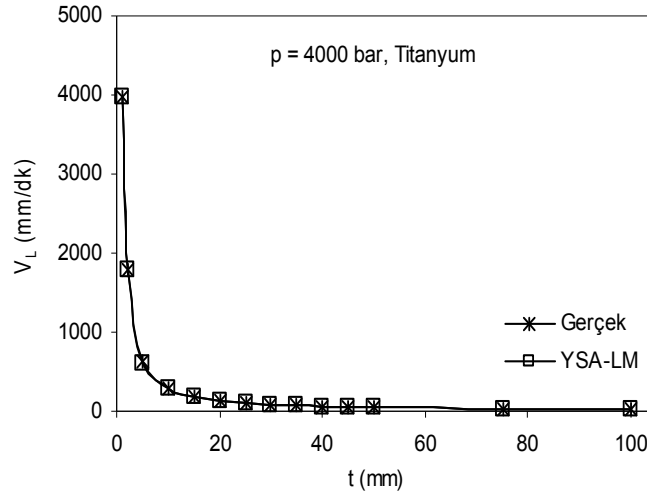


Şekil 5.26. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p=2000 bar, YSA-LM)

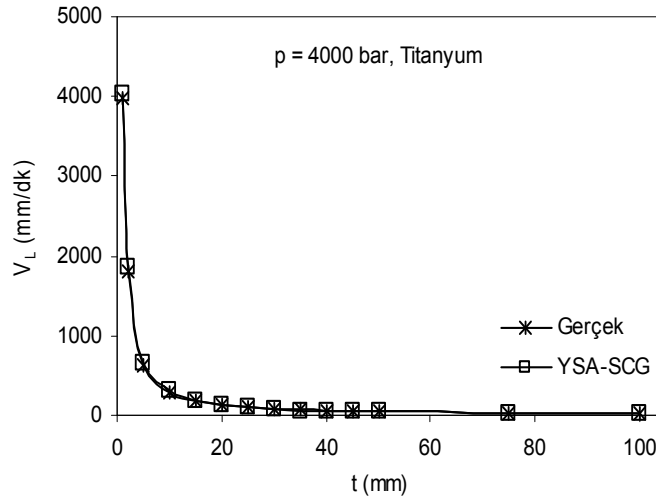


Şekil 5.27. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p=2000 bar, YSA-SCG)

Sabit çalışma basıncında (2000 bar) kesilen titanyum için elde edilen YSA sonuçları Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de gösterilmiştir. Kesme hızının kalınlığa göre değişimi, LM ve SCG algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritma için elde edilen verilerin gerçek değerlerle çakışması, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini göstermektedir.

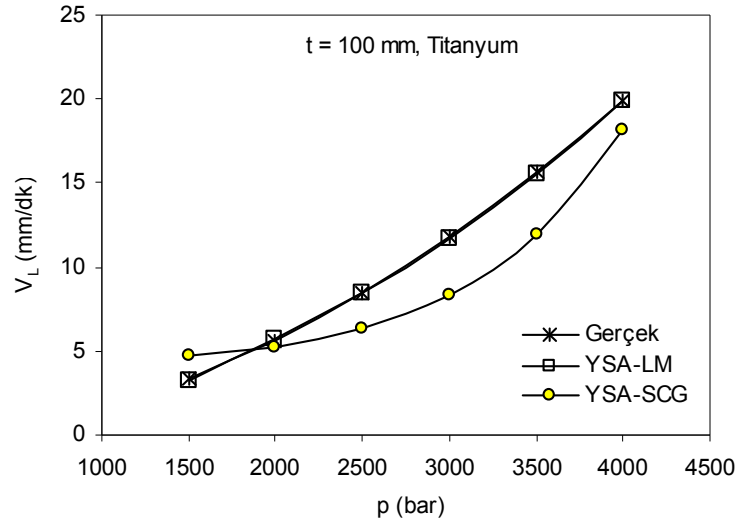


Şekil 5.28 Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi ($p=4000$ bar, YSA-LM)



Şekil 5.29 Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi ($p=4000$ bar, YSA-SCG)

Kesme hızıyla malzeme kalınlığı arasında 4000 bar basınçta elde edilen ilişki Şekil 5.28 ve Şekil 5.29’ da görülmektedir. Şekil 5.28 ve Şekil 5.29’ da gösterilen grafikler, sırasıyla, LM ve SCG eğitim algoritmalarına göre oluşturulmuştur. Şekil 5.30 ‘da $t = 100$ mm kalınlıktaki titanyumun kesilmesi için gerekli basınç ve kesme hızı değerleri görülmektedir.



Şekil 5.30. Gerçek Kesme Hızının Basınca göre Değişimi (t = 100 mm)

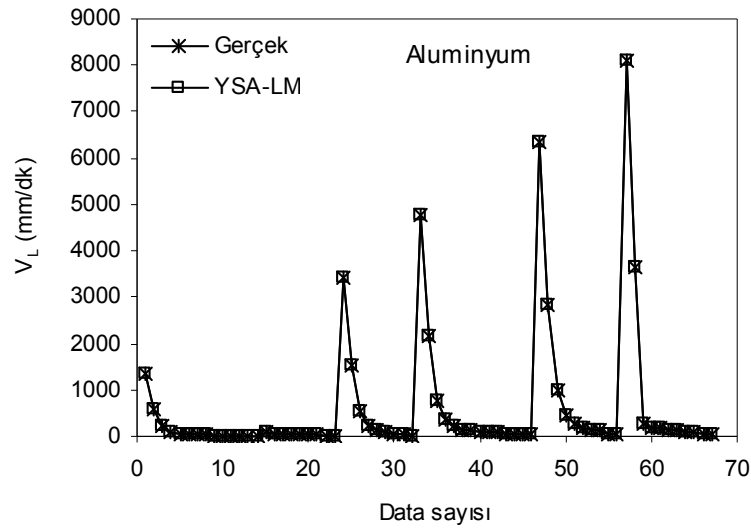
Çizelge 5.3 Aşındırıcı Su Jeti Sisteminde Titanyum Kesme için YSA Değerleri

Malzeme	Titanyum					
Eğitim Algoritması	Levenberg-Marquardt Backpropagation (LM) Scaled Conjugate Gradient Backpropagation (SCG)					
Transfer Fonksiyonu	Tansig (Hyperbolic tangent sigmoid)			Gizli tabaka		
Transfer Fonksiyonu	Purelin (Linear transfer fonksiyonu)			Çıkış tabaka		
LM	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
10	0,873	0,000222	1	3,143	0,27424	0,9348
11	0,200	0,000084	1	1,261	0,00277	1,0000
12	0,196	0,000083	1	1,050	0,00327	1,0000
13	0,209	0,000052	1	1,526	0,04784	0,9980
14	0,140	0,000039	1	1,458	0,05437	0,9989
15	0,202	0,000049	1	1,371	0,03337	0,9990
16	0,031	0,000009	1	5,369	0,14446	0,9819
SCG	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
10	10,087	0,00238	0,99998	10,947	0,15042	0,9804
11	5,681	0,00195	0,99999	5,308	0,02443	0,9995
12	14,612	0,00466	0,99994	18,892	0,15084	0,9803
13	11,104	0,00421	0,99995	15,505	0,31892	0,9119
14	8,222	0,00228	0,99999	9,461	0,07605	0,9950
15	16,382	0,00510	0,99993	18,576	0,12405	0,9867
16	13,118	0,00515	0,99993	21,888	0,23086	0,9538

Çizelge 5.3' de verilen test değerleri incelendiğinde, LM algoritması için 12 nöron, SCG algoritması için 11 nöron sayısında, en iyi sonuçlar elde edilmiştir. LM ve SCG algoritmalarında MAPE değerleri sırasıyla, % 1,05 ve % 5,30 olarak hesaplanmıştır.

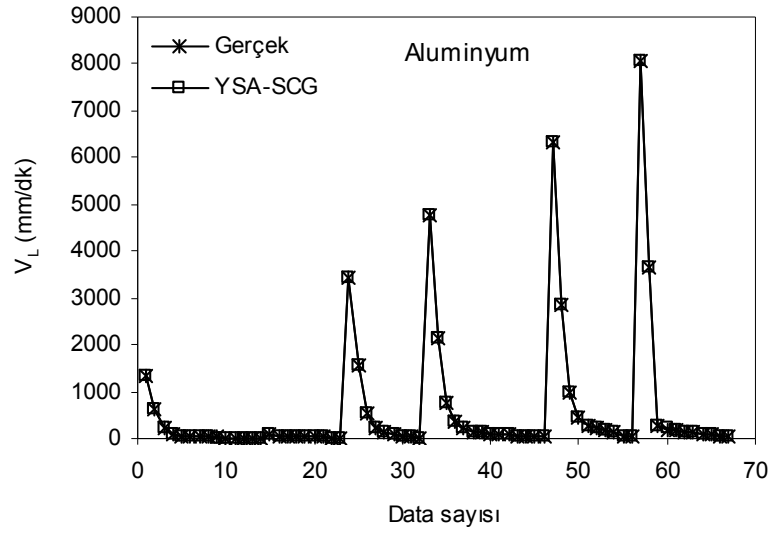
5.4.3. Alüminyum için elde edilen YSA sonuçları

ASJ sisteminde alüminyum kesme için yapılan modellemede toplam 84 adet veri kullanılmıştır. Bunlardan 67 tanesi eğitim verileri olarak belirlenmiştir. Bu veriler, LM eğitim algoritmasında eğitilmiştir. Eğitim sonucunda elde edilen YSA değerlerindeki kesme (ilerleme) hızı ile gerçek kesme hızı değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.31' de gösterilmiştir.

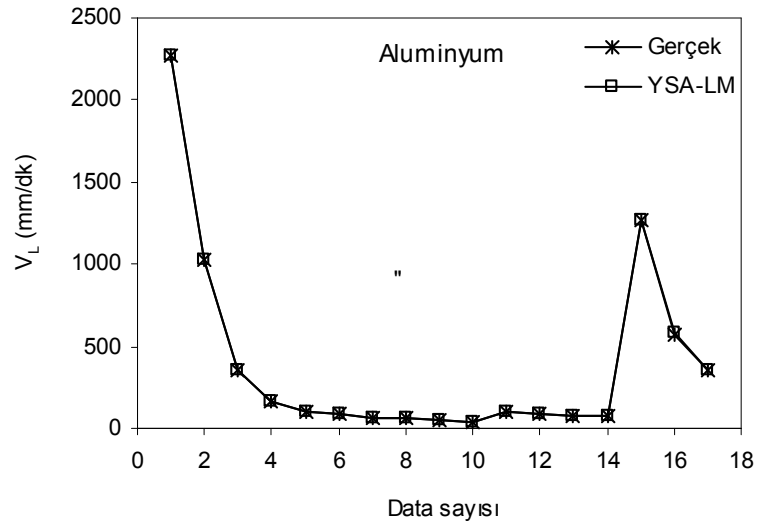


Şekil 5.31. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-LM)

LM eğitiminde kullanılan verilerin aynısı, SCG algoritmasında yeniden eğitilmiş ve elde edilen sonuçların gerçek değerlerle uyum içerisinde olduğu Şekil 5.32' de gösterilmiştir.



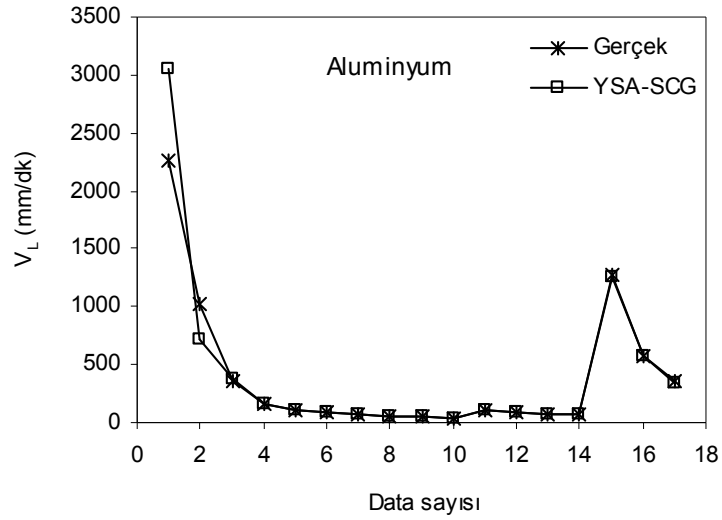
Şekil 5.32 Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-SCG)



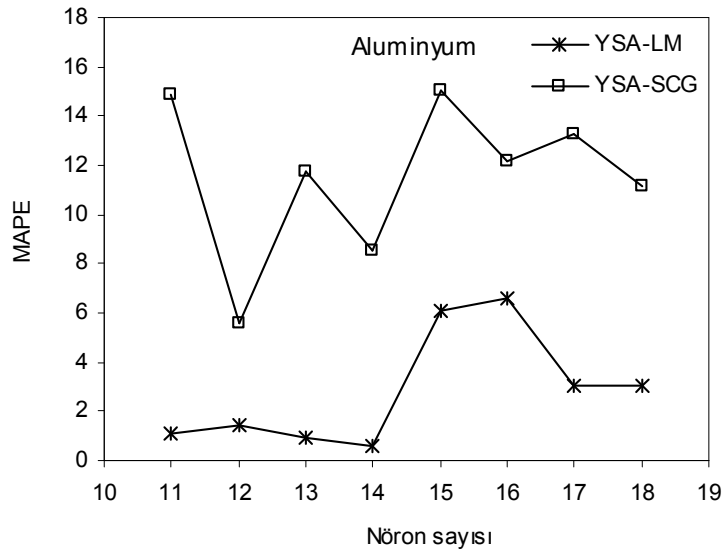
Şekil 5.33. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-LM)

Alüminyum kesmeye ait toplam 84 verinin 17 tanesi test verileri olarak seçilmiştir. Seçilen bu veriler önce LM, daha sonra SCG algoritmalarında eğitilerek YSA ağı oluşturulmuştur. YSA değerleriyle gerçek veriler arasında her iki algoritma

için elde edilen ilişki, Şekil 5.33 ve Şekil 5.34’ de gösterilmiştir. Gerçek verilerle YSA değerleri incelendiğinde, LM eğitim algoritmasının SCG’ ye göre çok daha başarılı olduğu açıkça görülmektedir.

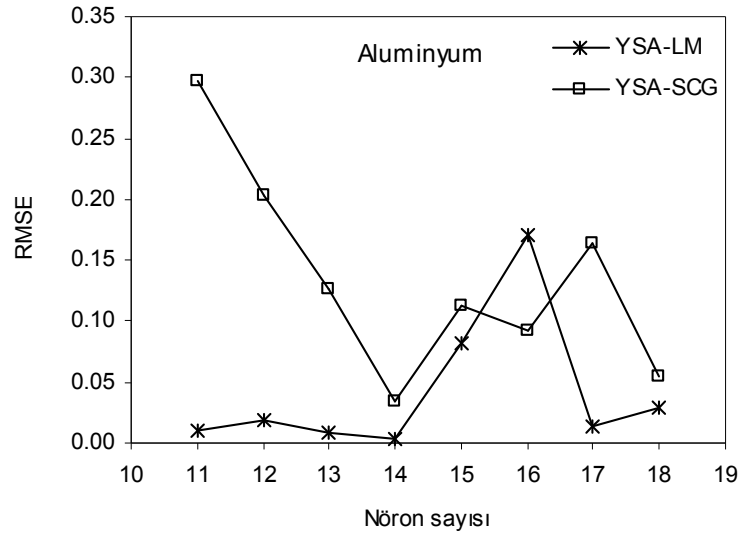


Şekil 5.34. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-SCG)



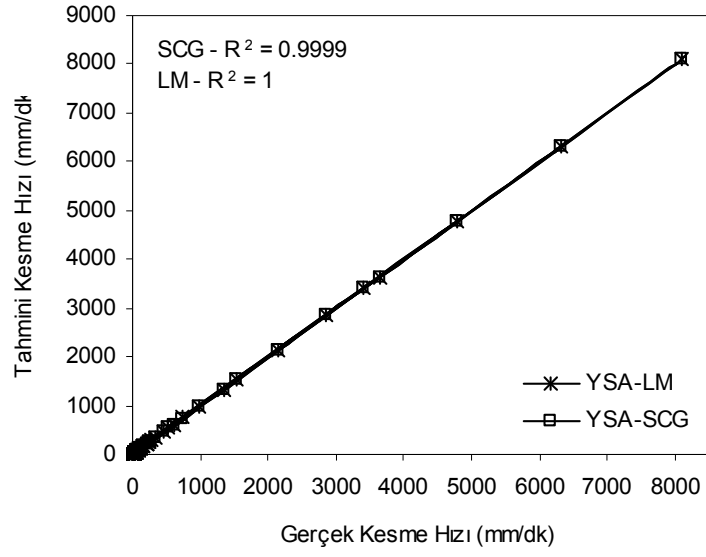
Şekil 5.35. Ortalama Mutlak Yüzde Hatanın Nöron Sayısıyla Değişimi (MAPE – Test)

Aluminyum kesme için oluşturulan YSA sisteminde test değerleri dikkate alınarak, en iyi ağ yapısındaki nöron sayılarıyla ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) arasındaki ilişki, Şekil 5.35’ de verilmiştir. Oluşturulan en iyi ağ yapısında, LM eğitim algoritması için 14 nöron sayısında, SCG eğitim algoritmasında ise 12 nöron için MAPE değerinin minimum olduğu Şekil 5.35’ de açıkça görülmektedir. Bu modellemede kullanılan test değerleri, toplam veri setinden rasgele seçilmiştir.

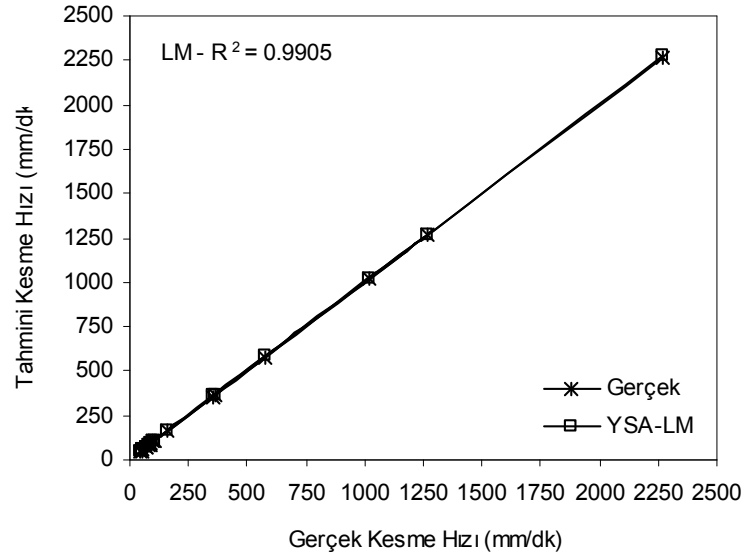


Şekil 5.36. Ortalama Hata Kareleri Kökünün Nöron Sayısıyla Değişimi (RMSE – Test)

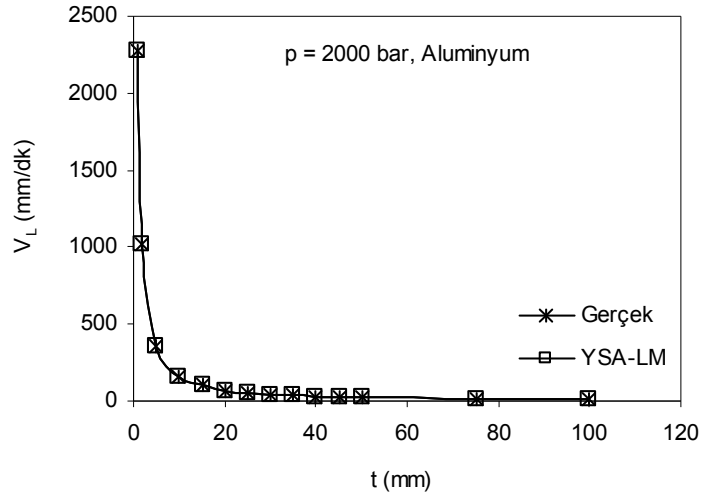
Test değerleri dikkate alınarak elde edilen nöron sayısı – RMSE arasındaki ilişki, Şekil 5.36’ da görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, ortalama hata kareleri kökü (RMSE), LM için 14 nöronunda, SCG için 14 nöronunda optimum değere ulaşmaktadır. Bir başka deyişle en küçük RMSE değerinde minimum hata elde edilmektedir. Şekil 5.37 ve Şekil 5.38’ de sırasıyla eğitim ve test değerleri için korelasyon katsayısının değişimi gösterilmiştir. YSA değerlerindeki ortalama mutlak hatanın minimum değerinde $R^2 = 1$ ’e yaklaşır. Şekilden de anlaşıldığı gibi, eğitim ve test değerlerindeki hata sırasıyla; LM için % 0,03 – % 0,63 arasında değişirken, SCG için % 5,20 – % 5,61 arasında değişmektedir.



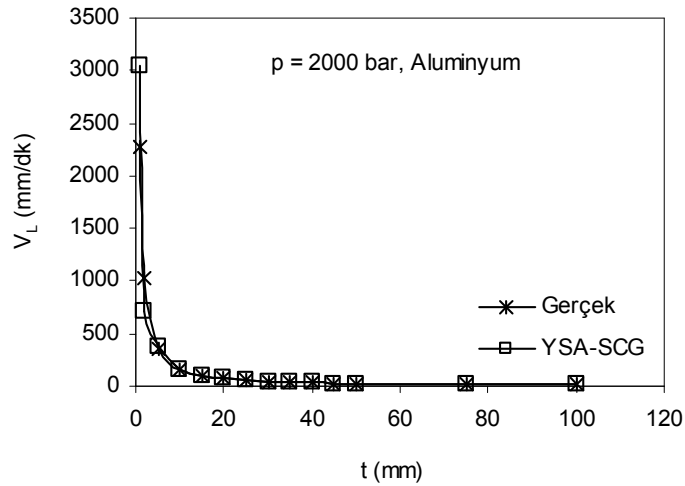
Şekil 5.37. Korelasyon Katsayının (R^2) Değişimi (Eğitim-YSA)



Şekil 5.38. Korelasyon Katsayının Değişimi (R^2 – Test – LM)

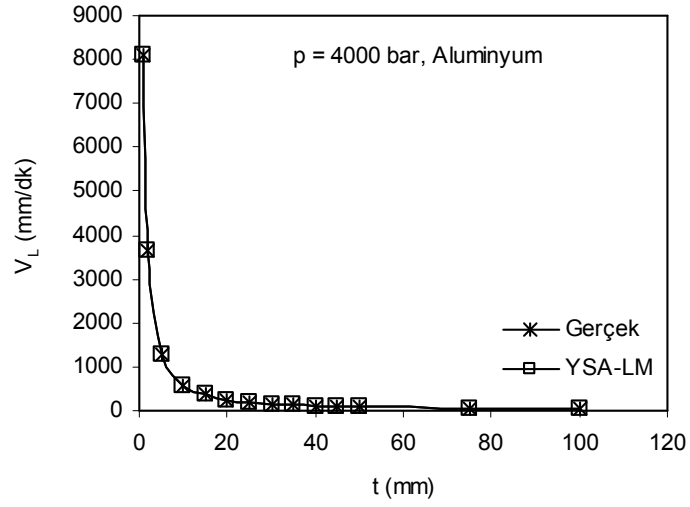


Şekil 5.39. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 2000 bar, YSA-LM)

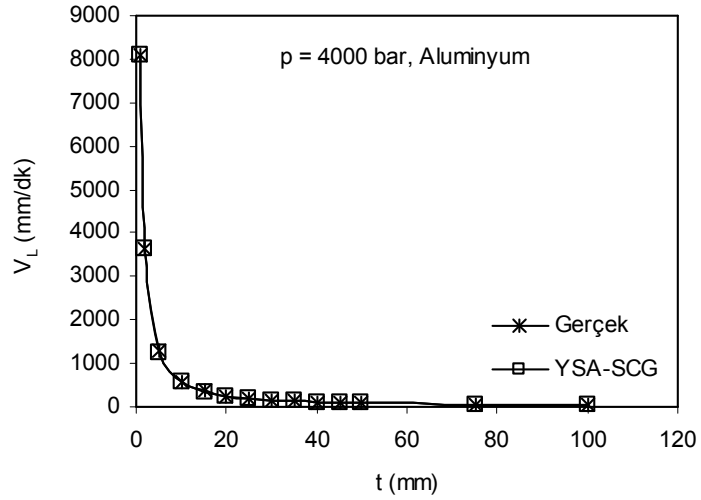


Şekil 5.40. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 2000 bar, YSA-SCG)

Sabit çalışma basıncında (2000 bar) kesilen alüminyum için elde edilen YSA sonuçları Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'da gösterilmiştir. Kesme hızının kalınlığa göre değişimi, LM ve SCG algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritma için elde edilen verilerin gerçek değerlerle çakışması, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini göstermektedir.

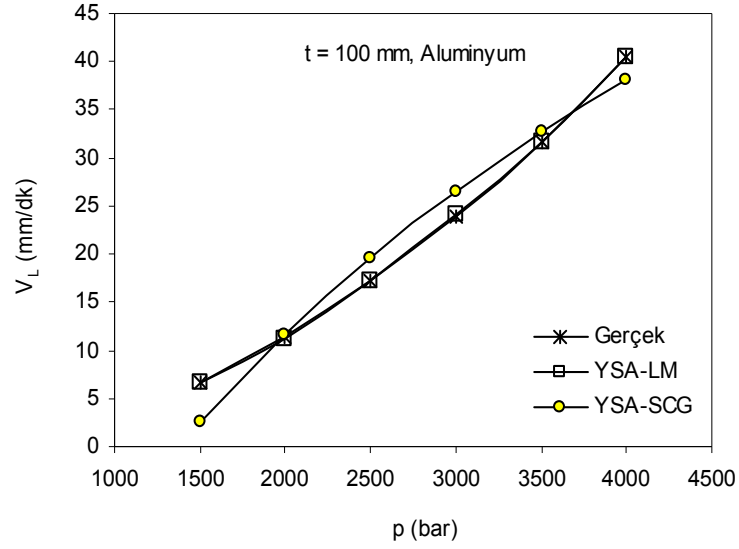


Şekil 5.41. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 4000 bar, YSA-LM)



Şekil 5.42. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 4000 bar, YSA-SCG)

Kesme hızıyla malzeme kalınlığı arasında 4000 bar basınçta elde edilen ilişki Şekil 5.41 ve Şekil 5.42’ de görülmektedir. Şekil 5.41 ve Şekil 5.42’ de gösterilen grafikler, sırasıyla LM ve SCG eğitim algoritmalarına göre oluşturulmuştur. Şekil 5.43 ‘de $t = 100$ mm kalınlıktaki alüminyumun kesilmesi için gerekli basınç ve kesme hızı değerleri görülmektedir.



Şekil 5.43. Gerçek Kesme Hızının Basınca göre Değişimi (t = 100 mm)

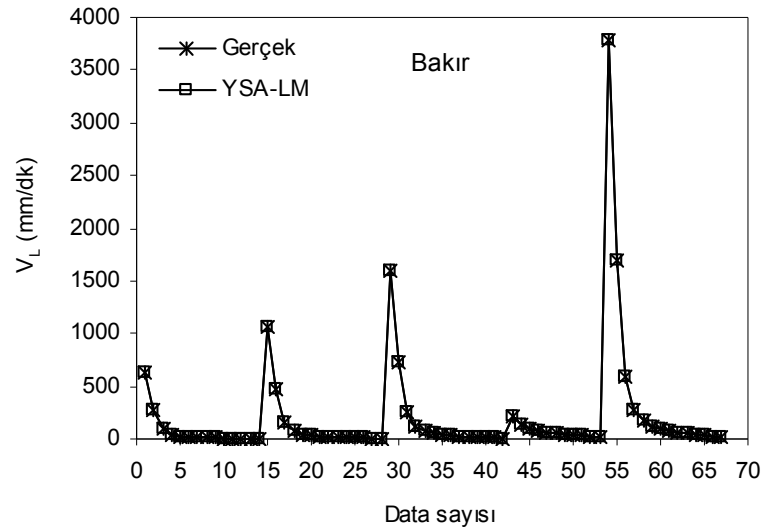
Çizelge 5.4 Aşındırıcı Su Jeti Sisteminde Alüminyum Kesme için YSA değerleri

Malzeme	Alüminyum					
Eğitim Algoritması	Levenberg-Marquardt Backpropagation (LM) Scaled Conjugate Gradient Backpropagation (SCG)					
Transfer Fonksiyonu	Tansig (Hyperbolic tangent sigmoid)			Gizli tabaka		
Transfer Fonksiyonu	Purelin (Linear transfer function)			Çıkış tabaka		
LM	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
11	0,31	0,00016	1	1,06	0,0106	0,99978
12	0,77	0,00039	1	1,41	0,0184	0,99932
13	0,27	0,00018	1	0,89	0,0094	0,99982
14	0,17	0,00017	1	0,63	0,0041	0,99997
15	0,03	0,00001	1	6,09	0,0826	0,98633
16	0,42	0,00019	1	6,61	0,1709	0,94146
17	0,18	0,00010	1	3,06	0,0145	0,99958
18	0,06	0,00004	1	3,08	0,0296	0,99825
SCG	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
11	13,85	0,0088	0,99997	14,85	0,2964	0,8240
12	5,20	0,0032	1,00000	5,61	0,2037	0,9169
13	12,62	0,0062	0,99998	11,78	0,1265	0,9680
14	7,88	0,0051	0,99999	8,55	0,0338	0,9977
15	11,96	0,0056	0,99999	15,00	0,1126	0,9746
16	10,75	0,0064	0,99998	12,17	0,0927	0,9828
17	6,71	0,0046	0,99999	13,28	0,1636	0,9464
18	9,63	0,0071	0,99998	11,19	0,0553	0,9939

Çizelge 5.4' de verilen test değerleri incelendiğinde, LM algoritması için 14 nöron, SCG algoritması için 12 nöron sayısında, en iyi sonuçlar elde edilmiştir. LM ve SCG algoritmalarında MAPE değerleri sırasıyla, % 0,63 ve % 5,61 olarak hesaplanmıştır.

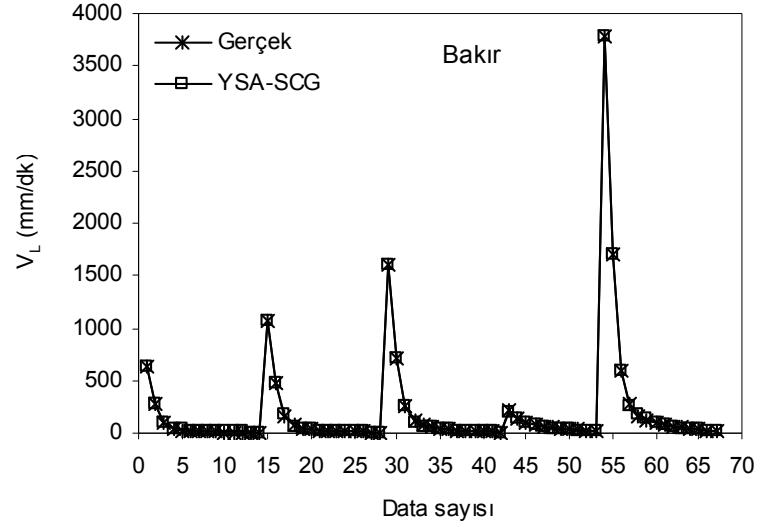
5.4.4. Bakır için elde edilen YSA sonuçları

ASJ sisteminde bakır kesme için yapılan modellemede toplam 84 adet veri kullanılmıştır. Bunlardan 67 tanesi eğitim verileri olarak belirlenmiştir. Bu veriler, LM eğitim algoritmasında eğitilmiştir. Eğitime sonucunda elde edilen YSA değerlerindeki kesme (ilerleme) hızı ile gerçek kesme hızı değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.44' de gösterilmiştir.

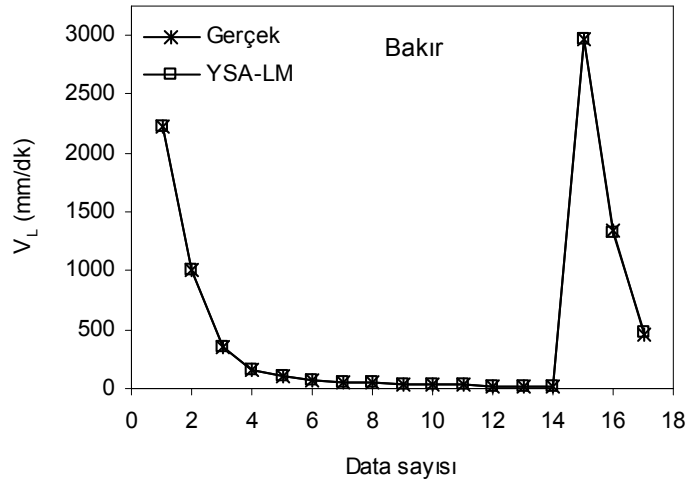


Şekil 5.44. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-LM)

LM eğitiminde kullanılan verilerin aynısı, SCG algoritmasında yeniden eğitilmiş ve elde edilen sonuçların gerçek değerlerle uyum içerisinde olduğu Şekil 5.45' de gösterilmiştir.



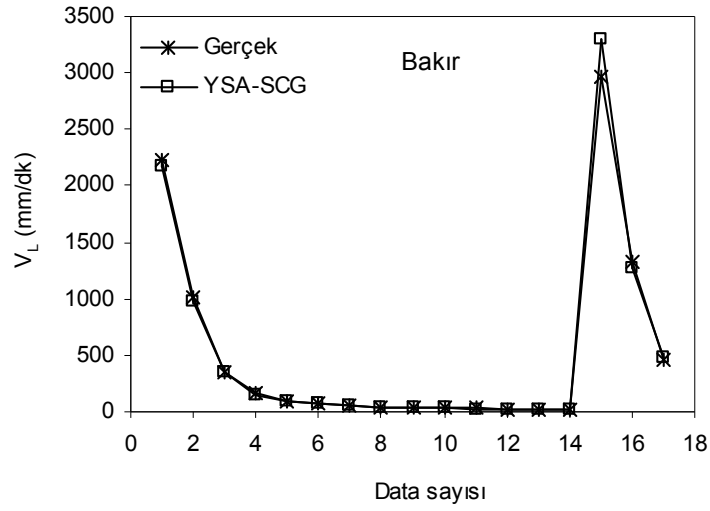
Şekil 5.45. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-SCG)



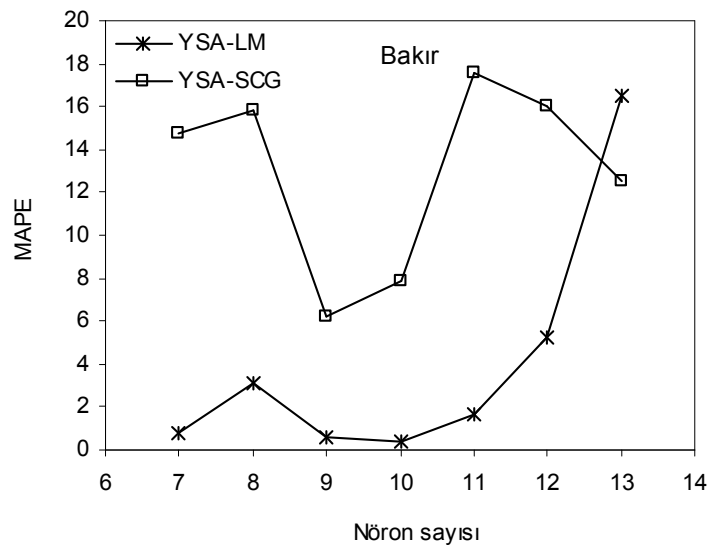
Şekil 5.46. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-LM)

Bakır kesmeye ait toplam 84 verinin 17 tanesi test verileri olarak seçilmiştir. Seçilen bu veriler önce LM, daha sonra SCG algoritmalarında eğitilerek YSA ağı oluşturulmuştur. YSA değerleriyle gerçek veriler arasında her iki algoritma için elde edilen ilişki,

Şekil 5.46 ve Şekil 5.47’ de gösterilmiştir. Gerçek verilerle YSA değerleri karşılaştırıldığında, LM eğitim algoritmasının SCG’ ye göre çok daha başarılı olduğu açıkça görülmektedir.

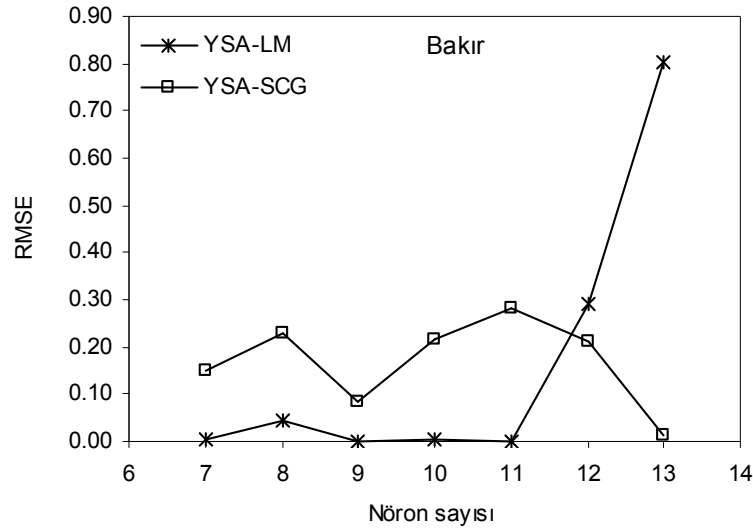


Şekil 5.47 Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-SCG)



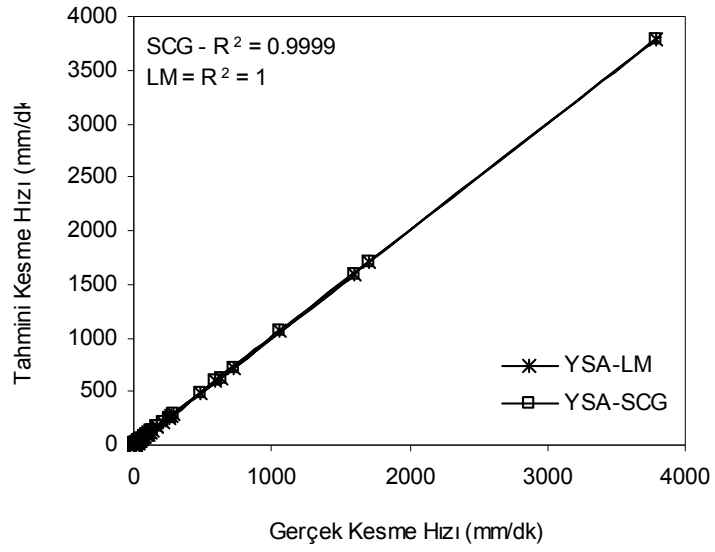
Şekil 5.48 Ortalama Mutlak Yüzde Hatanın Nöron Sayısıyla Değişimi (MAPE – Test)

Bakır kesme için oluşturulan YSA sisteminde test değerleri dikkate alınarak, en iyi ağ yapısındaki nöron sayılarıyla ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) arasındaki ilişki, Şekil 5.48’ de verilmiştir. Oluşturulan en iyi ağ yapısında, LM eğitim algoritması için 10 nöron sayısında, SCG eğitim algoritmasında ise 9 nöron için MAPE değerinin minimum olduğu Şekil 5.48’ de açıkça görülmektedir. Bu modellemede kullanılan test değerleri, toplam veri setinden rasgele seçilmiştir.

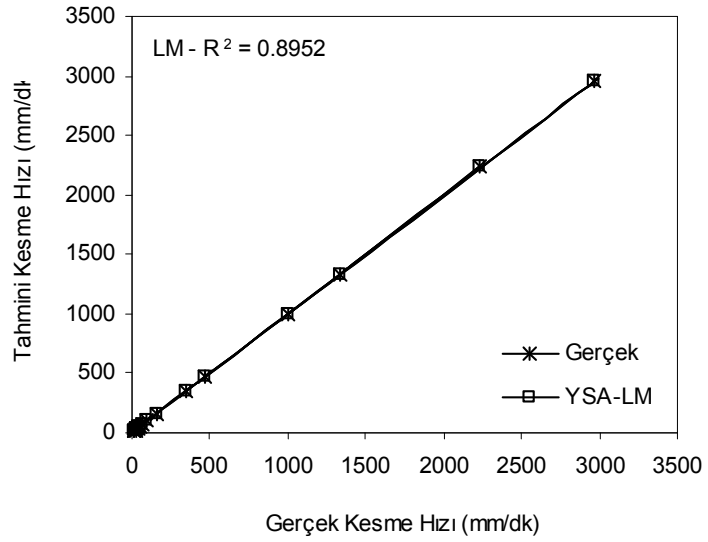


Şekil 5.49. Ortalama Hata Kareleri Kökünün Nöron Sayısıyla Değişimi (RMSE – Test)

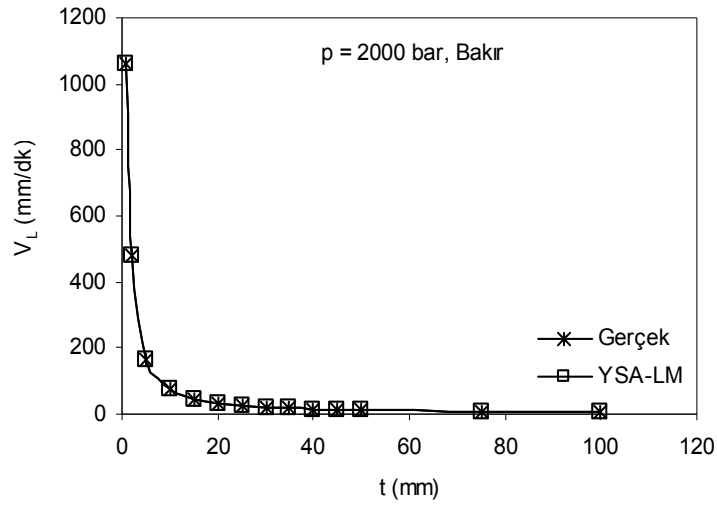
Test değerleri dikkate alınarak elde edilen Nöron sayısı – RMSE arasındaki ilişki, Şekil 5.49’ da görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, ortalama hata kareleri kökü (RMSE), LM için 9 nöronunda, SCG için 13 nöronunda optimum değere ulaşmaktadır. Bir başka deyişle en küçük RMSE değerinde minimum hata elde edilmektedir. Şekil 5.50 ve Şekil 5.51’ de sırasıyla eğitim ve test değerleri için korelasyon katsayısının değişimi gösterilmiştir. YSA değerlerindeki ortalama mutlak hatanın minimum değerinde $R^2 = 1$ ’e yaklaşır. Şekilden de anlaşıldığı gibi, eğitim ve test değerlerindeki hata sırayla, LM için % 0,24 – % 0,34 arasında değişirken, SCG için % 5,89 – % 6,18 arasında değişmektedir.



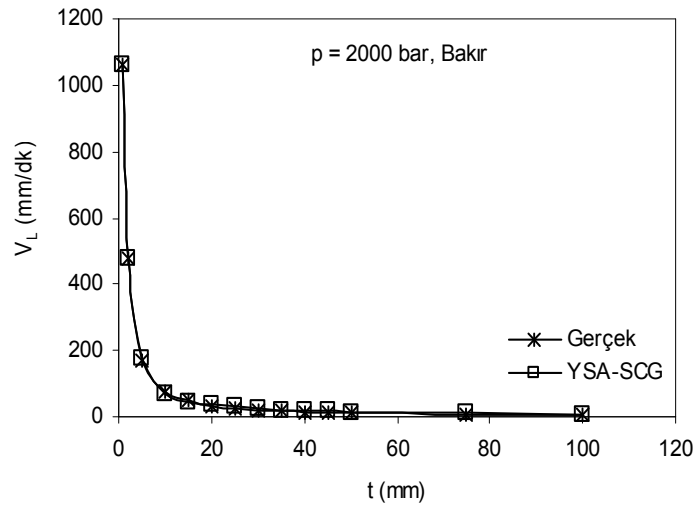
Şekil 5.50. Korelasyon Katsayısının Değişimi (R^2 –Eğitim–YSA)



Şekil 5.51. Korelasyon Katsayısının Değişimi (R^2 –Test – YSA)

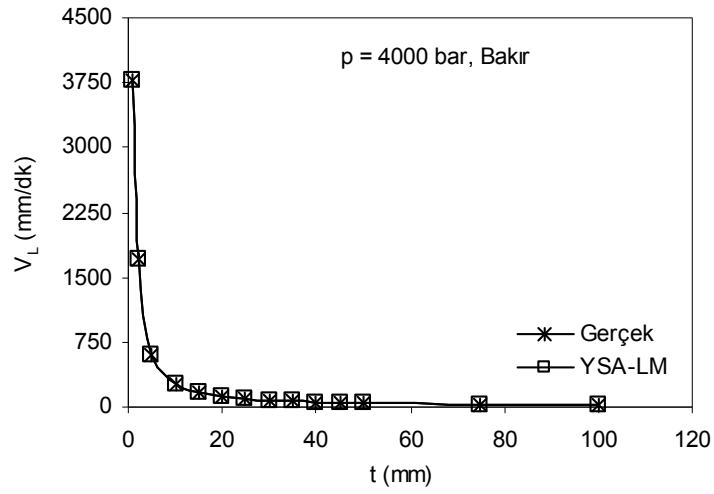


Şekil 5.52. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 2000 bar, YSA-LM)

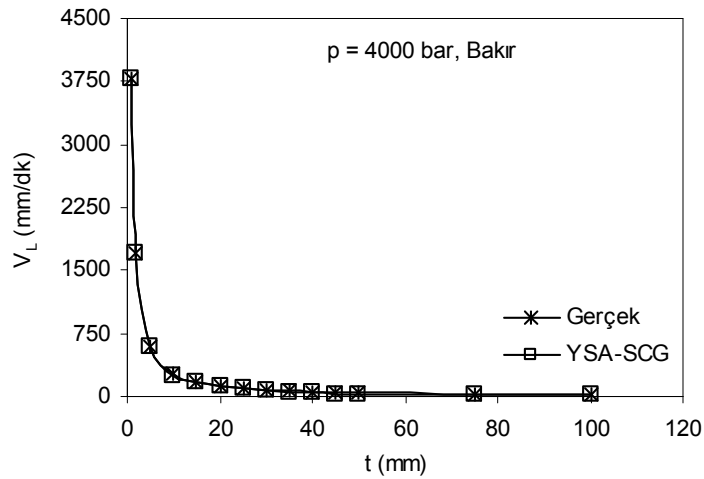


Şekil 5.53. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 2000 bar, YSA-SCG)

Sabit çalışma basıncında (2000 bar) kesilen bakır için elde edilen YSA sonuçları Şekil 5.52 ve Şekil 5.53'de gösterilmiştir. Kesme hızının kalınlığa göre değişimi, LM ve SCG algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritma için elde edilen verilerin gerçek değerlerle çakışması, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini göstermektedir.

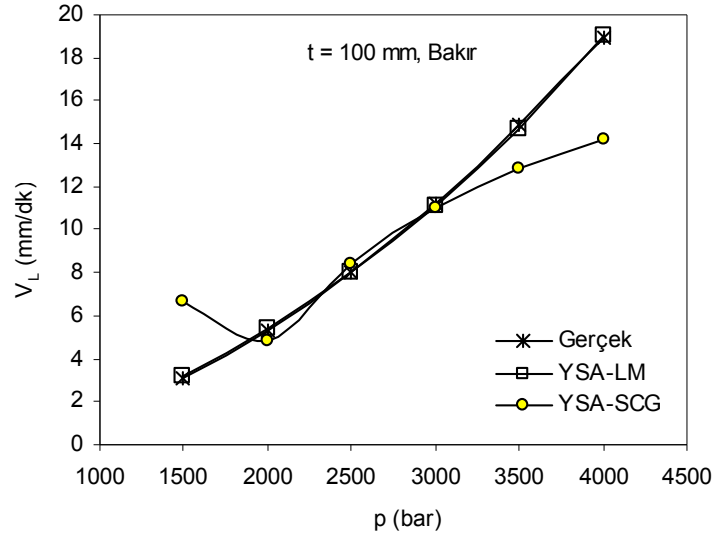


Şekil 5.54. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 4000 bar, YSA-LM)



Şekil 5.55. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 4000 bar, YSA-SCG)

Kesme hızıyla malzeme kalınlığı arasında 4000 bar basınçta elde edilen ilişki Şekil 4.54 ve Şekil 5.55’ de görülmektedir. Şekil 5.54 ve Şekil 5.55’ de gösterilen grafikler, sırasıyla LM ve SCG eğitim algoritmalarına göre oluşturulmuştur. Şekil 5.56 ‘da $t = 100$ mm kalınlıktaki bakırın kesilmesi için gerekli basınç ve kesme hızı değerleri görülmektedir.



Şekil 5.56. Gerçek Kesme Hızının Basınca göre Değişimi (t = 100 mm)

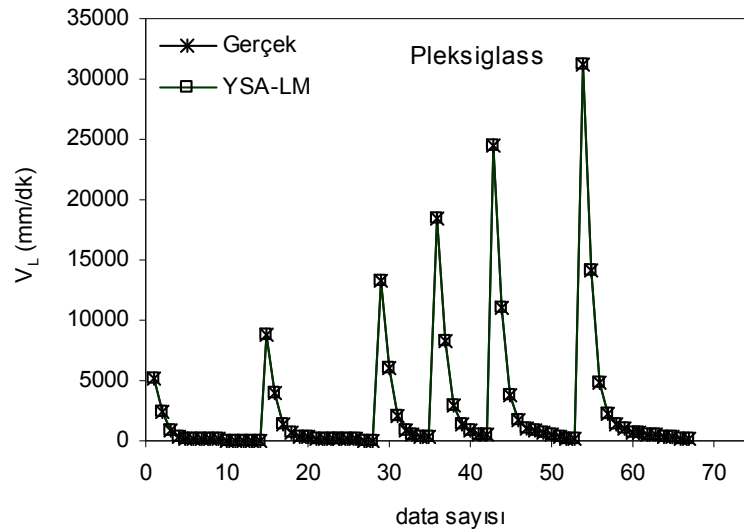
Çizelge 5.5 Aşındırıcı Su Jeti Sisteminde Bakır Kesme için YSA Değerleri

Malzeme	Bakır					
Eğitim Algoritması	Levenberg-Marquardt Backpropagation (LM) Scaled Conjugate Gradient Backpropagation (SCG)					
Transfer Fonksiyonu	Tansig (Hyperbolic tangent sigmoid)			Gizli tabaka		
Transfer Fonksiyonu	Purelin (Linear transfer fonksiyonu)			Çıkış tabaka		
LM	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
7	2,25	0,00060	1	0,80	0,0050	0,99997
8	2,61	0,00105	1	3,11	0,0454	0,99793
9	0,52	0,00013	1	0,54	0,0017	1,00000
10	0,24	0,00006	1	0,34	0,0023	1,00000
11	0,28	0,00007	1	1,70	0,0021	1,00000
12	0,84	0,00018	1	5,21	0,2923	0,91421
13	0,42	0,00009	1	16,52	0,8019	0,35428
SCG	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
7	26,91	0,00802	0,99981	14,74	0,1521	0,97678
8	10,09	0,00304	0,99997	15,85	0,2307	0,94656
9	16,64	0,00562	0,99991	6,18	0,0858	0,99262
10	11,50	0,00339	0,99997	7,82	0,2154	0,95340
11	5,89	0,00188	0,99999	17,54	0,2829	0,91962
12	16,01	0,00331	0,99997	16,07	0,2121	0,95481
13	14,32	0,00370	0,99996	12,48	0,0129	0,99983

Çizelge 5.5’ de verilen test değerleri incelendiğinde, LM algoritması için 10 nöron, SCG algoritması için 9 nöron sayısında en iyi sonuçlar elde edilmiştir. LM ve SCG algoritmalarında MAPE değerleri sırasıyla; % 0,34 ve % 6,18 olarak hesaplanmıştır.

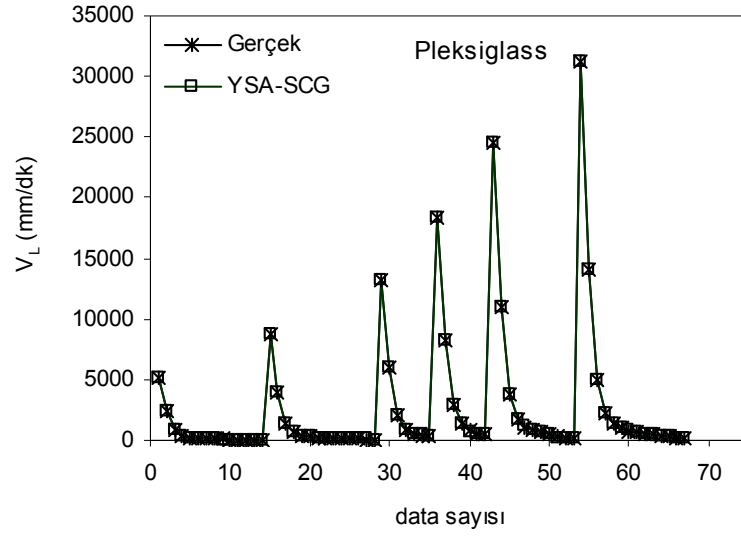
5.4.5. Pleksiglas için elde edilen YSA sonuçları

ASJ sisteminde pleksiglas kesme için yapılan modellemede toplam 84 adet veri kullanılmıştır. Bunlardan 67 tanesi eğitim verileri olarak belirlenmiştir. Bu veriler, LM öğrenme algoritmasında eğitilmiştir. Eğitime sonucunda elde edilen YSA değerlerindeki kesme (ilerleme) hızı ile gerçek kesme hızı değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.57’ de gösterilmiştir.

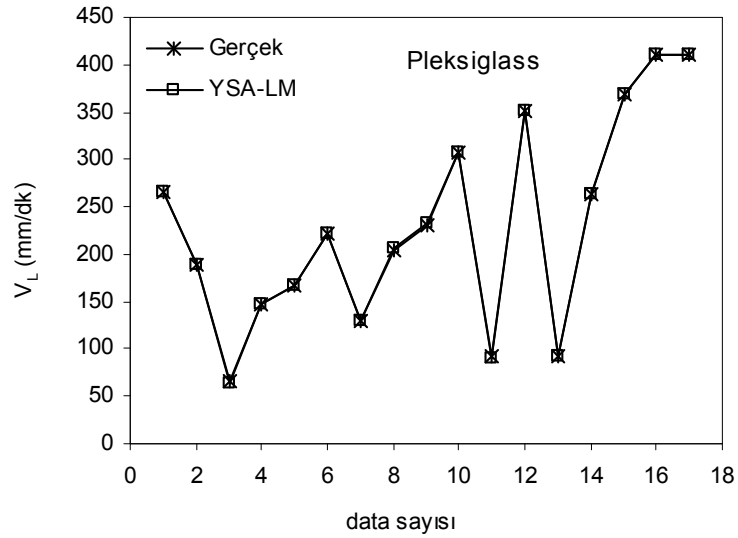


Şekil 5.57 Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-LM)

LM eğitiminde kullanılan verilerin aynısı, SCG algoritmasında yeniden eğitilmiş ve elde edilen sonuçların gerçek değerlerle uyum içerisinde olduğu Şekil 5.58’ de gösterilmiştir.



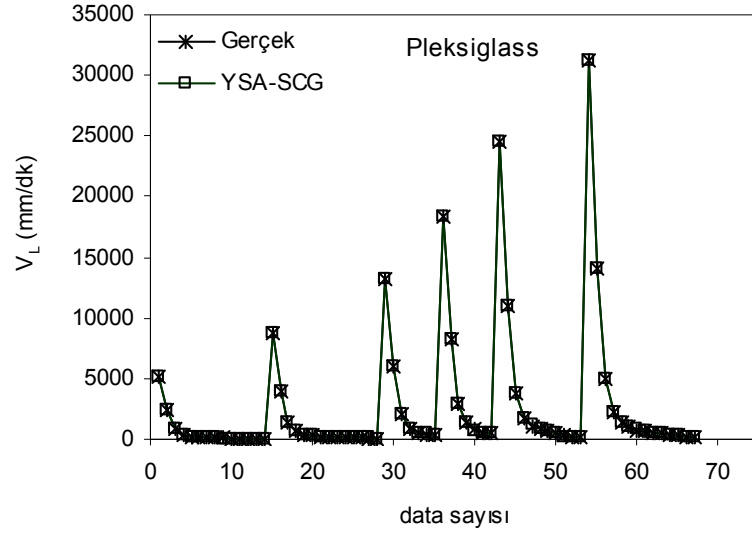
Şekil 5.58. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-SCG)



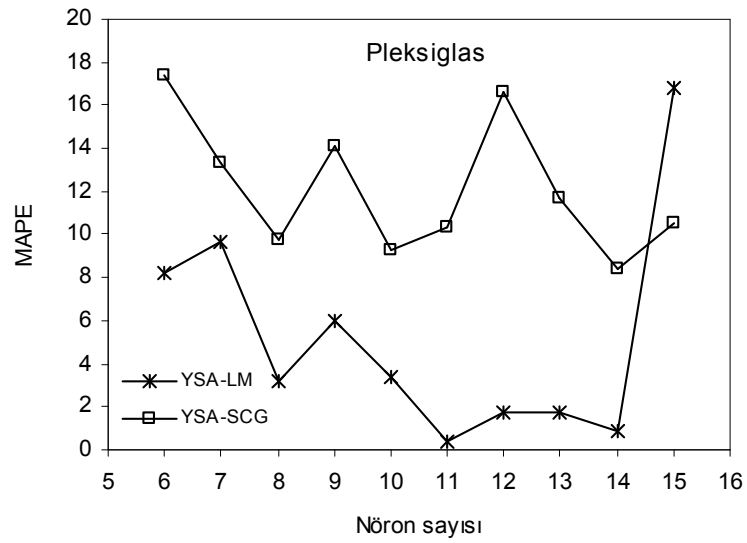
Şekil 5.59. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-LM)

Pleksiglas kesmeye ait toplam 84 verinin 17 tanesi test verileri olarak seçilmiştir. Seçilen bu veriler önce LM, daha sonra SCG algoritmalarında eğitilerek YSA ağı oluşturulmuştur. YSA değerleriyle gerçek veriler arasında her iki algoritma için elde

edilen ilişki, Şekil 5.59 ve Şekil 5.60' da gösterilmiştir. Gerçek verilerle YSA değerleri karşılaştırıldığında, LM eğitim algoritmasının SCG' ye göre çok daha başarılı olduğu açıkça görülmektedir.

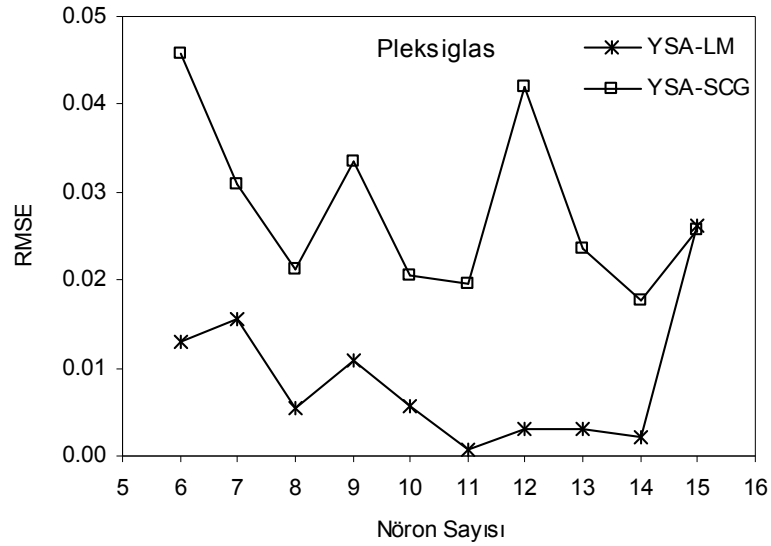


Şekil 5.60 Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-SCG)



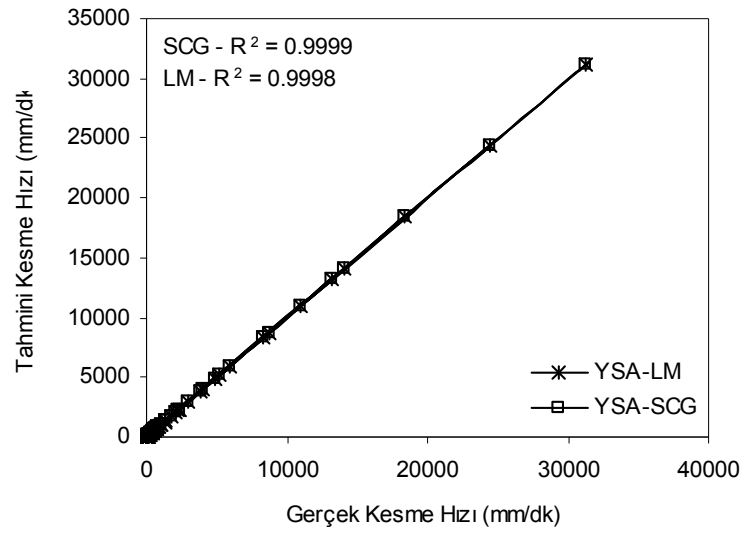
Şekil 5.61 Ortalama mutlak yüzde hatanın nöron sayısına göre değişimi (MAPE – Test)

Pleksiglas kesme için oluşturulan YSA sisteminde test değerleri dikkate alındığında, en iyi ağ yapısındaki nöron sayılarıyla, ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) arasındaki ilişki Şekil 5.61’ de verilmiştir. Oluşturulan en iyi ağ yapısında, LM eğitim algoritması için 11 nöron sayısında, SCG eğitim algoritmasında ise 14 nöron için MAPE değerinin minimum olduğu Şekil 5.61’ de açıkça görülmektedir. Bu modellemede kullanılan test değerleri, toplam veri setinden rasgele seçilmiştir.

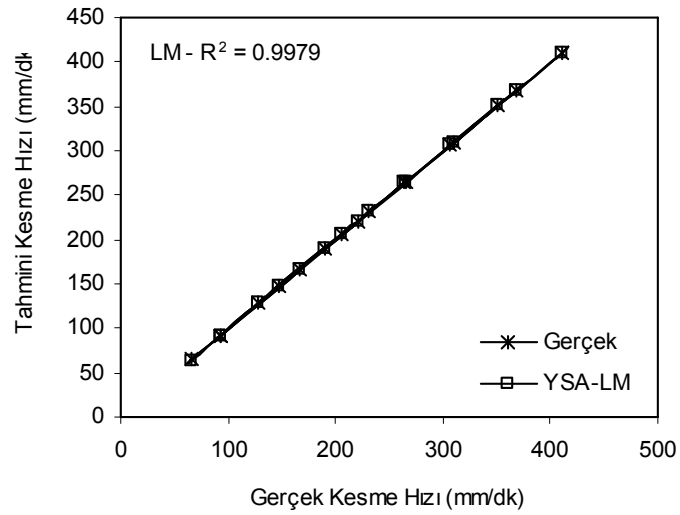


Şekil 5.62. Ortalama hata kareleri kökünün nöron sayısına göre değişimi (RMSE–Test)

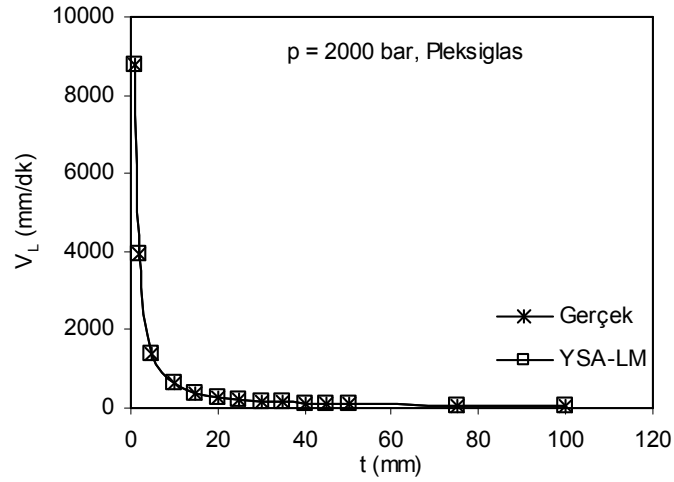
Test değerleri dikkate alınarak elde edilen Nöron sayısı – RMSE arasındaki ilişki, Şekil 5.62’ de görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, ortalama hata kareleri kökü (RMSE), LM için 11 nöronunda, SCG için 14 nöronunda optimum değere ulaşmaktadır. Bir başka deyişle en küçük RMSE değerinde minimum hata elde edilmektedir. Şekil 5.63 ve Şekil 5.64’ de sırasıyla eğitim ve test değerleri için korelasyon katsayısının değişimi gösterilmiştir. YSA değerlerindeki ortalama mutlak hatanın minimum değerinde $R^2 = 1$ ’e yaklaşır. Şekilden de anlaşıldığı gibi, eğitim ve test değerlerindeki hata sırayla, LM için % 0,20 – % 0,35 arasında değişirken, SCG için % 6,73 – % 8,37 arasında değişmektedir.



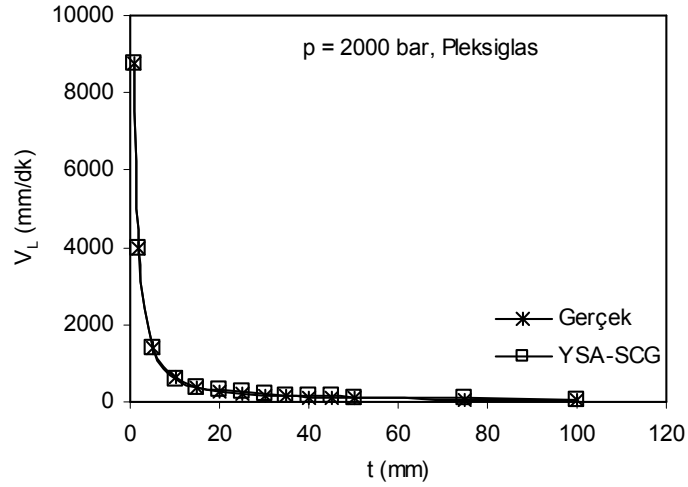
Şekil 5.63. Korelasyon Katsayının Değişimi (R^2 –Eğitim – YSA)



Şekil 5.64. Korelasyon Katsayının Değişimi (R^2 –Test – LM)

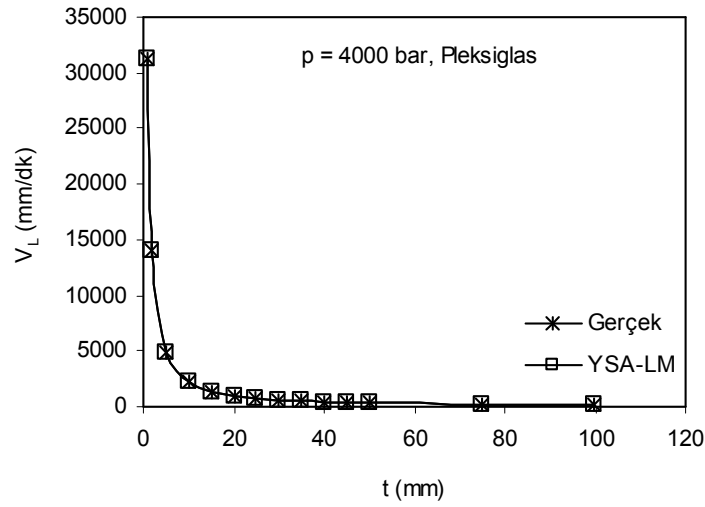


Şekil 5.65 Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 2000 bar, YSA-LM)

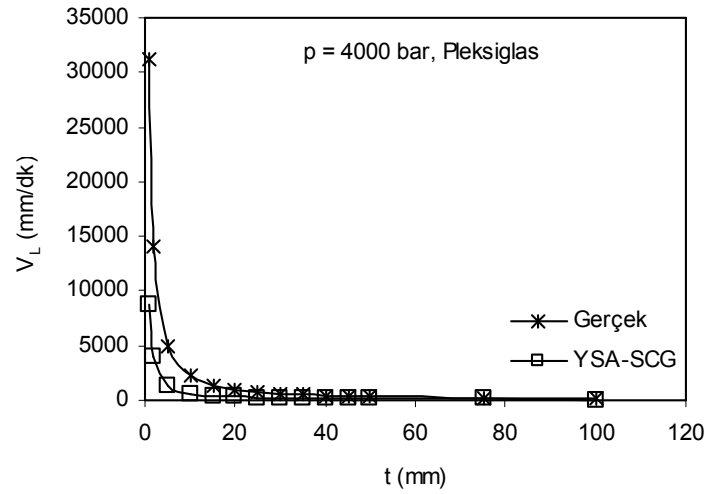


Şekil 5.66 Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 2000 bar, YSA-SCG)

Sabit çalışma basıncında (2000 bar) kesilen pleksiglasın için elde edilen YSA sonuçları Şekil 5.65 ve Şekil 5.66’da gösterilmiştir. Kesme hızının kalınlığa göre değişimi, LM ve SCG algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritma için elde edilen sonuçların gerçek değerlerle çakışması, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini göstermektedir.

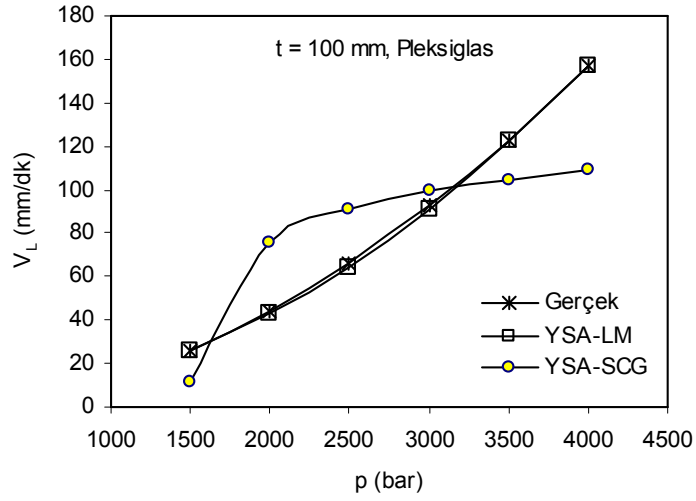


Şekil 5.67 Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi ($p = 4000$ bar, YSA-LM)



Şekil 5.68 Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi ($p = 4000$ bar, YSA-SCG)

Kesme hızıyla malzeme kalınlığı arasında 4000 bar basınçta elde edilen ilişki Şekil 5.67 ve Şekil 5.68’ de görülmektedir. Şekil 5.67 ve Şekil 5.68’ de gösterilen grafikler, sırasıyla LM ve SCG eğitim algoritmalarına göre oluşturulmuştur. Şekil 5.69 ‘da $t = 100$ mm kalınlıktaki plexiglasın kesilmesi için gerekli basınç ve kesme hızı değerleri görülmektedir.



Şekil 5.69 Gerçek Kesme Hızının Basınca göre Değişimi (t = 100 mm)

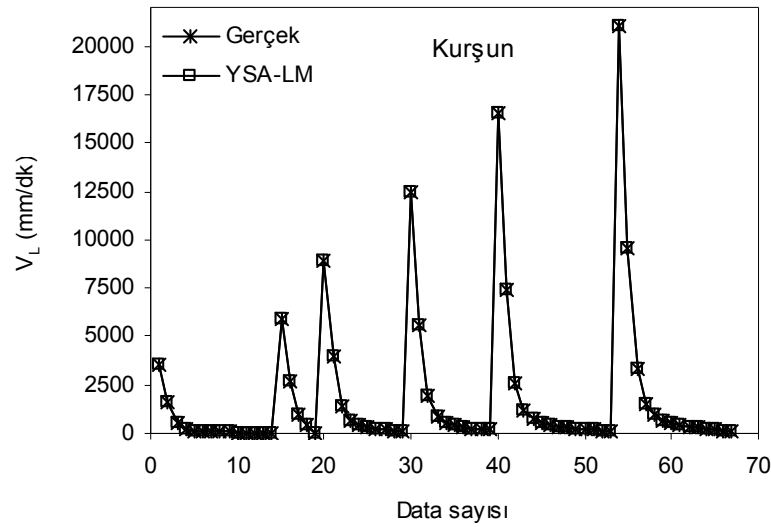
Çizelge 5.6. Aşındırıcı Su Jeti Sisteminde Pleksiglas Kesme için YSA Değerleri

Malzeme	Pleksiglass					
Eğitim Algoritması	Levenberg-Marquardt backpropagation (LM)			Scaled Conjugate Gradient Backpropagation (SCG)		
Transfer Fonksiyonu	Tansig (Hyperbolic tangent sigmoid)			Gizli tabaka		
Transfer Fonksiyonu	Purelin (Linear transfer fonksiyonu)			Çıkış tabaka		
LM	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
6	4,07	0,0165	1,0000	8,202	0,0130	0,99721
7	4,83	0,0173	1,0000	9,619	0,0156	0,99599
8	1,60	0,0033	1,0000	3,212	0,0054	0,99952
9	0,85	0,0031	0,9980	5,975	0,0109	0,99803
10	1,50	0,0045	1,0000	3,392	0,0056	0,99949
11	0,20	0,0004	1,0000	0,356	0,0007	0,99999
12	0,85	0,0020	1,0000	1,746	0,0031	0,99984
13	0,88	0,0021	1,0000	1,748	0,0030	0,99985
14	0,22	0,0006	1,0000	0,859	0,0021	0,99993
15	1,48	0,0061	1,0000	16,767	0,0261	0,98867
SCG	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
6	20,45	0,0589	0,99991	17,36	0,0459	0,9651
7	16,30	0,0415	0,99996	13,31	0,0309	0,9842
8	14,43	0,0372	0,99997	9,77	0,0211	0,9926
9	16,34	0,0406	0,99996	14,09	0,0336	0,9813
10	14,04	0,0341	0,99997	9,25	0,0205	0,9931
11	11,60	0,0309	0,99998	10,38	0,0195	0,9937
12	19,23	0,0520	0,99993	16,64	0,0420	0,9708
13	10,69	0,0228	0,99999	11,70	0,0236	0,9908
14	10,63	0,0286	0,99998	8,37	0,0177	0,9948
15	6,73	0,0189	0,99999	10,51	0,0257	0,9891

Çizelge 5.6’ da verilen test değerleri incelendiğinde, LM algoritması için 11 nöron, SCG algoritması için 14 nöron sayısında, en iyi sonuçlar elde edilmiştir. LM ve SCG algoritmalarında MAPE değerleri sırasıyla; % 0,35 ve % 8,37 olarak hesaplanmıştır.

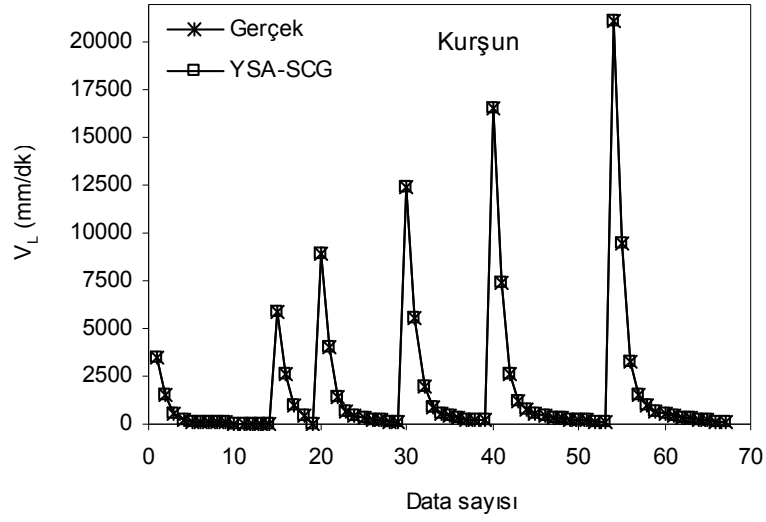
5.4.6. Kurşun için elde edilen YSA sonuçları

ASJ sisteminde kurşun kesme için yapılan modellemede toplam 84 adet veri kullanılmıştır. Bunlardan 67 tanesi eğitim verileri olarak belirlenmiştir. Bu veriler, LM eğitim algoritmasında eğitilmiştir. Eğitim sonucunda elde edilen YSA değerlerindeki kesme (ilerleme) hızı ile gerçek kesme hızı değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.70’ de gösterilmiştir.

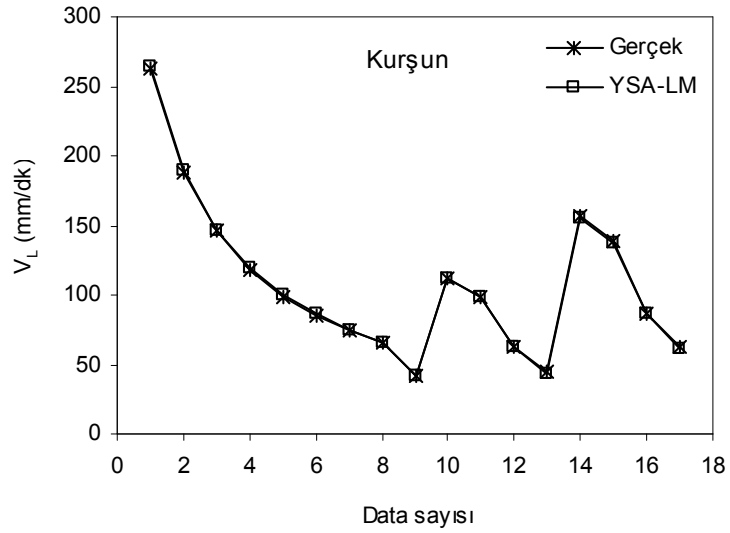


Şekil 5.70. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-LM)

LM eğitiminde kullanılan verilerin aynısı, SCG algoritmasında yeniden eğitilmiş ve elde edilen sonuçların gerçek değerlerle uyum içerisinde olduğu Şekil 5.71’ de gösterilmiştir.



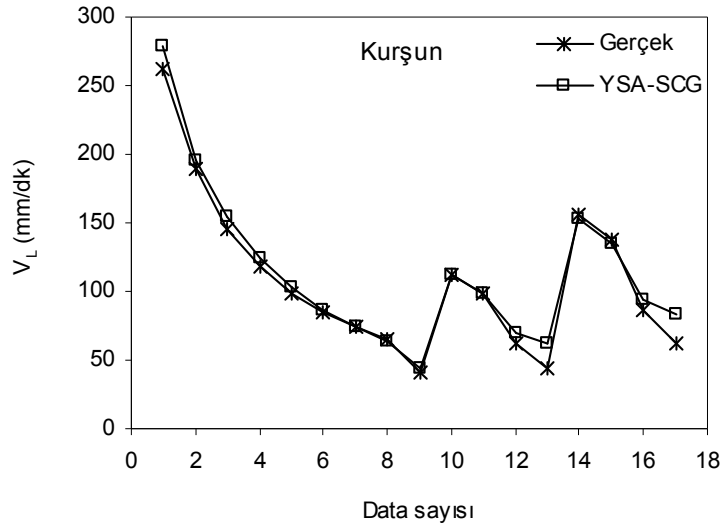
Şekil 5.71 Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-SCG)



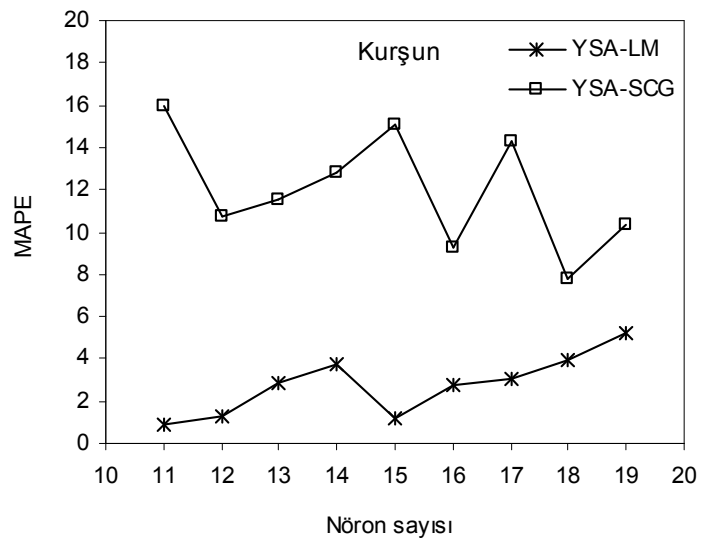
Şekil 5.72 Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-LM)

Kurşun kesmeye ait toplam 84 verinin 17 tanesi test verileri olarak seçilmiştir. Seçilen bu veriler önce LM, daha sonra SCG algoritmalarında eğitilerek YSA ağı oluşturulmuştur. YSA değerleriyle gerçek veriler arasında her iki algoritma için elde

edilen ilişki, Şekil 5.72 ve Şekil 5.73’ de gösterilmiştir. Gerçek verilerle YSA değerleri karşılaştırıldığında, LM eğitim algoritmasının SCG’ ye göre çok daha başarılı olduğu açıkça görülmektedir.

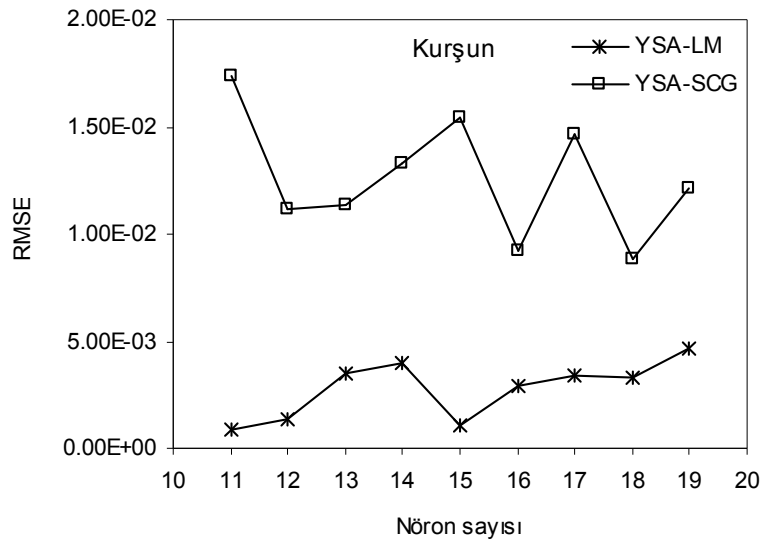


Şekil 5.73. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-SCG)



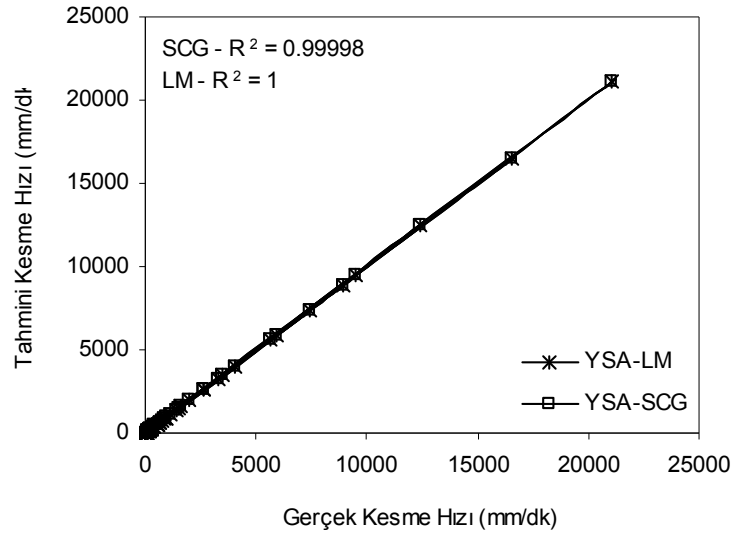
Şekil 5.74. Ortalama Mutlak Yüzde Hatanın Nöron Sayısıyla Değişimi (MAPE – Test)

Kurşun kesme için oluşturulan YSA sisteminde test değerleri dikkate alınarak, en iyi ağ yapısındaki nöron sayılarıyla ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) arasındaki ilişki, Şekil 5.74’ de verilmiştir. Oluşturulan en iyi ağ yapısında, LM eğitim algoritması için 11 nöron sayısında, SCG eğitim algoritmasında ise 18 nöron için MAPE değerinin minimum olduğu Şekil 5.74’ de açıkça görülmektedir. Bu modellemede kullanılan test değerleri, toplam veri setinden rasgele seçilmiştir.

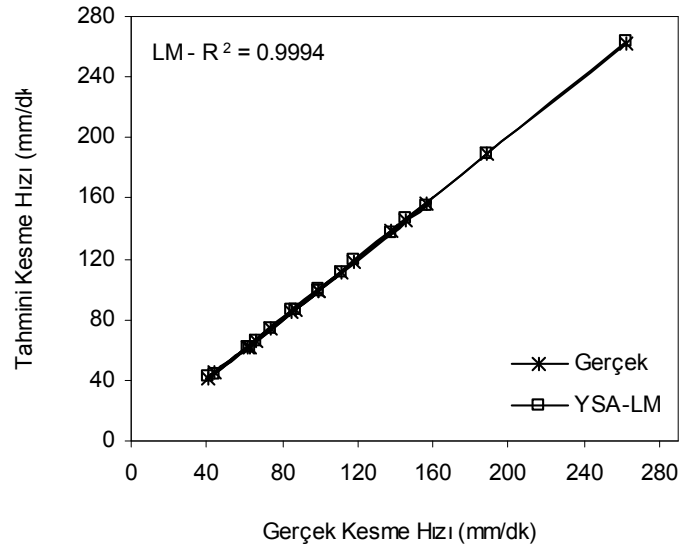


Şekil 5.75. Ortalama Hata Kareleri Kökünün Nöron Sayısıyla Değişimi (RMSE – Test)

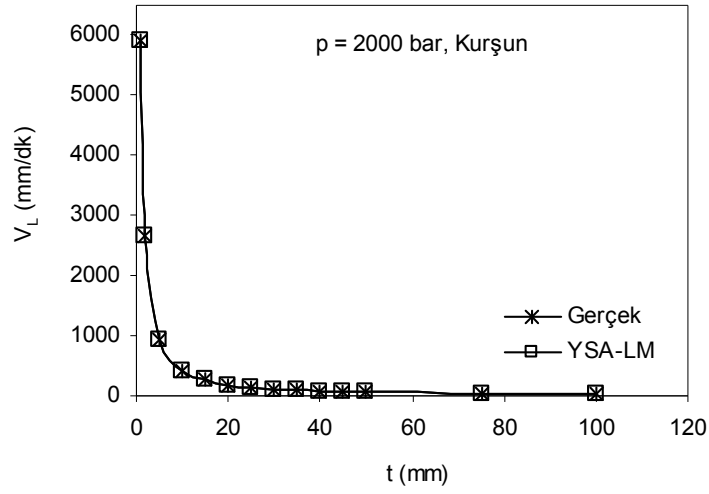
Test değerleri dikkate alınarak elde edilen Nöron sayısı – RMSE arasındaki ilişki, Şekil 5.75’ de görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, ortalama hata kareleri kökü (RMSE), LM için 11 nöronunda, SCG için 18 nöronunda optimum değere ulaşmaktadır. Bir başka deyişle en küçük RMSE değerinde minimum hata elde edilmektedir. Şekil 5.76 ve Şekil 4.77’ de sırasıyla eğitim ve test değerleri için korelasyon katsayısının değişimi gösterilmiştir. YSA değerlerindeki ortalama mutlak hatanın minimum değerinde $R^2 = 1$ ’e yaklaşır. Şekilden de anlaşıldığı gibi, eğitim ve test değerlerindeki hata sırayla, LM için % 0,01 – % 0,84 arasında değişirken, SCG için % 4,39 – % 7,80 arasında değişmektedir.



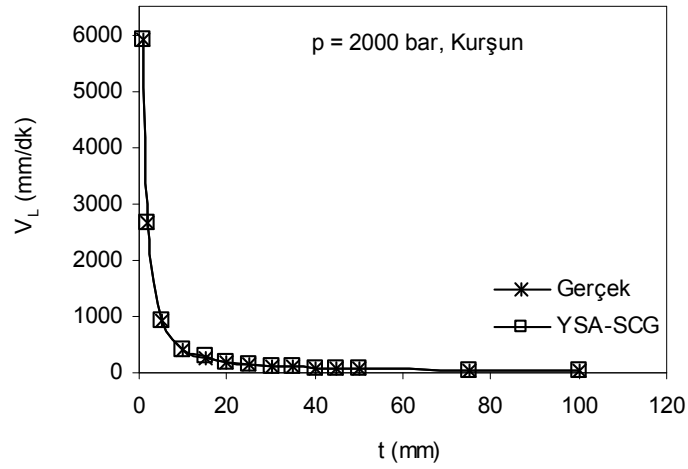
Şekil 5.76. Korelasyon Katsayısının Değişimi (R^2 – Eğitim – YSA)



Şekil 5.77 Korelasyon Katsayısının Değişimi (R^2 – Test – LM)

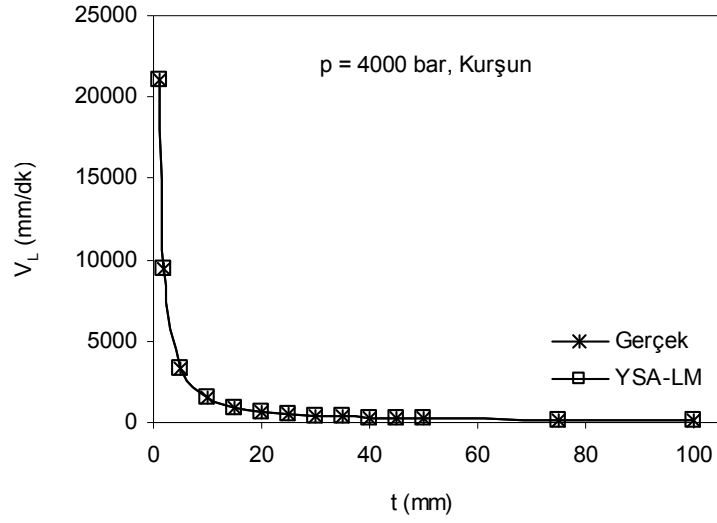


Şekil 5.78. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 2000 bar, YSA-LM)

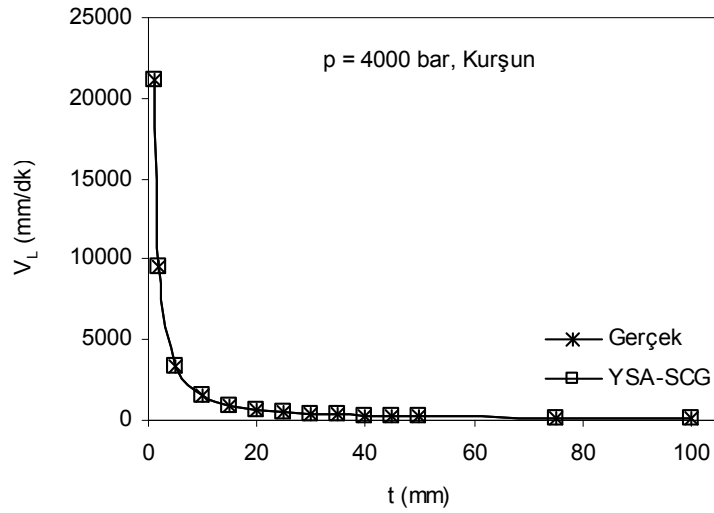


Şekil 5.79. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 2000 bar, YSA-SCG)

Sabit çalışma basıncında (2000 bar) kesilen kurşun için elde edilen YSA sonuçları Şekil 5.78 ve Şekil 5.79'da gösterilmiştir. Kesme hızının kalınlığa göre değişimi, LM ve SCG algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritma için elde edilen verilerin gerçek değerlerle çakışması, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini göstermektedir.

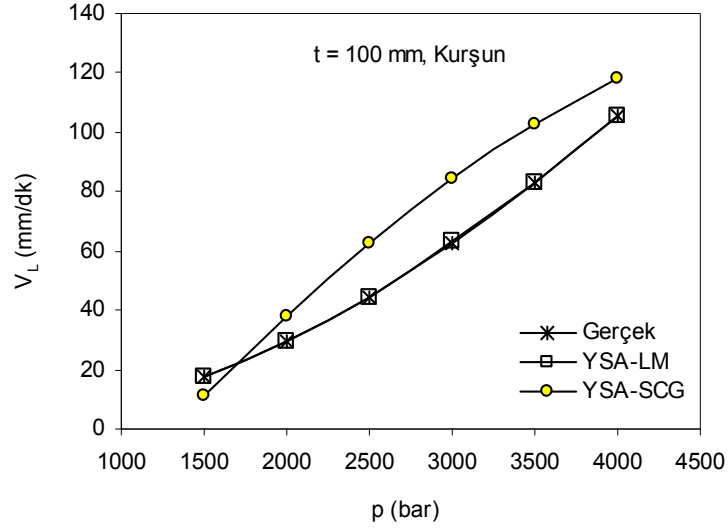


Şekil 5.80. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 4000 bar, YSA-LM)



Şekil 5.81 Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 4000 bar, YSA-SCG)

Kesme hızıyla malzeme kalınlığı arasında 4000 bar basınçta elde edilen ilişki Şekil 4.80 ve Şekil 5.81’ de görülmektedir. Şekil 5.80 ve Şekil 5.81’ de gösterilen grafikler, sırasıyla LM ve SCG eğitim algoritmalarına göre oluşturulmuştur. Şekil 5.82 ‘de $t = 100$ mm kalınlıktaki kurşunun kesilmesi için gerekli basınç ve kesme hızı değerleri görülmektedir.



Şekil 5.82 Gerçek Kesme Hızının Basınca göre Değişimi (t = 100 mm)

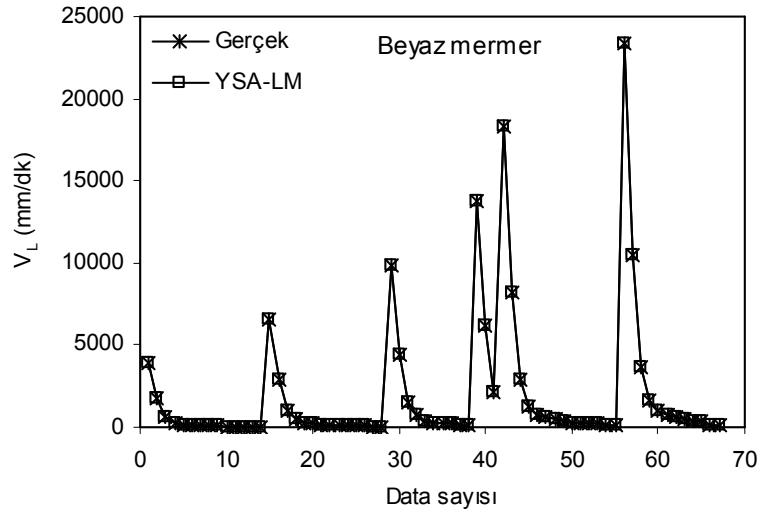
Çizelge 5.7 Aşındırıcı Su Jeti Sisteminde Kurşun Kesme için YSA Değerleri

Malzeme	Kurşun					
Eğitim Algoritması	Levenberg-Marquardt Backpropagation (LM)			Scaled Conjugate Gradient Backpropagation (SCG)		
Transfer Fonksiyonu	Tansig (Hyperbolic tangent sigmoid)			Gizli tabaka		
Transfer Fonksiyonu	Purelin (Linear transfer fonksiyonu)			Çıkış tabaka		
LM	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
11	0,2805	0,000572	1	0,8448	0,0008	0,99995
12	0,4185	0,000768	1	1,2549	0,0014	0,99987
13	0,1020	0,000264	1	2,8674	0,0035	0,99916
14	0,1663	0,000257	1	3,7118	0,0040	0,99892
15	0,5219	0,000867	1	1,2287	0,0011	0,99992
16	0,0617	0,000124	1	2,8046	0,0029	0,99944
17	1,3083	0,002743	1	3,0185	0,0034	0,99920
18	0,0121	0,000021	1	3,9608	0,0033	0,99925
19	0,0189	0,000058	1	5,2610	0,0047	0,99851
SCG	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
11	13,868	0,02565	0,99996	15,938	0,0174	0,9796
12	11,391	0,01986	0,99998	10,777	0,0112	0,9915
13	12,400	0,02124	0,99998	11,495	0,0114	0,9912
14	13,654	0,02248	0,99997	12,778	0,0133	0,9881
15	14,482	0,02767	0,99996	15,032	0,0154	0,9840
16	9,753	0,01757	0,99998	9,242	0,0092	0,9943
17	5,523	0,01274	0,99999	14,268	0,0147	0,9854
18	4,397	0,00805	1,00000	7,808	0,0088	0,9947
19	6,778	0,01295	0,99999	10,299	0,0122	0,9900

Çizelge 5.7' de verilen test değerleri incelendiğinde, LM algoritması için 11 nöron, SCG algoritması için 18 nöron sayısında, en iyi sonuçlar elde edilmiştir. LM ve SCG algoritmalarında MAPE değerleri sırasıyla; % 0,84 ve % 7,80 olarak hesaplanmıştır.

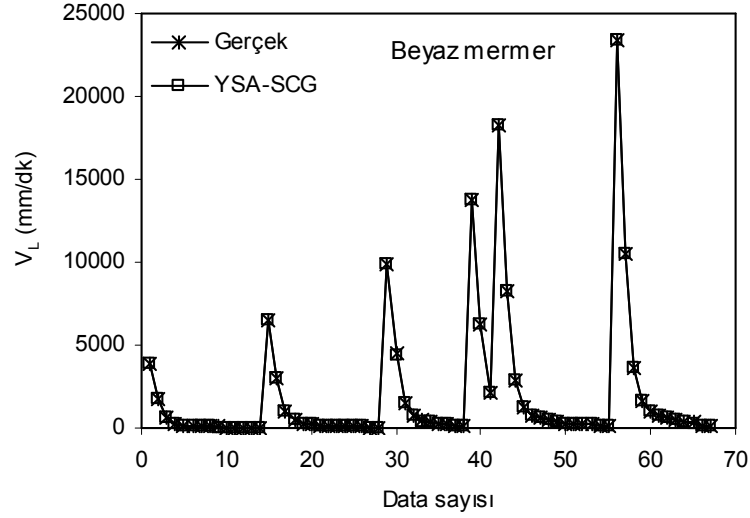
5.4.7. Beyaz mermer için elde edilen YSA sonuçları

ASJ sisteminde beyaz mermer kesme için yapılan modellemede toplam 84 adet veri kullanılmıştır. Bunlardan 67 tanesi eğitim verileri olarak belirlenmiştir. Bu veriler, LM eğitim algoritmasında eğitilmiştir. Eğitime sonucunda elde edilen YSA değerlerindeki kesme (ilerleme) hızı ile gerçek kesme hızı değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.83' de gösterilmiştir.

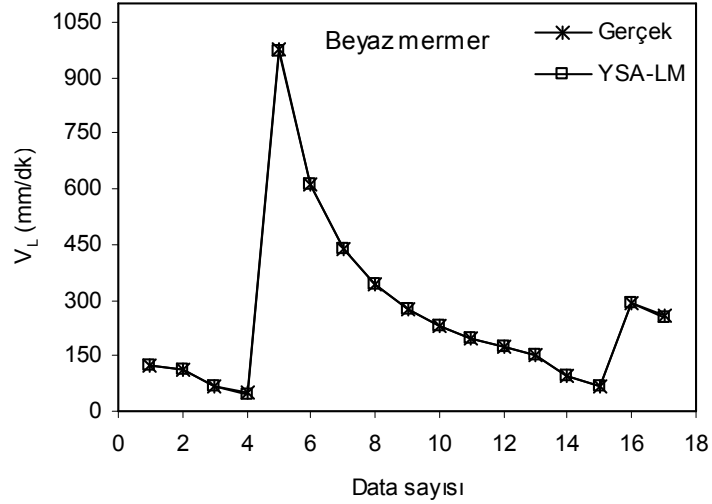


Şekil 5.83. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-LM)

LM eğitiminde kullanılan verilerin aynısı, SCG algoritmasında yeniden eğitilmiş ve elde edilen sonuçların gerçek değerlerle uyum içerisinde olduğu Şekil 5.84' de gösterilmiştir.



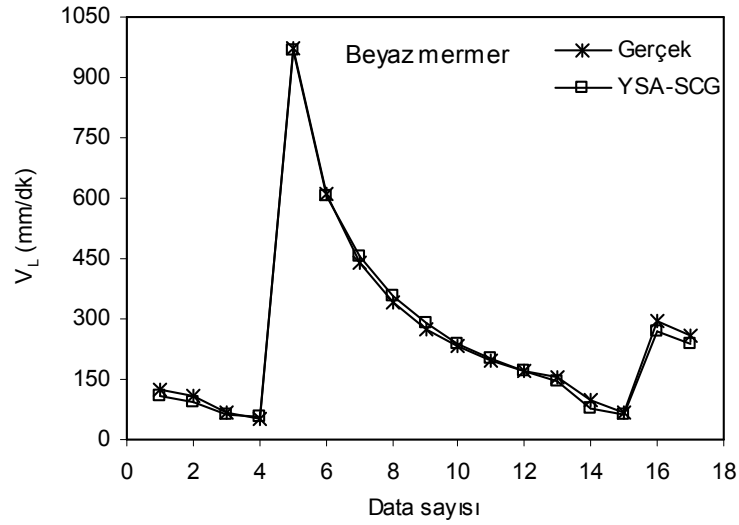
Şekil 5.84. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-SCG)



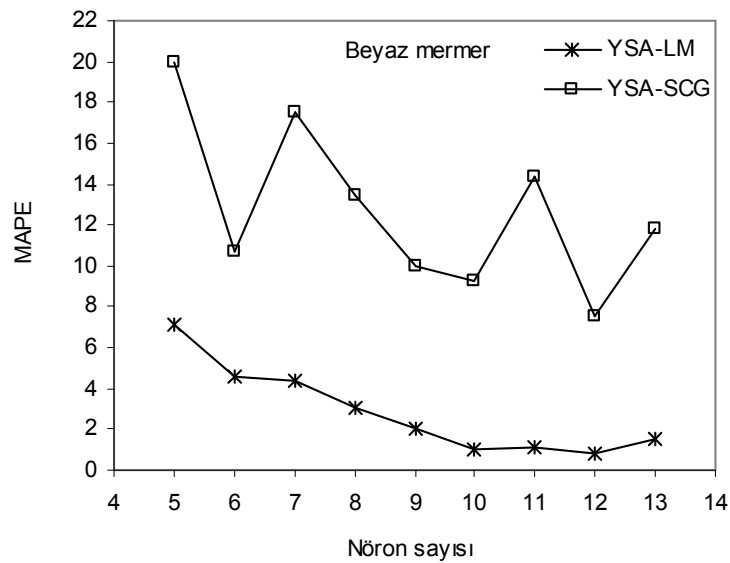
Şekil 5.85. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-LM)

Beyaz mermer kesmeye ait toplam 84 verinin 17 tanesi test verileri olarak seçilmiştir. Seçilen bu veriler önce LM, daha sonra SCG algoritmalarında eğitilerek YSA ağı oluşturulmuştur. YSA değerleriyle gerçek veriler arasında her iki algoritma için elde

edilen ilişki, Şekil 5.85 ve Şekil 5.86' de gösterilmiştir. Gerçek verilerle YSA değerleri karşılaştırıldığında, LM eğitim algoritmasının SCG' ye göre çok daha başarılı olduğu açıkça görülmektedir.

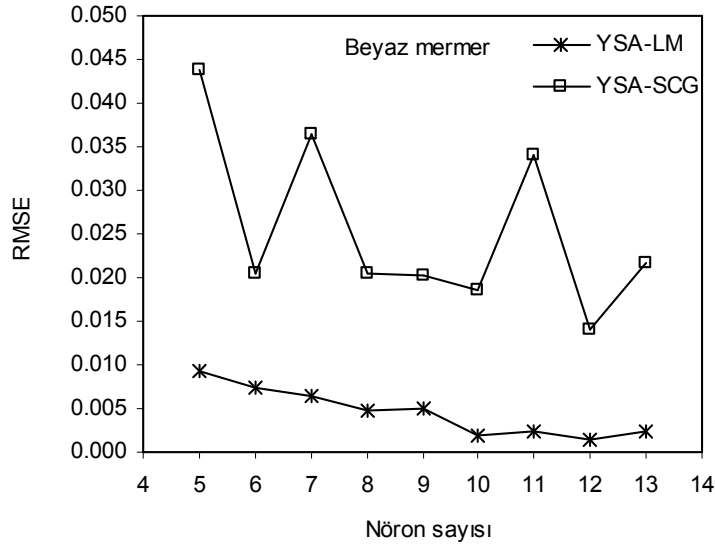


Şekil 5.86. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-SCG)



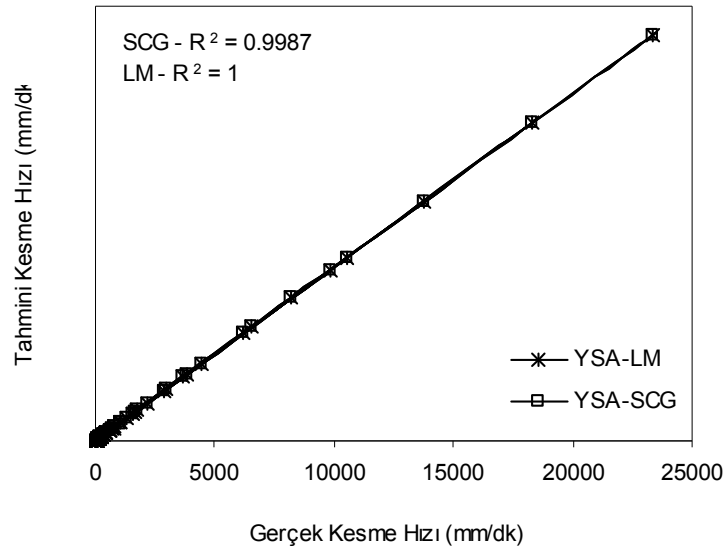
Şekil 5.87. Ortalama Mutlak Yüzde Hatanın Nöron Sayısıyla Değişimi (MAPE – Test)

Beyaz mermer kesme için oluşturulan YSA sisteminde test değerleri dikkate alınarak, en iyi ağ yapısındaki nöron sayılarıyla ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) arasındaki ilişki, Şekil 4.87’ de verilmiştir. Oluşturulan en iyi ağ yapısında, LM ve SCG eğitim algoritmaları için 12 nöron sayısında MAPE değerinin minimum olduğu, Şekil 5.87’ de açıkça görülmektedir. Bu modellemede kullanılan test değerleri, toplam veri setinden rasgele seçilmiştir.

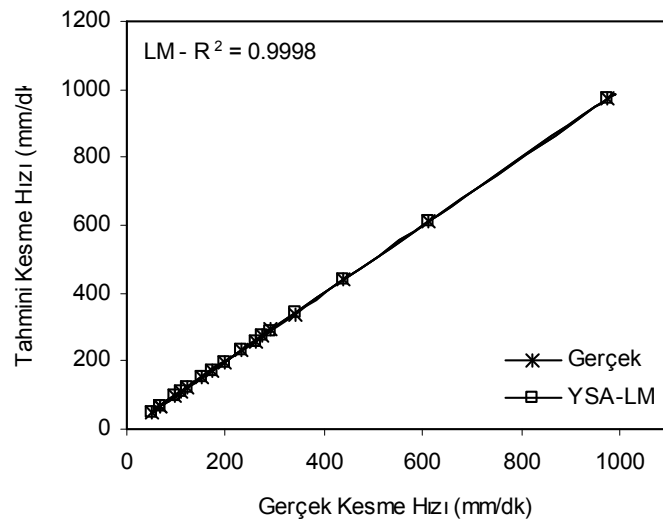


Şekil 5.88 Ortalama Hata Kareleri Kökünün Nöron Sayısıyla Değişimi (RMSE – Test)

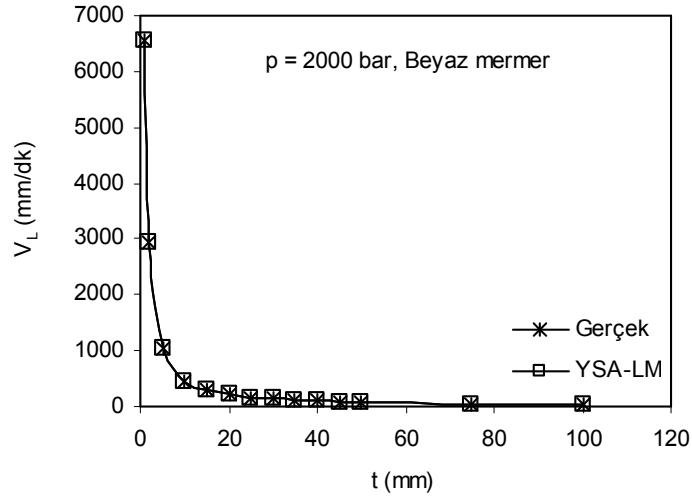
Test değerleri dikkate alınarak elde edilen Nöron sayısı – RMSE arasındaki ilişki, Şekil 5.88’ de görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, ortalama hata kareleri kökü (RMSE), LM için 12 nörona, SCG için 12 nörona optimum değere ulaşmaktadır. Bir başka deyişle en küçük RMSE değerinde minimum hata elde edilmektedir. Şekil 5.89 ve Şekil 5.90’ de sırasıyla eğitim ve test değerleri için korelasyon katsayısının değişimi gösterilmiştir. YSA değerlerindeki ortalama mutlak hatanın minimum değerinde $R^2 = 1$ ’e yaklaşır. Şekilden de anlaşıldığı gibi, eğitim ve test değerlerindeki hata sırayla, LM için % 0,20 – % 0,78 arasında değişirken, SCG için % 4,00 – % 7,53 arasında değişmektedir.



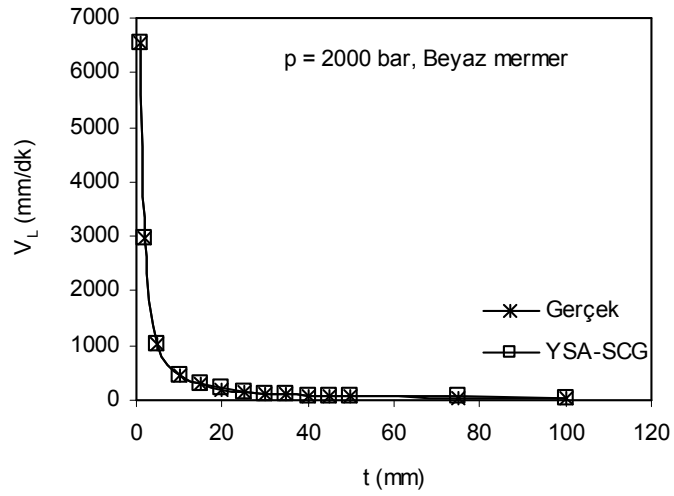
Şekil 5.89. Korelasyon Katsayısının Değişimi (R^2 – Eğitim – YSA)



Şekil 5.90 Korelasyon Katsayısının Değişimi (R^2 – Test – LM)

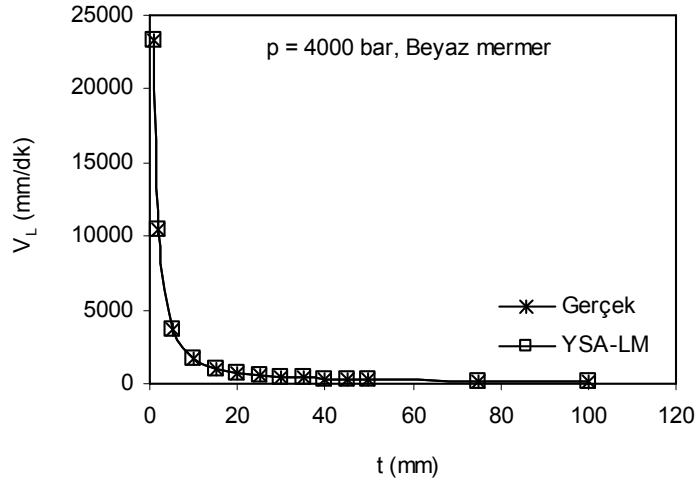


Şekil 5.91 Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 2000 bar, YSA-LM)

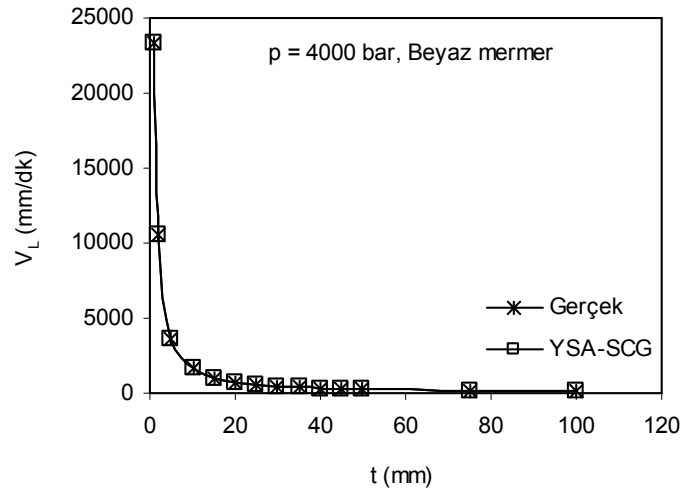


Şekil 5.92 Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 2000 bar, YSA-SCG)

Sabit çalışma basıncında (2000 bar) kesilen beyaz mermer için elde edilen YSA sonuçları Şekil 5.91 ve Şekil 5.92’de gösterilmiştir. Kesme hızının kalınlığa göre değişimi, LM ve SCG algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritma için elde edilen verilerin gerçek değerlerle çakışması, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini göstermektedir.

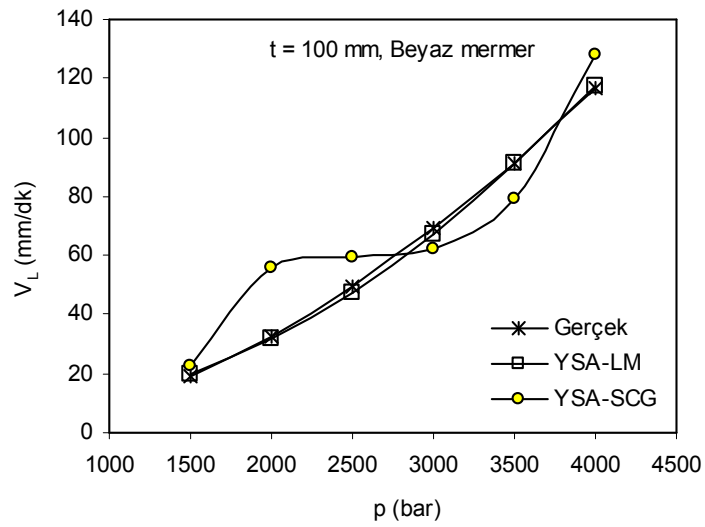


Şekil 5.93 Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi ($p = 4000$ bar, YSA-LM)



Şekil 5.94 Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi ($p = 4000$ bar, YSA-SCG)

Kesme hızıyla malzeme kalınlığı arasında 4000 bar basınçta elde edilen ilişki Şekil 5.93 ve Şekil 5.94' de görülmektedir. Şekil 5.93 ve Şekil 5.94' de gösterilen grafikler, sırasıyla LM ve SCG eğitim algoritmalarına göre oluşturulmuştur. Şekil 5.95 'de $t = 100$ mm kalınlıktaki beyaz mermerin kesilmesi için gerekli basınç ve kesme hızı değerleri görülmektedir.



Şekil 5.95. Gerçek Kesme Hızının Basınca göre Değişimi (t = 100 mm)

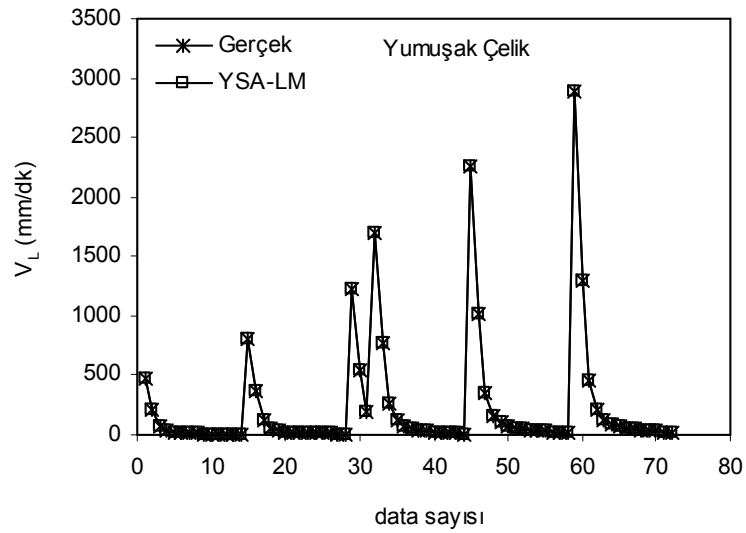
Çizelge 5.8 Aşındırıcı Su Jeti Sisteminde Beyaz Mermer Kesme için YSA Değerleri

Malzeme	Beyaz mermer					
Eğitim Algoritması	Levenberg-Marquardt Backpropagation (LM) Scaled Conjugate Gradient Backpropagation (SCG)					
Transfer Fonksiyonu	Tansig (Hyperbolic tangent sigmoid)			Gizli tabaka		
Transfer Fonksiyonu	Purelin (Linear transfer fonksiyonu)			Çıkış tabaka		
LM	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
5	3,942	0,0093	1,00000	7,079	0,00926	0,99929
6	2,004	0,0040	1,00000	4,557	0,00737	0,99955
7	2,369	0,0047	1,00000	4,346	0,00637	0,99966
8	2,030	0,0033	1,00000	3,056	0,00485	0,99981
9	1,108	0,0020	1,00000	2,011	0,00492	0,99980
10	0,664	0,0016	1,00000	1,041	0,00184	0,99997
11	0,526	0,0009	1,00000	1,072	0,00237	0,99995
12	0,335	0,0004	1,00000	0,782	0,00151	0,99998
13	0,209	0,0004	1,00000	1,502	0,00239	0,99995
SCG	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
5	13,501	0,0394	0,99993	19,925	0,04387	0,98407
6	14,473	0,0386	0,99993	10,725	0,02057	0,99993
7	14,941	0,0391	0,98896	17,548	0,03652	0,99650
8	6,471	0,0149	0,99999	13,454	0,02058	0,99653
9	14,586	0,0280	0,99997	9,990	0,02032	0,99659
10	5,594	0,0138	0,99999	9,244	0,01850	0,99717
11	17,757	0,0323	0,99995	14,351	0,03410	0,99038
12	4,006	0,0083	1,00000	7,533	0,01395	0,99839
13	6,021	0,0124	0,99999	11,791	0,02166	0,99612

Çizelge 5.8’ de verilen test değerleri incelendiğinde, LM ve SCG algoritmaları için 12 nöron sayısında, en iyi sonuçlar elde edilmiştir. LM ve SCG algoritmalarında MAPE değerleri sırasıyla; % 0,78 ve % 7,53 olarak hesaplanmıştır.

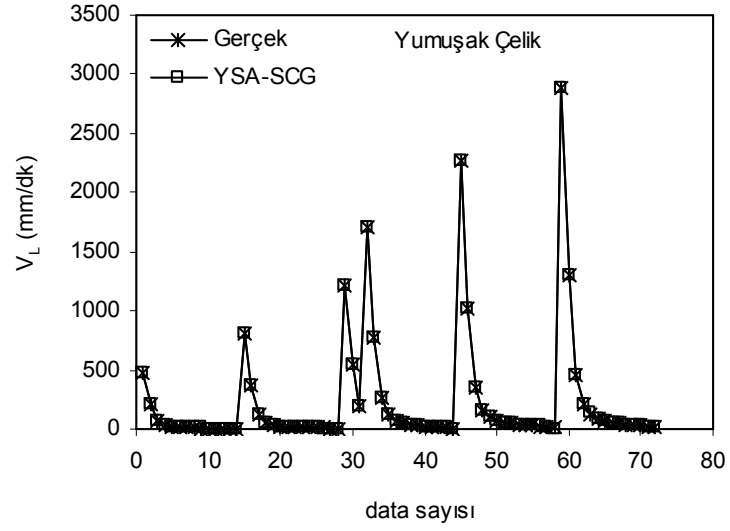
5.4.8. Yumuşak çelik için elde edilen YSA sonuçları

ASJ sisteminde yumuşak çelik kesme için yapılan modellemede toplam 84 adet veri kullanılmıştır. Bunlardan 72 tanesi eğitim verileri olarak belirlenmiştir. Bu veriler, LM eğitim algoritmasında eğitilmiştir. Eğitime sonucunda elde edilen YSA değerlerindeki kesme (ilerleme) hızı ile gerçek kesme hızı değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.96’ da gösterilmiştir.

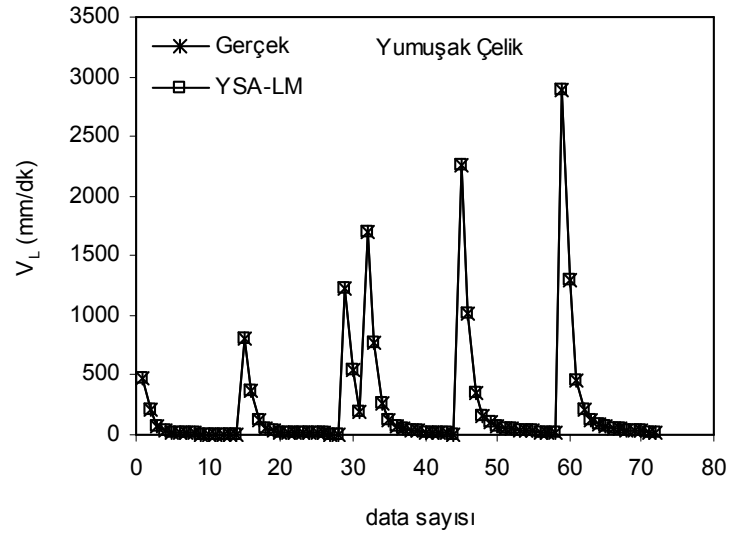


Şekil 5.96 Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-LM)

LM eğitiminde kullanılan verilerin aynısı, SCG algoritmasında yeniden eğitilmiş ve elde edilen sonuçların gerçek değerlerle uyum içerisinde olduğu Şekil 5.97’ de gösterilmiştir.



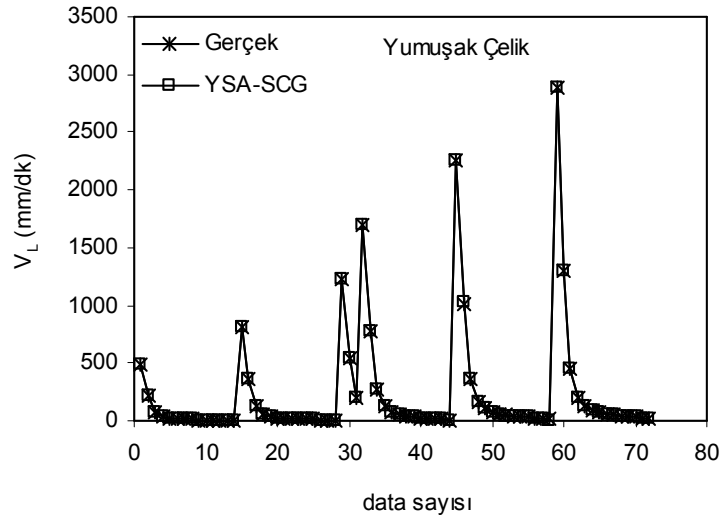
Şekil 5.97 Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-SCG)



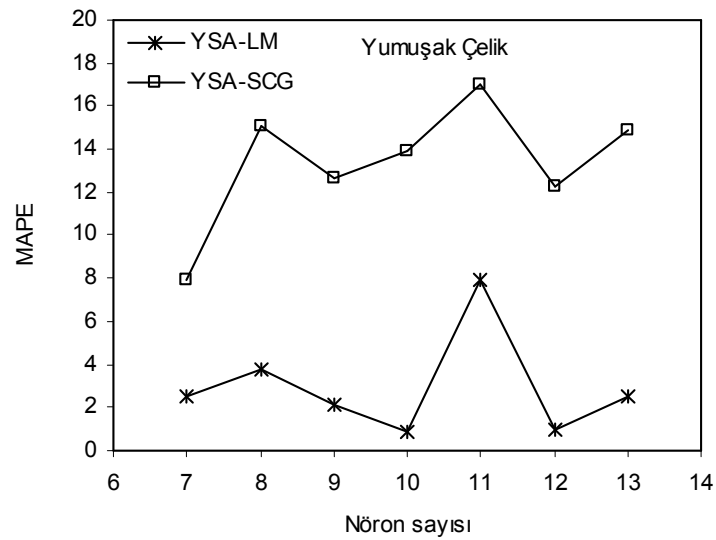
Şekil 5.98 Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-LM)

Yumuşak çelik kesmeye ait toplam 84 verinin 12 tanesi test verileri olarak seçilmiştir. Seçilen bu veriler önce LM, daha sonra SCG algoritmalarında eğitilerek YSA ağı oluşturulmuştur. YSA değerleriyle gerçek veriler arasında her iki algoritma için

elde edilen ilişki, Şekil 5.98 ve Şekil 5.99’ de gösterilmiştir. Gerçek verilerle YSA değerleri karşılaştırıldığında, LM eğitim algoritmasının SCG’ ye göre çok daha başarılı olduğu açıkça görülmektedir.

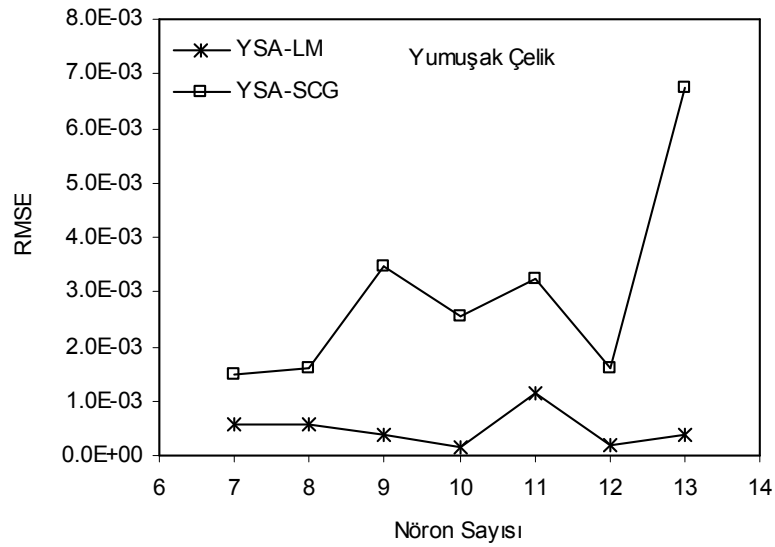


Şekil 5.99 Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-SCG)



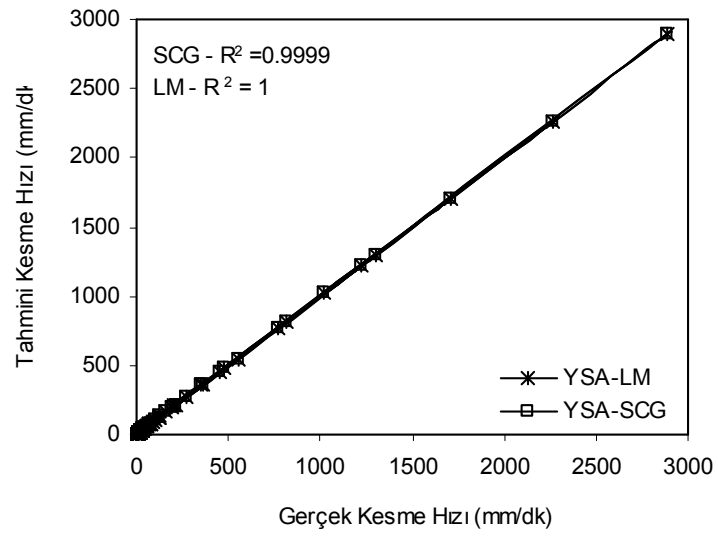
Şekil 5.100. Ortalama Mutlak Yüzde Hatanın Nöron Sayısıyla Değişimi (MAPE – Test)

Yumuşak çelik kesme için oluşturulan YSA sisteminde test değerleri dikkate alınarak, en iyi ağ yapısındaki nöron sayılarıyla ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) arasındaki ilişki, Şekil 5.100’ de verilmiştir. Oluşturulan en iyi ağ yapısında, LM eğitim algoritması için 10 nöron sayısında, SCG eğitim algoritmasında ise 7 nöron için MAPE değerinin minimum olduğu Şekil 5.100’ de açıkça görülmektedir. Bu modellemede kullanılan test değerleri, toplam veri setinden rasgele seçilmiştir.

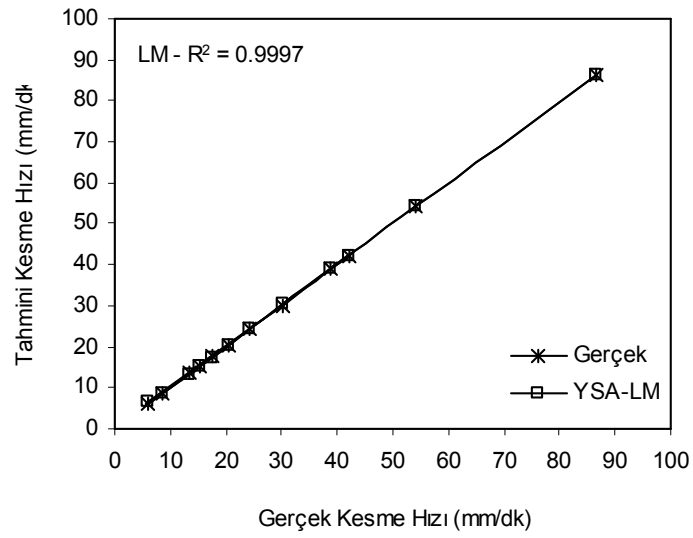


Şekil 5.101. Ortalama Hata Kareleri Kökünün Nöron Sayısıyla Değişimi (RMSE–Test)

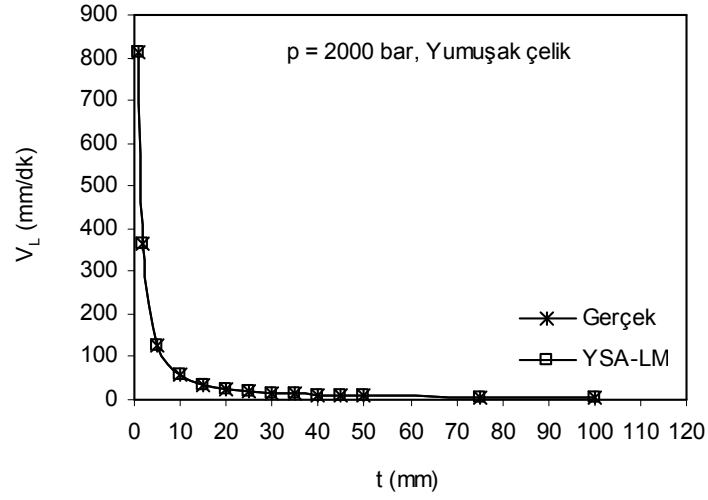
Test değerleri dikkate alınarak elde edilen Nöron sayısı – RMSE arasındaki ilişki, Şekil 5.101’ de görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, ortalama hata kareleri kökü (RMSE), LM için 10 nöronunda, SCG için 12 nöronunda optimum değere ulaşmaktadır. Bir başka deyişle en küçük RMSE değerinde minimum hata elde edilmektedir. Şekil 5.102 ve Şekil 5.103’ de sırasıyla eğitim ve test değerleri için korelasyon katsayısının değişimi gösterilmiştir. YSA değerlerindeki ortalama mutlak hatanın minimum değerinde $R^2 = 1$ ’e yaklaşır. Şekilden de anlaşıldığı gibi, eğitim ve test değerlerindeki hata sırayla, LM için % 0,22 – % 0,90 arasında değişirken, SCG için % 3,90 – % 7,95 arasında değişmektedir.



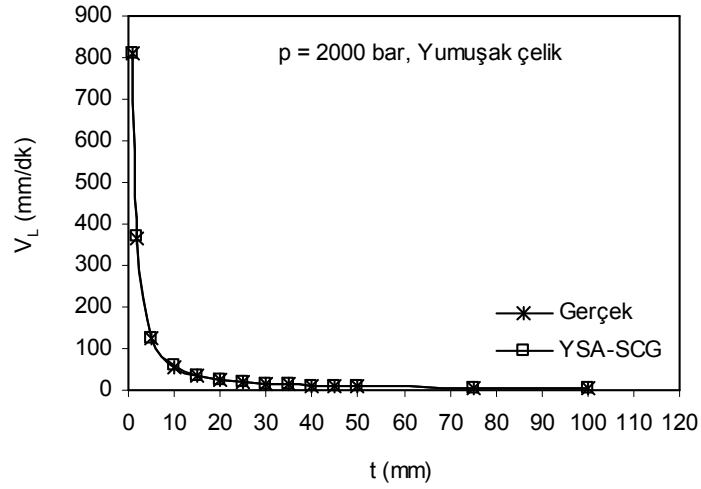
Şekil 5.102. Korelasyon Katsayının Değişimi (R^2 – Eğitim – YSA)



Şekil 5.103. Korelasyon Katsayının Değişimi (R^2 – Test – LM)

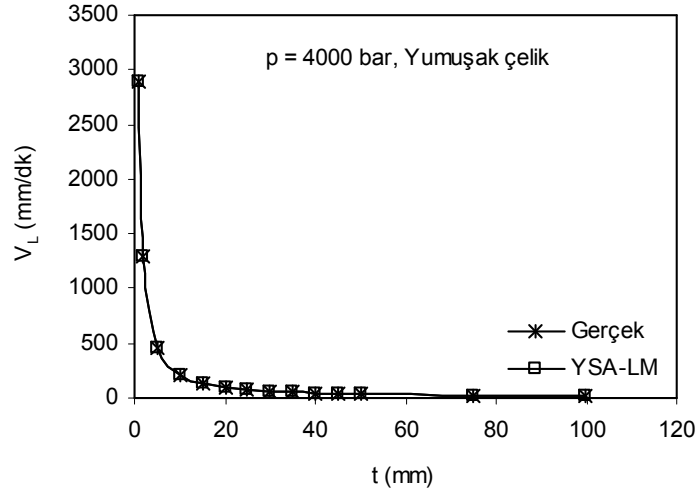


Şekil 5.104. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 2000 bar, YSA-LM)

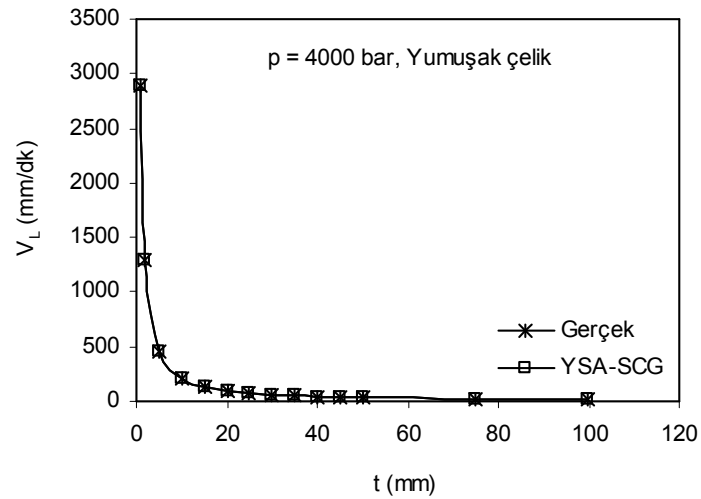


Şekil 5.105. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 2000 bar, YSA-SCG)

Sabit çalışma basıncında (2000 bar) kesilen yumuşak çelik için elde edilen YSA sonuçları Şekil 5.104 ve Şekil 5.105'te gösterilmiştir. Kesme hızının kalınlığa göre değişimi, LM ve SCG algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritma için elde edilen verilerin gerçek değerlerle çakışması, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini göstermektedir.

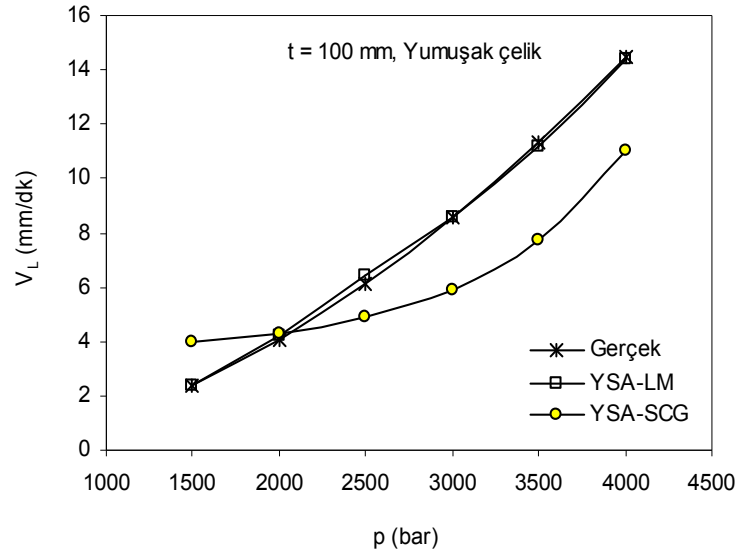


Şekil 5.106. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 4000 bar, YSA-LM)



Şekil 5.107. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 4000 bar, YSA-SCG)

Kesme hızıyla malzeme kalınlığı arasında 4000 bar basınçta elde edilen ilişki Şekil 5.106 ve Şekil 5.107’ de görülmektedir. Şekil 5.106 ve Şekil 5.107’ de gösterilen grafikler, sırasıyla LM ve SCG eğitim algoritmalarına göre oluşturulmuştur. Şekil 5.108 ‘de $t = 100$ mm kalınlıktaki yumuşak çeliğin kesilmesi için gerekli basınç ve kesme hızı değerleri görülmektedir.



Şekil 5.108. Gerçek Kesme Hızının Basınca göre Değişimi (t = 100 mm)

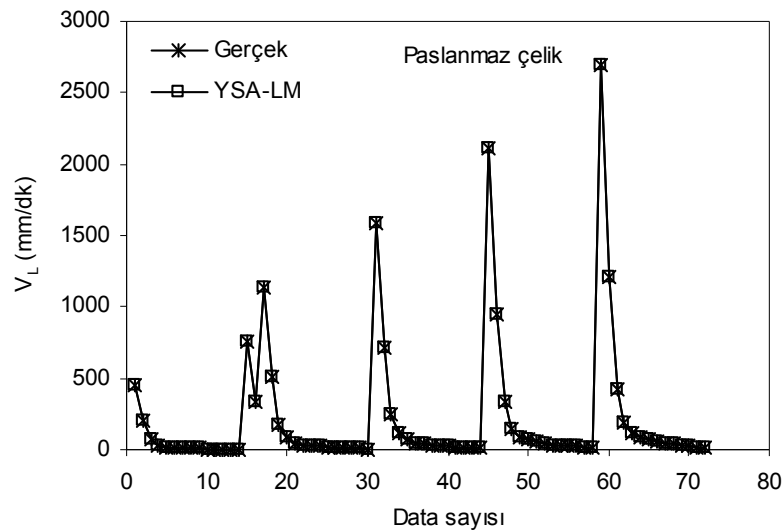
Çizelge 5.9 Aşındırıcı Su Jeti Sisteminde Yumuşak Çelik Kesme için YSA değerleri

Malzeme	Yumuşak çelik					
Eğitim Algoritması	Levenberg-Marquardt Backpropagation (LM) Scaled Conjugate Gradient Backpropagation (SCG)					
Transfer Fonksiyonu	Tansig (Hyperbolic tangent sigmoid)			Gizli tabaka		
Transfer Fonksiyonu	Purelin (Linear transfer fonksiyonu)			Çıkış tabaka		
LM	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
7	2,18	0,000513	1	2,54	0,00055	0,99978
8	2,24	0,000515	1	3,73	0,00058	0,99975
9	1,49	0,000318	1	2,15	0,00037	0,99990
10	0,51	0,000178	1	0,90	0,00016	0,99998
11	2,12	0,000651	1	7,91	0,00115	0,99903
12	0,87	0,000223	1	1,00	0,00020	0,99997
13	0,22	0,000050	1	2,51	0,00038	0,99989
SCG	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
7	6,67	0,0020	0,999990	7,95	0,00149	0,99866
8	13,91	0,0028	0,999970	15,10	0,00161	0,99812
9	8,15	0,0019	0,999990	12,63	0,00345	0,99280
10	8,22	0,0028	0,999980	13,95	0,00257	0,99519
11	12,15	0,0030	0,999970	17,01	0,00323	0,99239
12	3,90	0,0011	1,000000	12,24	0,00159	0,99847
13	11,11	0,0029	0,999970	14,90	0,00675	0,96674

Çizelge 5.9' da verilen test değerleri incelendiğinde, LM algoritması için 10 nöron, SCG algoritması için 7 nöron sayısında, en iyi sonuçlar elde edilmiştir. LM ve SCG algoritmalarında MAPE değerleri sırasıyla; % 0,90 ve % 7,95 olarak hesaplanmıştır.

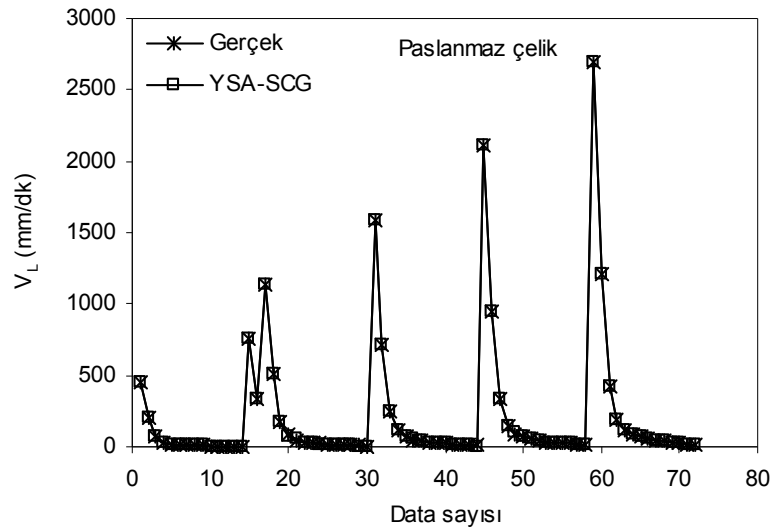
5.4.9. Paslanmaz çelik için elde edilen YSA sonuçları

ASJ sisteminde paslanmaz çelik kesme için yapılan modellemede toplam 84 adet veri kullanılmıştır. Bunlardan 72 tanesi eğitim verileri olarak belirlenmiştir. Bu veriler, LM eğitim algoritmasında eğitilmiştir. Eğitime sonucunda elde edilen YSA değerlerindeki kesme (ilerleme) hızı ile gerçek kesme hızı değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.109' da gösterilmiştir.

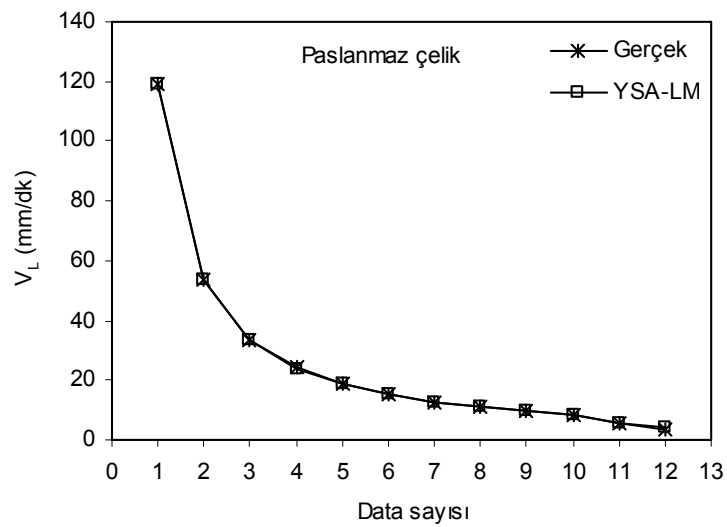


Şekil 5.109. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-LM)

LM eğitiminde kullanılan verilerin aynısı, SCG algoritmasında yeniden eğitilmiş ve elde edilen sonuçların gerçek değerlerle uyum içerisinde olduğu Şekil 5.110' da gösterilmiştir.



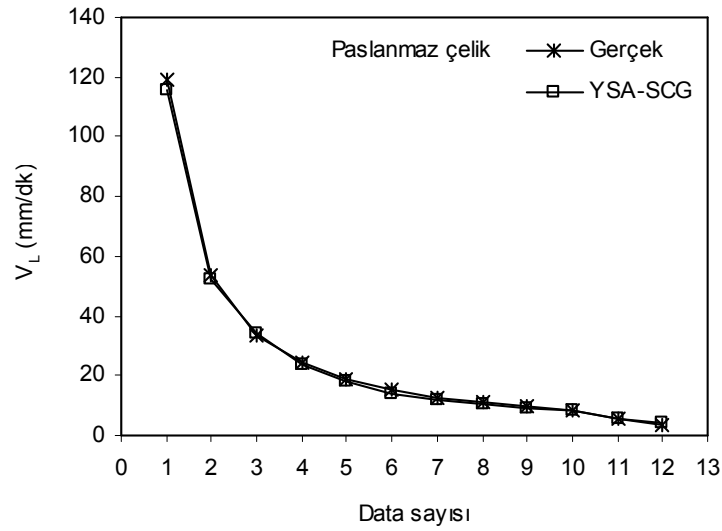
Şekil 5.110. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-SCG)



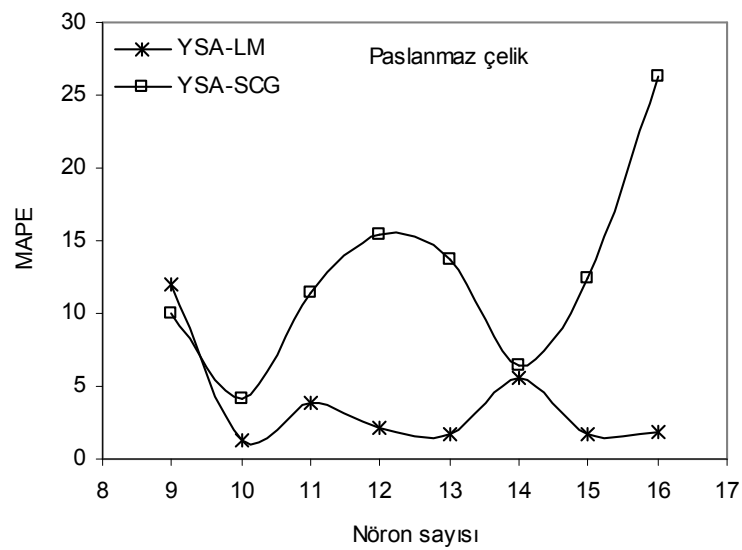
Şekil 5.111. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-LM)

Paslanmaz çelik kesmeye ait toplam 84 verinin 12 tanesi test verileri olarak seçilmiştir. Seçilen bu veriler önce LM, daha sonra SCG algoritmalarında eğitilerek YSA ağı oluşturulmuştur. YSA değerleriyle gerçek veriler arasında her iki algoritma için elde

edilen ilişki, Şekil 5.111 ve Şekil 5.112’ de gösterilmiştir. Gerçek verilerle YSA değerleri karşılaştırıldığında, LM eğitim algoritmasının SCG’ ye göre çok daha başarılı olduğu açıkça görülmektedir.

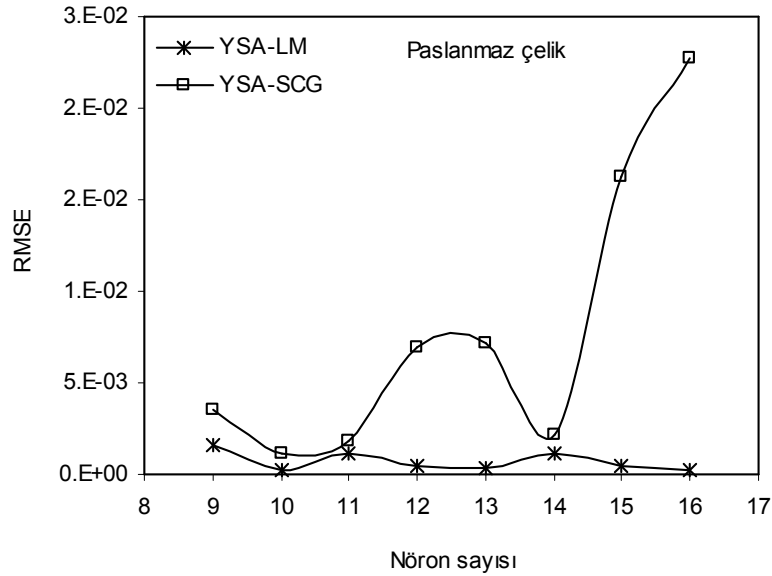


Şekil 5.112. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-SCG)



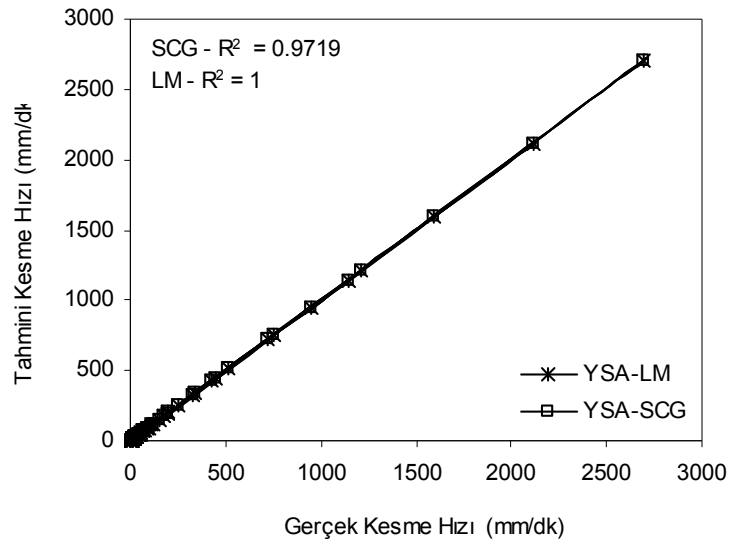
Şekil 5.113. Ortalama Mutlak Yüzde Hatanın Nöron Sayısıyla Değişimi (MAPE – Test)

Paslanmaz çelik kesme için oluşturulan YSA sisteminde test değerleri dikkate alınarak, en iyi ağ yapısındaki nöron sayılarıyla ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) arasındaki ilişki, Şekil 5.113’ de verilmiştir. Oluşturulan en iyi ağ yapısında, LM ve SCG eğitim algoritmaları için 10 nöron sayısında, MAPE değerinin minimum olduğu Şekil 5.113’ de açıkça görülmektedir. Bu modellemede kullanılan test değerleri, toplam veri setinden rasgele seçilmiştir.

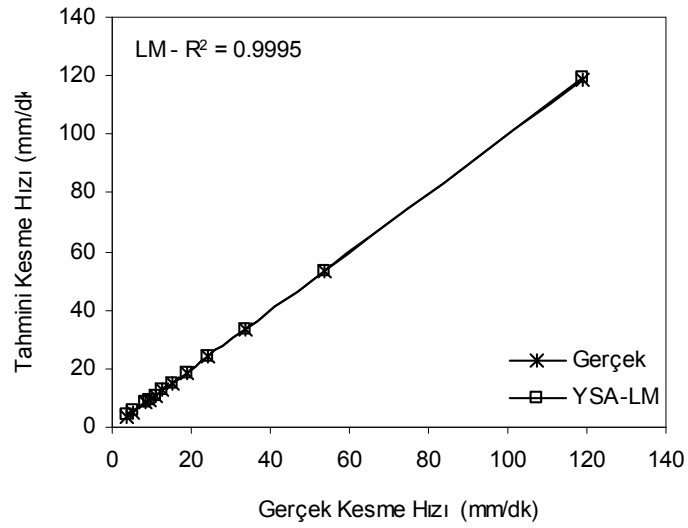


Şekil 5.114. Ortalama Hata kareleri Kökünün Nöron Sayısıyla Değişimi (RMSE – Test)

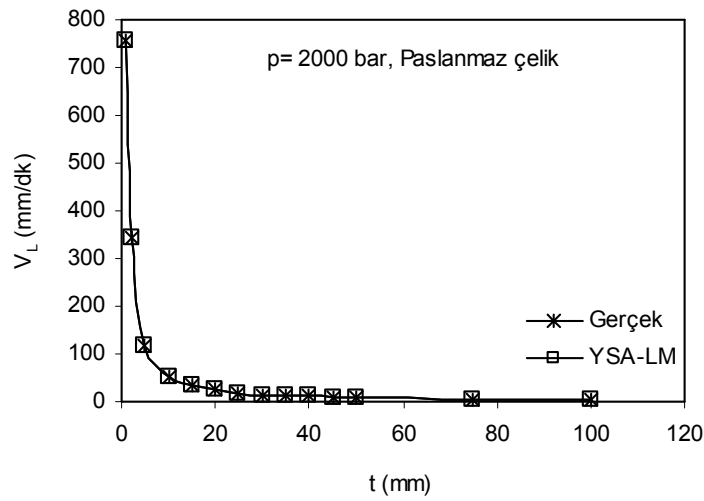
Test değerleri dikkate alınarak elde edilen Nöron sayısı – RMSE arasındaki ilişki, Şekil 5.114’ de görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, ortalama hata kareleri kökü (RMSE), LM için 10 nöronunda, SCG için 10 nöronunda optimum değere ulaşmaktadır. Bir başka deyişle en küçük RMSE değerinde minimum hata elde edilmektedir. Şekil 5.115 ve Şekil 5.116’ da sırasıyla eğitim ve test değerleri için korelasyon katsayısının değişimi gösterilmiştir. YSA değerlerindeki ortalama mutlak hatanın minimum değerinde $R^2 = 1$ ’e yaklaşır. Şekilden de anlaşıldığı gibi, eğitim ve test değerlerindeki hata sırayla, LM için % 0,10 – % 1,31 arasında değişirken, SCG için % 3,92 – % 4,09 arasında değişmektedir.



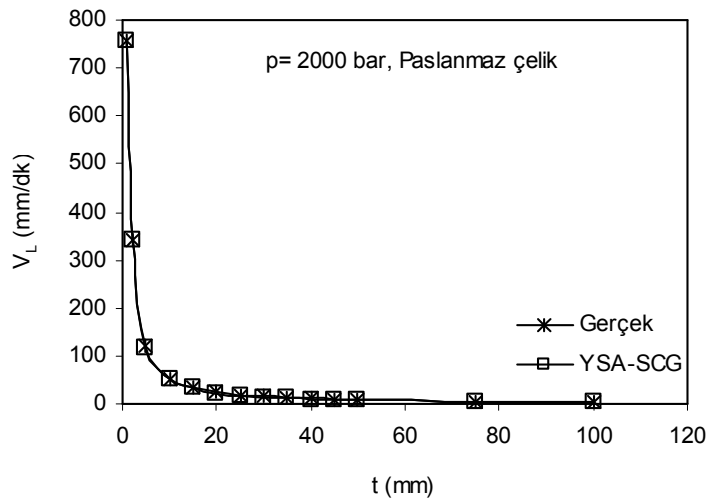
Şekil 5.115. Korelasyon Katsayının Değişimi (R^2 – Eğitim – YSA)



Şekil 5.116. Korelasyon Katsayının Değişimi (R^2 – Test – LM)

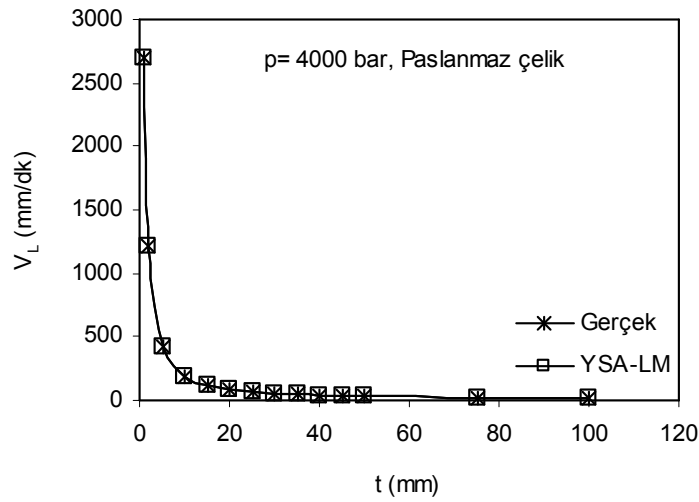


Şekil 5.117. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi ($p = 2000$ bar, YSA-LM)

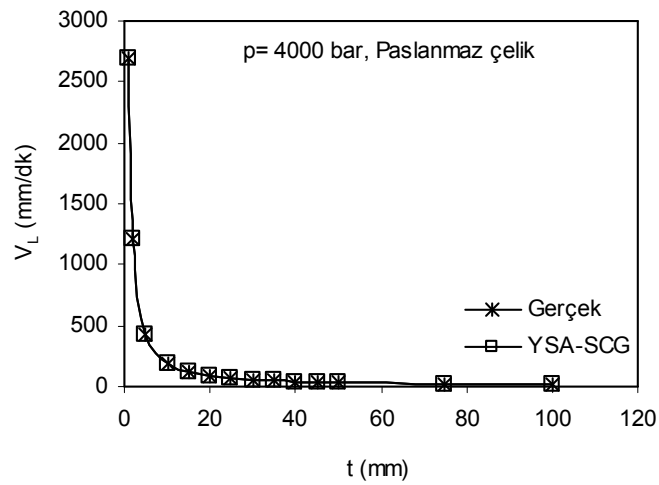


Şekil 5.118. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi ($p = 2000$ bar, YSA-SCG)

Sabit çalışma basıncında (2000 bar) kesilen paslanmaz çelik için elde edilen YSA sonuçları, Şekil 5.117 ve Şekil 5.118'de gösterilmiştir. Kesme hızının kalınlığa göre değişimi, LM ve SCG algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritma için elde edilen verilerin gerçek değerlerle çakışması, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini göstermektedir.

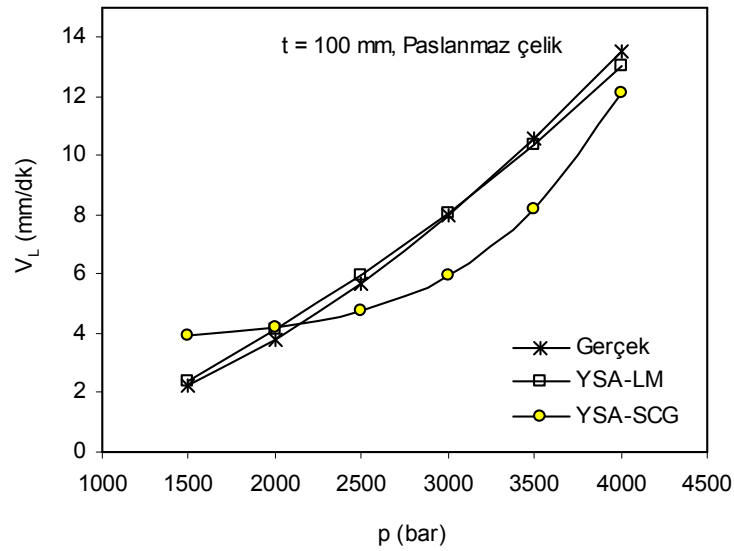


Şekil 5.119. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 4000 bar, YSA-LM)



Şekil 5.120. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 4000 bar, YSA-SCG)

Kesme hızıyla malzeme kalınlığı arasında 4000 bar basınçta elde edilen ilişki Şekil 5.119 ve Şekil 5.120’ de görülmektedir. Şekil 5.119 ve Şekil 5.120’ de gösterilen grafikler, sırasıyla LM ve SCG eğitim algoritmalarına göre oluşturulmuştur. Şekil 5.121 ‘de, $t = 100$ mm kalınlıktaki paslanmaz çeliğin kesilmesi için gerekli basınç ve kesme hızı değerleri görülmektedir.



Şekil 5.121. Gerçek Kesme Hızının Basınca göre Değişimi (t = 100 mm)

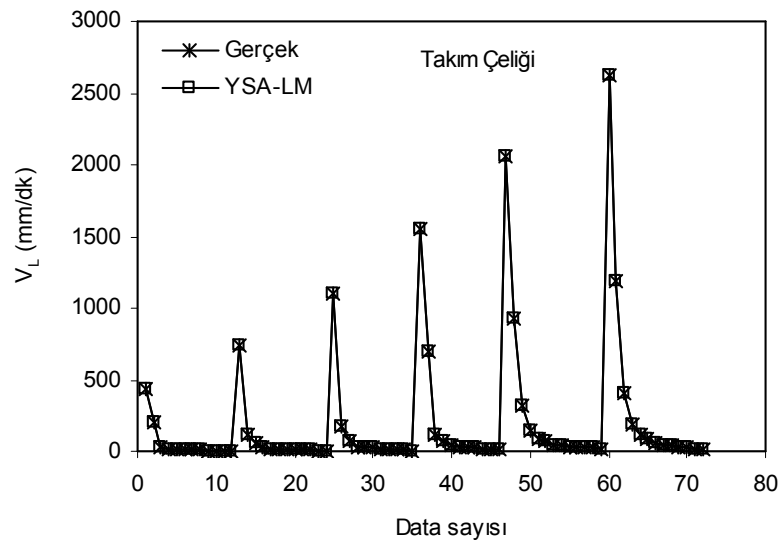
Çizelge 5.10 Aşındırıcı Su Jeti Sisteminde Paslanmaz Çelik Kesme için YSA Değerleri

Malzeme	Paslanmaz çelik					
Eğitim Algoritması	Levenberg-Marquardt Backpropagation (LM) Scaled Conjugate Gradient Backpropagation (SCG)					
Transfer Fonksiyonu	Tansig (Hyperbolic tangent sigmoid)			Gizli tabaka		
Transfer Fonksiyonu	Purelin (Linear transfer fonksiyonu)			Çıkış tabaka		
LM	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
9	2,2803	0,00045	1	12,04	0,00154	0,99856
10	0,8548	0,00017	1	1,31	0,00017	0,99998
11	1,0233	0,00027	1	3,92	0,00108	0,99929
12	0,1057	0,00002	1	2,19	0,00048	0,99986
13	0,2199	0,00004	1	1,69	0,00038	0,99991
14	0,2680	0,00006	1	5,60	0,00115	0,99919
15	0,2027	0,00005	1	1,66	0,00049	0,99985
16	0,5375	0,00009	1	1,91	0,00018	0,99998
SCG	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
9	13,835	0,26021	0,77555	10,0140	0,0035	0,98946
10	5,8135	0,00124	0,99999	4,0976	0,0010	0,99928
11	9,8701	0,00344	0,99996	11,3810	0,0018	0,99707
12	8,8533	0,00315	0,99996	15,4010	0,0069	0,97100
13	9,8694	0,00216	0,99998	13,6610	0,0071	0,96876
14	11,081	0,00234	0,99998	6,4818	0,0021	0,99718
15	13,369	0,00254	0,99998	12,4900	0,0162	0,83984
16	3,9273	0,00123	0,99999	26,2390	0,0226	0,68832

Çizelge 5.10' da verilen test değerleri incelendiğinde, LM ve SCG algoritmaları için 10 nöron sayısında, en iyi sonuçlar elde edilmiştir. LM ve SCG algoritmalarında MAPE değerleri sırasıyla; %1,31 ve % 4,09 olarak hesaplanmıştır.

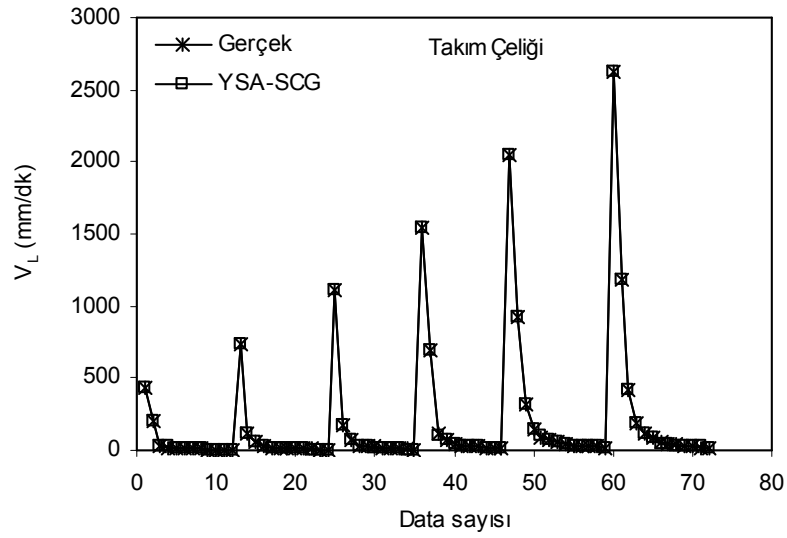
5.4.10. Takım çeliği için elde edilen YSA değerleri

ASJ sisteminde takım çeliği kesme için yapılan modellemede toplam 84 adet veri kullanılmıştır. Bunlardan 72 tanesi eğitim verileri olarak belirlenmiştir. Bu veriler, LM eğitim algoritmasında eğitilmiştir. Eğitim sonucunda elde edilen YSA değerlerindeki kesme (ilerleme) hızı ile gerçek kesme hızı değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.122' de gösterilmiştir.

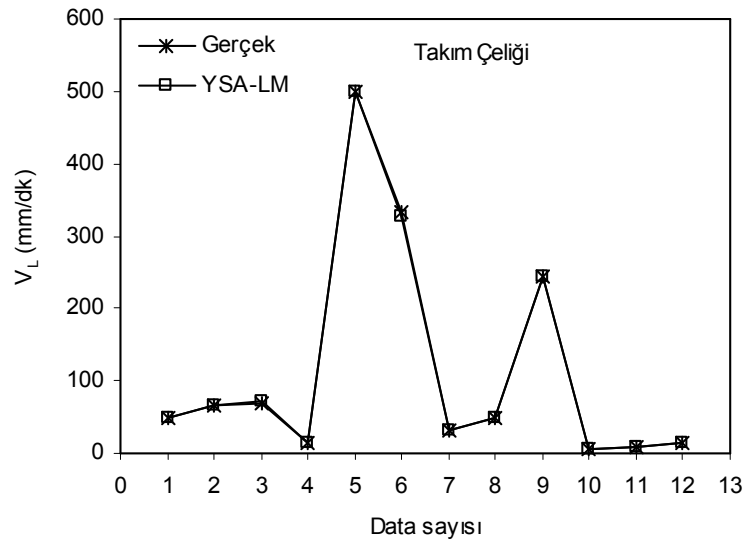


Şekil 5.122. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-LM)

LM eğitiminde kullanılan verilerin aynısı, SCG algoritmasında yeniden eğitilmiş ve elde edilen sonuçların gerçek değerlerle uyum içerisinde olduğu Şekil 5.123' de gösterilmiştir.



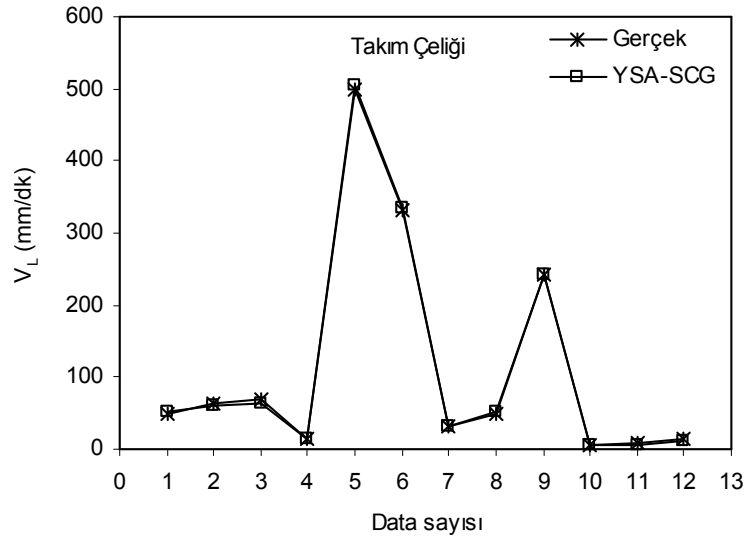
Şekil 5.123. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-SCG)



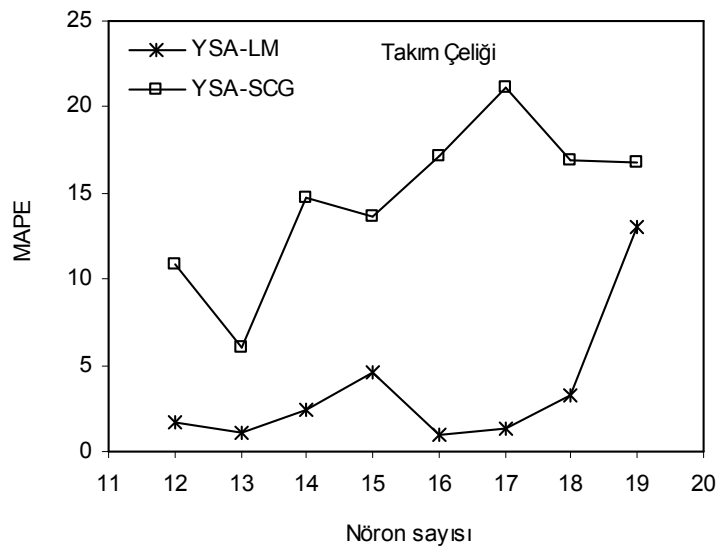
Şekil 5.124. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-LM)

Takım çeliği kesmeye ait toplam 84 verinin 12 tanesi test verileri olarak seçilmiştir. Seçilen bu veriler önce LM, daha sonra SCG algoritmalarında eğitilerek YSA ağı oluşturulmuştur. YSA değerleriyle gerçek veriler arasında her iki algoritma için elde

edilen ilişki, Şekil 5.124 ve Şekil 5.125’ de gösterilmiştir. Gerçek verilerle YSA değerleri karşılaştırıldığında, LM eğitim algoritmasının SCG’ ye göre çok daha başarılı olduğu açıkça görülmektedir.

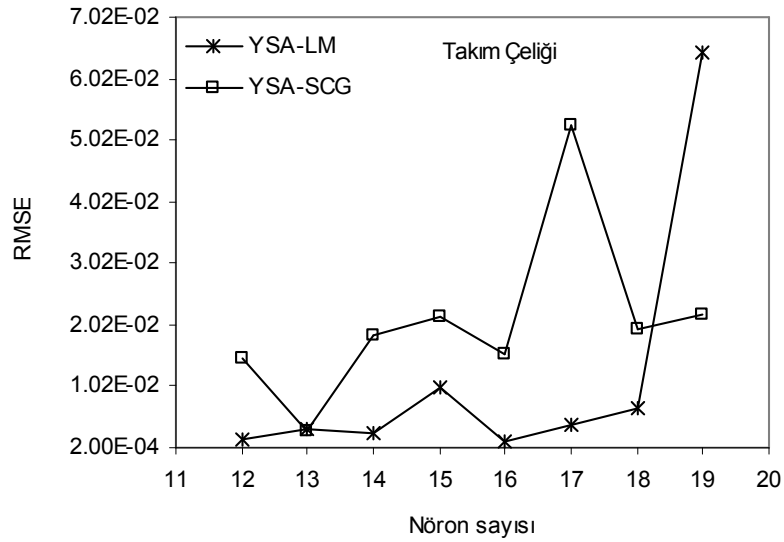


Şekil 5.125. Gerçek Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-SCG)



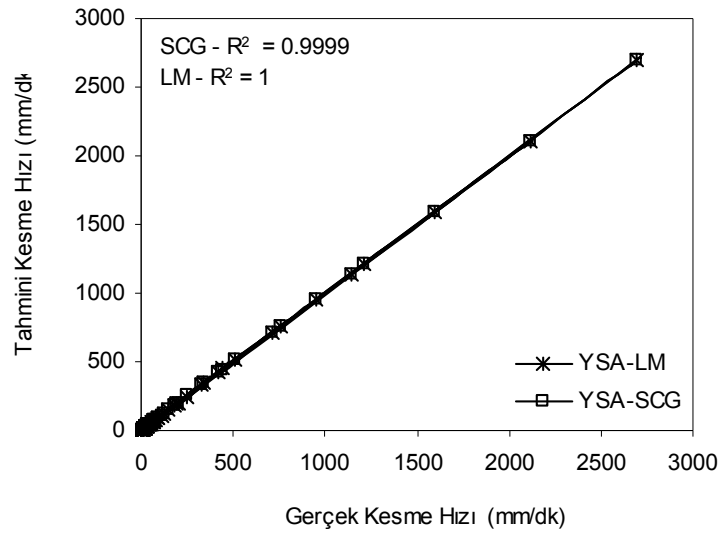
Şekil 5.126. Ortalama Mutlak Yüzde Hatanın Nöron Sayısıyla Değişimi (MAPE – Test)

Takım çeliği kesme için oluşturulan YSA sisteminde test değerleri dikkate alınarak, en iyi ağ yapısındaki nöron sayılarıyla ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) arasındaki ilişki, Şekil 5.126’ da verilmiştir. Oluşturulan en iyi ağ yapısında, LM eğitim algoritması için 16 nöron sayısında, SCG eğitim algoritmasında ise 13 nöron için MAPE değerinin minimum olduğu Şekil 5.126’ da açıkça görülmektedir. Bu modellemede kullanılan test değerleri, toplam veri setinden rasgele seçilmiştir.

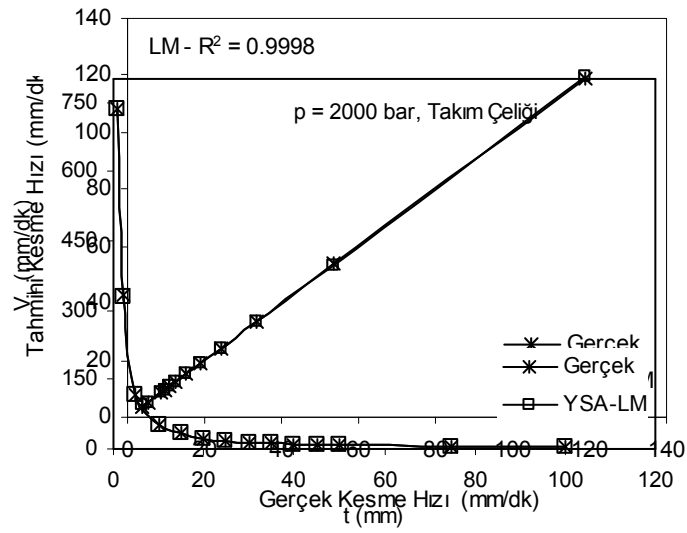


Şekil 5.127. Ortalama Hata Kareleri Kökünün Nöron Sayısıyla Değişimi (RMSE –Test)

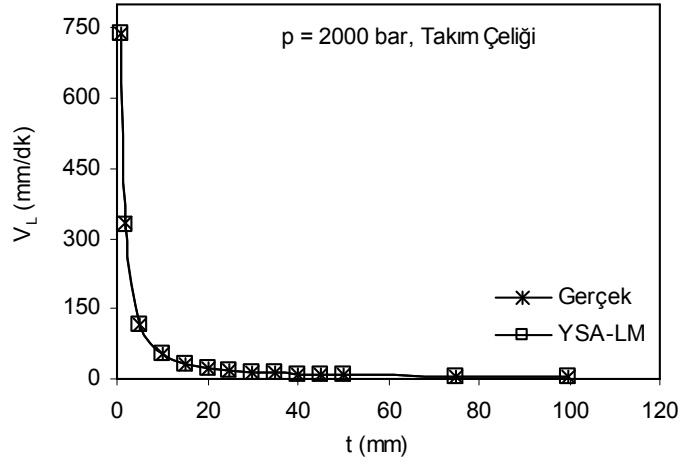
Test değerleri dikkate alınarak elde edilen Nöron sayısı – RMSE arasındaki ilişki, Şekil 5.127’ de görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, ortalama hata kareleri kökü (RMSE), LM için 16 nöronunda, SCG için 13 nöronunda optimum değere ulaşmaktadır. Bir başka deyişle en küçük RMSE değerinde minimum hata elde edilmektedir. Şekil 5.128 ve Şekil 5.129’ da sırasıyla eğitim ve test değerleri için korelasyon katsayısının değişimi gösterilmiştir. YSA değerlerindeki ortalama mutlak hatanın minimum değerinde $R^2 = 1$ ’e yaklaşır. Şekilden de anlaşıldığı gibi, eğitim ve test değerlerindeki hata sırayla, LM için % 0,01 – % 0,93 arasında değişirken, SCG için % 8,38 – % 6,08 arasında değişmektedir.



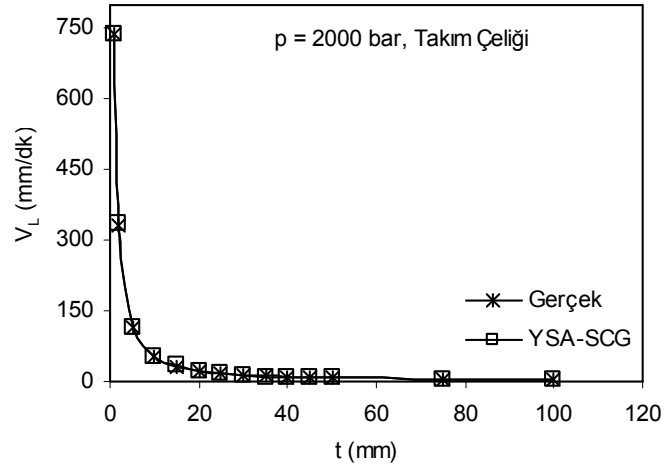
Şekil 5.128. Korelasyon Katsayısının Değişimi (R^2 – Eğitim – YSA)



Şekil 5.129. Korelasyon Katsayısının Değişimi (R^2 – Test – LM)

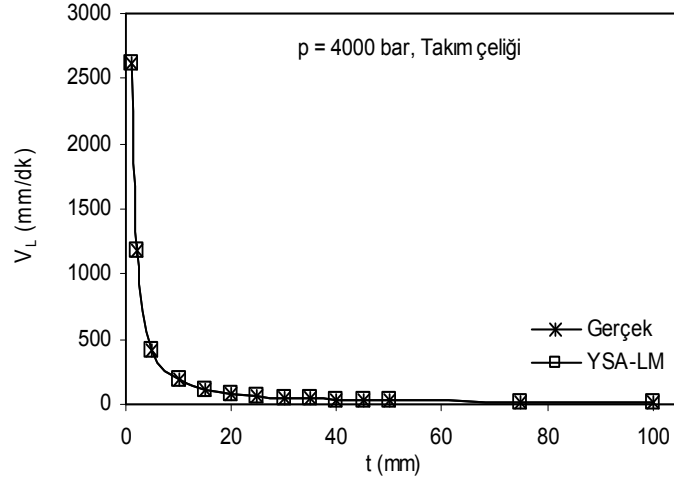


Şekil 5.130. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi ($p = 2000$ bar, YSA-LM)

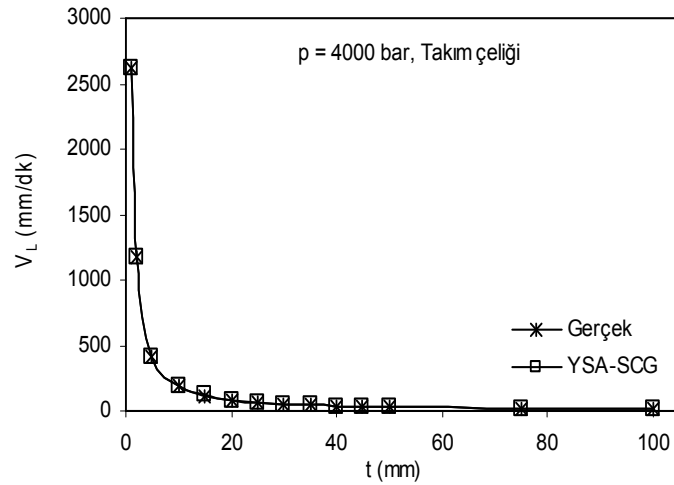


Şekil 5.131. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi ($p = 2000$ bar, YSA-SCG)

Sabit çalışma basıncında (2000 bar) kesilen takım çeliği için elde edilen YSA sonuçları Şekil 5.130 ve Şekil 5.131'de gösterilmiştir. Kesme hızının kalınlığa göre değişimi, LM ve SCG algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritma için elde edilen verilerin gerçek değerlerle çakışması, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini göstermektedir.

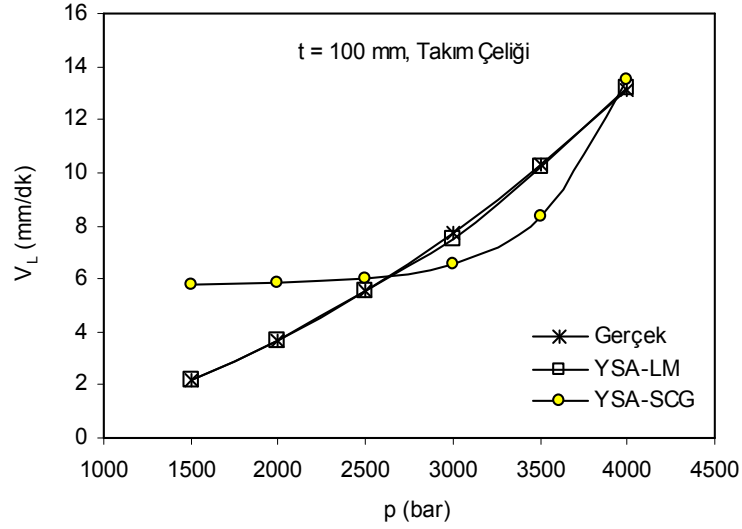


Şekil 5.132. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi ($p = 4000$ bar, YSA-LM)



Şekil 5.133. Gerçek Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi ($p = 4000$ bar, YSA-SCG)

Kesme hızıyla malzeme kalınlığı arasında 4000 bar basınçta elde edilen ilişki Şekil 5.132 ve Şekil 5.133’ de görülmektedir. Şekil 5.132 ve Şekil 5.133’ de gösterilen grafikler, sırasıyla LM ve SCG eğitim algoritmalarına göre oluşturulmuştur. Şekil 5.134 ‘de; $t = 100$ mm kalınlıktaki takım çeliğinin kesilmesi için gerekli basınç ve kesme hızı değerleri görülmektedir.



Şekil 5.134. Gerçek Kesme Hızının Basınca göre Değişimi (t = 100 mm)

Çizelge 5.11 Aşındırıcı Su Jeti Sisteminde Takım Çeliği Kesme için YSA Değerleri

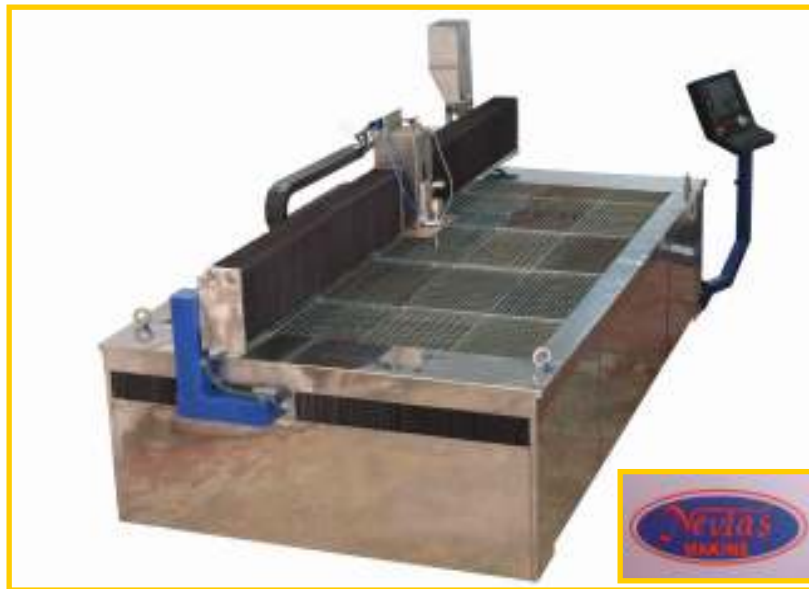
Malzeme	Takım Çeliği					
Eğitim Algoritması	Levenberg-Marquardt Backpropagation (LM) Scaled Conjugate Gradient Backpropagation (SCG)					
Transfer Fonksiyonu	Tansig (Hyperbolic tangent sigmoid)			Gizli tabaka		
Transfer Fonksiyonu	Purelin (Linear transfer fonksiyonu)			Çıkış tabaka		
LM	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
12	0.2240	0.000052	1	1.6320	0.00156	0.99993
13	0.1209	0.000021	1	1.1264	0.00336	0.99969
14	0.2964	0.000051	1	2.4551	0.00267	0.99980
15	0.1096	0.000022	1	4.6140	0.01008	0.99719
16	0.1470	0.000030	1	0.9352	0.00124	0.99996
17	0.1008	0.000017	1	1.3122	0.00401	0.99955
18	0.0196	0.000005	1	3.2423	0.00675	0.99874
19	0.0461	0.000016	1	12.9880	0.06459	0.88461
SCG	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
12	14.6540	0.00283	0.99997	10.8830	0.01490	0.99386
13	10.430	0.00167	0.99999	6.088	0.00288	0.99977
14	12.041	0.00237	0.99998	14.755	0.01858	0.99045
15	13.864	0.00184	0.99999	13.656	0.02141	0.98732
16	13.770	0.00262	0.99997	17.143	0.01546	0.99339
17	12.017	0.00270	0.99997	21.075	0.05277	0.92298
18	8.383	0.00332	0.99996	16.961	0.01958	0.98940
19	14.517	0.00585	0.99987	16.791	0.02168	0.98700

Çizelge 5.11’ de verilen test değerleri incelendiğinde, LM algoritması için 16 nöron, SCG algoritması için 13 nöron sayısında, en iyi sonuçlar elde edilmiştir. LM ve SCG algoritmalarında MAPE değerleri sırasıyla; %0,93 ve % 6,08 olarak hesaplanmıştır.

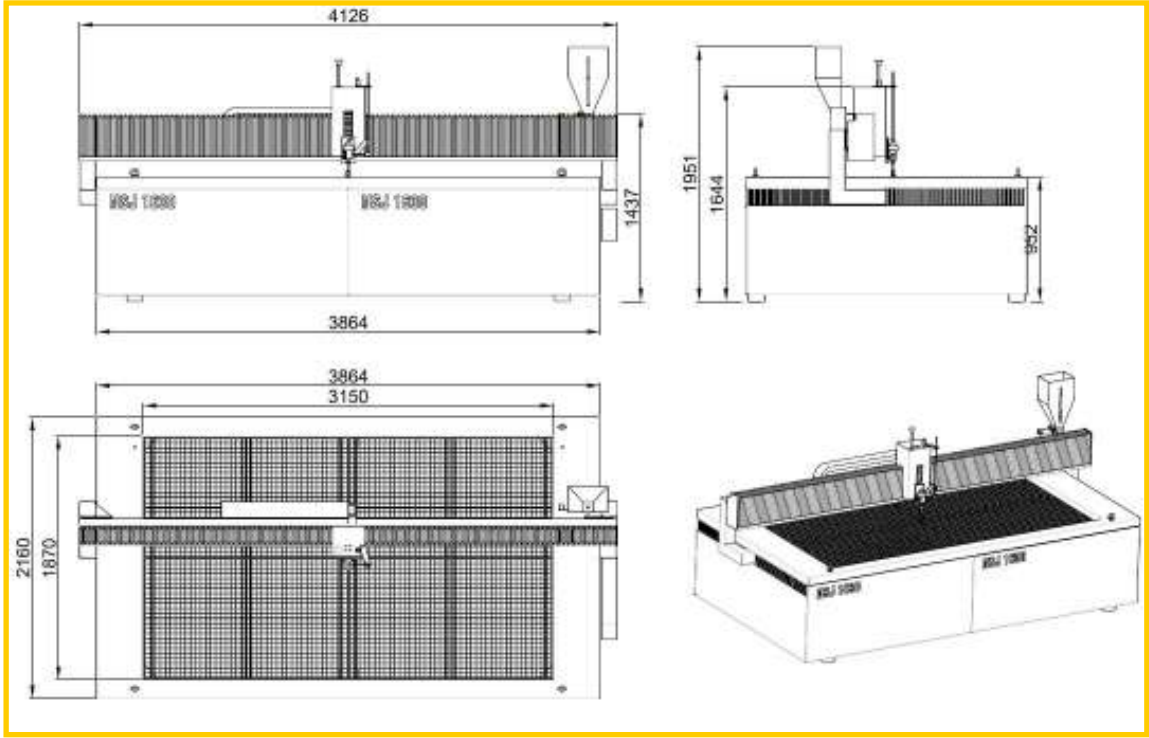
5.5. Aşındırıcı Su Jeti Düzenegi

5.5.1. Giriş

Şekil 5.135 ve Şekil 5.136’ de gösterilen NSJ 160 tip ASJ tezgâhı; bir adet basınç artırıcı, bir adet kesme kafası ve aşındırıcı kesme kafası, bir adet CNC kontrol ünitesi, CAD–CAM (software-cam) ünitesi ve bu üniteyle kontrol edilen otomatik nesting (bağlama) ile bir adet kesme tablasından oluşmaktadır. 50 HP gücünde, maksimum kapasitesi 4000 bar olan su jeti pompasına sahip kesme tezgâhında, doğada bulunan tüm malzemelerin (250 mm kalınlığa kadar) kesimi mümkündür. Bir adet pompa ile 4 l/dk debideki su, çok özel borularla kesme kafasına gönderilir. Gerektiğinde iki adet kesme kafası kullanmak da mümkündür



Şekil 5.135. Aşındırıcı Su jeti Tezgâhı (NSJ 1630) (nevtasmakine, 2006).



Şekil 5.136. Aşındırıcı Su Jeti Tezgâhının Detay Resimleri (NSJ 1630)

Kesme kafasına ulaşan su, 0,014" (daha küçük de olabilir) çapındaki elmas orifis içerisinden geçirilerek, ses hızının üç katına çıkarılır. Daha sonra, karışım odasında oluşan vakum yardımıyla su ile karışan aşındırıcı kesme kumu karışımı, 1mm iç çapındaki nozuldan geçirilerek, malzemeye sevk edilir. Nozul çapı 0,1÷0,3 mm arasında değişir. Kesme kafası -z yönünde 150 mm hareket edebilmektedir. Keme kafasının hareketi, harici yağlanabilen hassas boşluksuz lineer kızaklardan oluşan ve şasi içerisinde körüklerle korunaklı hareket sistemi tarafından sağlanmaktadır. İki kesme kafası için, kafalar arasındaki mesafe 250 mm–1000 mm arasındadır. Bu mesafenin ayarlanabildiği kesme tablası tamamen paslanmaz saçtan imal edilmiş olup, (3000x1600) mm boyutundadır. Böylece, tek kesme kafası kullanılmak istendiğinde, diğer kesme kafasının çalışan kafaya engel olmaması için, manuel olarak kaydırılması mümkündür. 4,130 atm değerindeki basınç artırıcının, günde 24 saat ve toplamda 2000 saat sorunsuz çalışabileceği garanti kapsamındadır. NSJ 1630 tipindeki ASJ tezgâhına ait mekanik hassasiyet $\pm 0,1$ mm; tekrarlanabilirlik $\pm 0,1$ mm iken, -x ve -y eksenini boyunca ilerleme hızları 0÷11,000 mm/dk değerindedir (nevtasmakine, 2006).

5.5.2. Ölçüm ekipmanları

➤ Tabla yapısı ve hareket sistemi

- Tamamen paslanmaz saçtan imal edilmiş tank ve koruma saçları.
- Yüksek dayanımlı ve rijit (120x120) mm' lik kare profilden imal edilmiş hareket sistemi.
- Hareket sisteminin iç tarafına gizlenmiş, hassas boşluksuz lineer kızak ve kremayer/tinger sistemi.
- Kızak ve kremayer/tinger sistemi (koruyucu körüklerle muhafaza edilmiş).
- Tezgâh tablasının sıfır pozisyonuna duyarlı proximity swiçler.
- Kesilecek malzemenin yerleştirilmesi ve alınmasına imkân tanıyan komple açık alan.
- Sacın yerleştirileceği, değiştirilebilir, galvaniz kaplı tabla ızgaraları.
- Toplam (susuz) tabla ağırlığı: 3000 kg.



Şekil 5.137. Aşındırıcı Su Jeti Düzeneginde Hareket Sistemi(nevtasmakine, 2006).

➤ Aşındırıcı parçacık

- Olivine olarak da bilinen garnet, keskin köşeli yapıya sahip bir aşındırıcıdır.

- Tanecik boyutu, $0,1\div 0,3$ mm değerindedir.
- Kesme için gerekli aşındırıcı miktarı, $100\div 500$ gr/dk arasında değişir.



Şekil 5.138. Garnet Aşındırıcı Parçacığı(nevtasmakine, 2006).

➤ **CNC kontrol ünitesi**

- NC 400 G – Code software; Floppy disk ve RS – 232 Seri port bağlantıları.
- 750 Watt; 3000 dev/dk; 2,39 – 7,17 Nm; 131072 Puls/dev Encoder.
- 750 Watt FALDIC – W serileri 1ϕ , 3ϕ ; 200 V Dijital servo yükseltici.
- Fuji servo motorlar; tüm serilerde 3 m, tek yönlü bağlantı; tüm serilerde 3 m, 3000 dev/dk; 2000 dev/dk $0,5''/0,75''/0,0$; tüm serilerde 5 m, 3000 dev/dk, çok yönlü bağlantı; tüm serilerde 5 m, 3000 dev/dk, frensiz çok yönlü bağlantı.



Şekil 5.139. CNC Kontrol Ünitesi(nevtasmakine, 2006).

Teknik özellikleri

- Delta – Tau Advantage 400 CNC Kontrol üniteleri (USA); PC 104 Vortex 586 işlemci; PMAC2 104 hareket kontrolü; 8,4” renkli TFT düz panel LCD ekran.
- 16 MB Flash disk, 40 watt güç kaynağı; USB girişi, klavye, işlemci operatör paneli, manuel puls jeneratörü; debi ölçen analog potansiyometre, mil, tırnaklı mil.

➤ **Basınç artırıcı**

- Çalışma basıncı: 420 MPa; su debisi: 4 lt/dk; güç: 37 kW (50 HP).
- Eksenel pistonlu hidrolik sürücü ünite ve elektronik basınç kontrolü.
- NSJ Ecotron 404 Model basınç artırıcı; elektronik basınç ayar kontrolü ve Yağ/Su soğutma sistemi; termostatik kontrollü hidrolik yağ soğutucu sistemi
- Yedek parça seti (yüksek basınca dayanıklı keçeler ve check valf).
- Silindir sökme – takma için özel el aletleri ve seti; yüksek basınç elemanları için özel gres yağları
- Pnömatik kontrollü aşağı akış valfi; elektronik kontrol ünitesi ELP; Booster pompası; 2.49 lt akümülatör (TUV sertifikasına sahip).



Şekil 5.140. Basınç Artırıcı Ünitesi (NSJ Ecotron 404)

➤ **Kesme kafası**

- Aşındırıcı kesme sistemi – TWINJET, waterjet valve – WJ070080/590
- Basınç (max): 420 MPa; Basınçlı hava: 0,5 ÷ 0,7 MPa
- Kesme kafası TJ006061/590; sade su jeti için nozul gövdesi
- Yekpare kendinden ayarlı nozul ve orifis gövdesi; 2 adet nozul ve orifis
- Maximum swiç (durdurma) zamanı: 0,1 saniye; özel montaj takımları; 500 kg ve # 80 Garnet



Şekil 5.141. Kesme Kafası ve Bağlantıları(nevtasmakine, 2006).

➤ **CAD-CAM kontrol ünitesi**

- Yüksek performanslı CAD sistemi; otomatik ISO program processing CAM yazılımı
- Otomatik nesting (minimum fire yazılımı); seviyeye göre otomatik seçim; otomatik çevrim; otomatik etiketleme; standart şekiller için makrolar
- Kesme şekline göre süre, hız, uzunluk ve maliyet tabloları oluşturma
- Kesme simülasyonu, ISO kodları (G kodları ile programlanabilirlik); herhangi bir DXF çıkışlı CAD programına uygunluk

5.6. Aşındırıcı Su Jetiyle Kesilen Malzeme Yüzeyleri

Yapılan deneysel çalışmalardan da görüleceği üzere, pompa basıncı değiştirilmeden malzeme kalınlığında ve ilerleme hızındaki artış, farklı malzemelerde çizik oluşumunu artırmıştır. Şekil 5.142–5.153’ den de görüleceği üzere, çizik oluşumunda malzeme sertliği, malzeme kalınlığından daha etkilidir. Çizikler paslanmaz platina kesiminde (Şekil 5.152 ve Şekil 5.153) görüldüğü üzere, özellikle malzeme sertliği ile daha belirgin hale gelmiştir. Deneysel A ve B tipi kesme için yapılmıştır. A tipinde, nozul çapı 0,35 mm, karıştırma tüpü çapı 1,05 mm ve 80 meş garnet; B tipinde ise nozul çapı 0,25 mm, karıştırma tüpü çapı 0,76 mm ve 120 meş garnet kullanılmıştır. Çizik oluşumunu görüntüleyen bu resimler, Nikon-Coolpix 4500 marka; 4.0 Effective Megapixels, 4X Optical Zoom – Nikon Lens, 5 Area Multi AF özelliklerine sahip dijital fotoğraf makinesi kullanılarak elde edilmiştir.



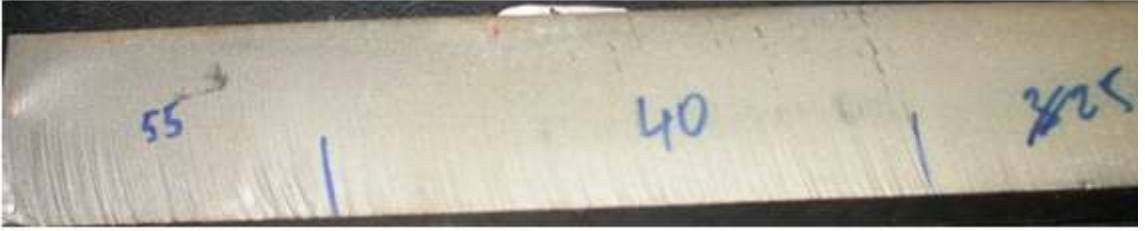
Şekil 5.142. B Tipi Uygulamada Çizik Oluşumu. Malzeme: St-42; Kalınlık: 15 mm; İlerleme Hızları: 102, 150 ve 190 mm/dk; Basınç: 3000 bar (MAJET, İstanbul, 2006)



Şekil 5.143. A Tipi Uygulamada Çizik Oluşumu. Malzeme: St-42; Kalınlık: 30 mm; İlerleme Hızları: 30,50 ve 65 mm/dk; Basınç: 3000 bar (MAJET, İstanbul, 2006)



Şekil 5.144. A Tipi Uygulamada Çizik Oluşumu. Malzeme: St-42; Kalınlık: 20 mm; İlerleme Hızları:60,110 ve 162 mm/dk; Basınç: 3000 bar (MAJET, İstanbul, 2006)



Şekil 5.145. B Tipi Uygulamada Çizik Oluşumu. Malzeme: St-42; Kalınlık: 30 mm İlerleme Hızları: 25, 40 ve 55 mm/dk; Basınç: 3000 bar (MAJET, İstanbul, 2006)



Şekil 5.146. A Tipi Uygulamada Çizik Oluşumu. Malzeme: St-42; Kalınlık: 10 mm; İlerleme Hızları: 120, 210 ve 300 mm/dk; Basınç: 3000 bar (MAJET, İstanbul, 2006)



Şekil 5.147. B Tipi Uygulamada Çizik Oluşumu. Malzeme: St-42; Kalınlık: 5mm İlerleme Hızları:250ve 500 mm/dk ile 250 ve 345 mm/dk; Basınç: 3000 bar (MAJET, İstanbul, 2006)



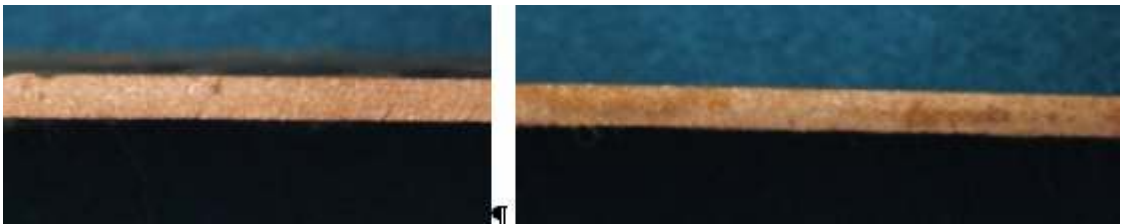
Şekil 5.148. B Tipi Uygulamada Çizik Oluşumu. Malzeme: St-42; Kalınlık: 5 mm; İlerleme Hızları: 250 ve 345 mm/dk; Basınç: 3000 bar (MAJET, İstanbul, 2006)



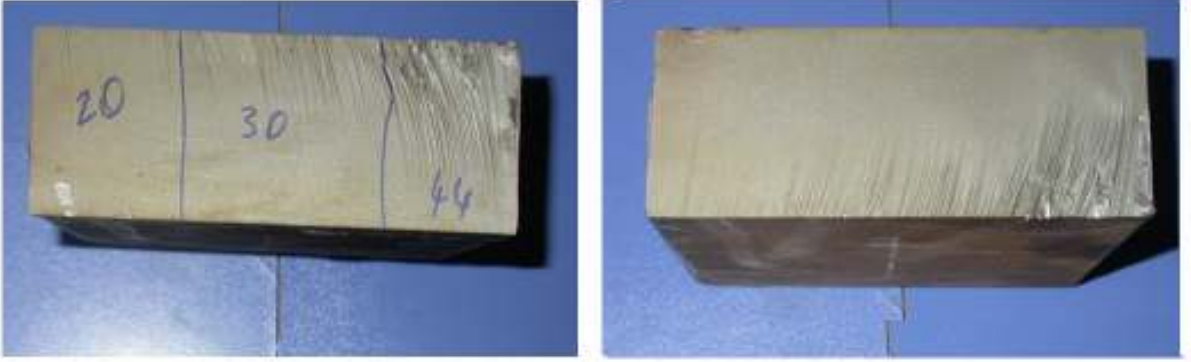
Şekil 5.149. A Tipi Uygulamada Çizik Oluşumu. Malzeme: Granit; Kalınlık: 20 mm; İlerleme Hızları: 250 ve 600 mm/dk; Basınç: 3000 bar (MAJET, İstanbul, 2006)



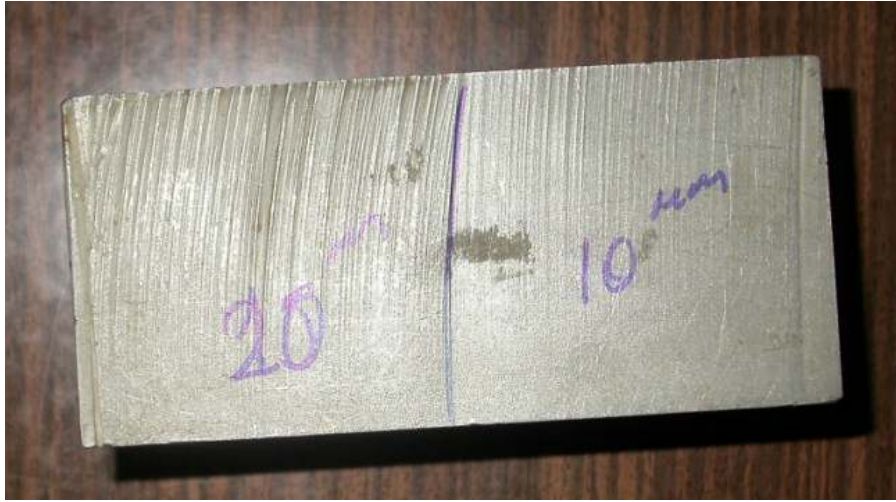
Şekil 5.150. A Tipi Uygulamada Çizik Oluşumu. Malzeme: Alüminyum; Kalınlık: 4 mm; İlerleme Hızları: 700, 1200 ve 1500 mm/dk; Basınç: 3000 bar (MAJET, İstanbul, 2006)



Şekil 5.151. A Tipi Uygulamada Çizik Oluşumu. Malzeme: Bakır; Kalınlık: 6 mm; İlerleme Hızları: 900 ve 1200 mm/dk; Basınç: 3000 bar (MAJET, İstanbul, 2006)



Şekil 5.152. B Tipi Uygulamada Çizik Oluşumu. Malzeme: 304 kalite paslanmaz çelik;
Kalınlık: 55 mm; İlerleme Hızları: 20, 30 ve 44 mm/dk; Basınç: 3000 bar (MAJET,
İstanbul, 2006)



Şekil 5.153. A Tipi Uygulamada Çizik Oluşumu. Malzeme: 304 kalite paslanmaz çelik;
Kalınlık: 60 mm; İlerleme Hızları: 20 ve 10 mm/dk; Basınç: 3000 bar (MAJET,
İstanbul, 2006)

5.7. Deneysel Verilerin YSA ile Modellenmesi

Bu deneysel çalışmada, farklı kalınlıklarda ve sabit basınç altında (3000 bar) ASJ ile kesilen malzemeler, alüminyum, INOX-316, granit, bakır, St-42 ve beyaz mermerdir. Kesilen malzemelerin ilerleme hızları YSA modeliyle belirlenmiştir. Kesme parametrelerinden su basıncı, aşındırıcı kütleli debisi, nozul çapı, karıştırma tüpü çapına ilişkin optimum verim değerleri seçilmiş ve deney süresince sabit tutulmuştur. Aşındırıcı türü olarak Bengal Bay Tipi 80 # Garnet kullanılmıştır. Bir adet kesme kafası ile iki adet basınç artırıcı bulunan ASJ düzeneğinden alınan deneysel sonuçlar, hassas kesme işlemi için elde edilmiştir. Deney sırasında sabit ve değişken olan parametrelerin sayısal değerleriyle ilgili detaylı bilgi, Çizelge 5.12’ de verilmiştir.

Çizelge 5.12. Deney Süresince Yapılan Kabuller

Malzeme tipi		Malzeme Kalınlığı (mm)					
Bakır	Alüminyum	3	5	8	10	15	20
		30	40	50	55	80	100
Granit	INOX-316	3	5	8	10	15	20
		30	40	50	55	80	100
Beyaz Mermer	St-42	3	5	8	10	15	20
		30	40	50	55	80	100
Nozul çapı (mm)		0,35					
Aşındırıcı Debisi (kg/dk)		0,40					
Pompa Basıncı (bar)		3000					
Aşındırıcı Türü		Bengal Bay Tipi 80 meş (#) Garnet					
Kesme Tipi		Hassas Kesme					
Kesme Başlığı		1 adet					

YSA modeli oluşturulurken, eğitim algoritması olarak geriye yayılma ağı kullanılmış ve denetimli öğrenme tipi seçilmiştir. Malzeme tipi ve malzeme kalınlığı giriş parametresi, ilerleme hızı ise çıkış parametresi olarak alınmıştır. Model, iki girişli iki gizli tabakalı ve bir çıkışlı bir yapıya sahiptir. Ağın eğitiminde kullanılan toplam veri sayısı 62 olup, toplam verilerin % 14,5’ i test, % 85,5’ i eğitim verileri olarak

seçilmiştir. Model oluşturulurken, “MATLAB [(Version 4.0.5 (R13))] işletim sistemi ve “Neural Network Toolbox” altında çalışan “Graphical User Interface Functions” alt başlığındaki “NN-Tool-Neural Network Toolbox Graphical User Interface” bilgisayar programı kullanılmıştır. Bu aşamada seçilen test değerleri rasgele belirlenmiştir.

Çizelge 5.13. Farklı Malzemeler için Aşındırıcı Su Jetiyle Kesme Sisteminde Elde Edilen YSA Değerleri

Malzemeler	St-42, granit, beyaz mermer, bakır, alüminyum ve INOX-316					
Eğitim Algoritması	Levenberg-Marquardt Backpropagation (LM)					
	Scaled Conjugate Gradient Backpropagation (SCG)					
Transfer Fonksiyonu	Tansig (Hyperbolic tangent sigmoid)			Gizli tabaka-I (LM)		
	Logsig (Logarithmic sigmoid)			Gizli tabaka-II (LM)		
Transfer Fonksiyonu	Tansig (Hyperbolic tangent sigmoid)			Gizli tabaka-I (SCG)		
	Tansig (Hyperbolic tangent sigmoid)			Gizli tabaka-II (SCG)		
Transfer Fonksiyonu	Purelin (Linear transfer fonksiyonu)			Çıkış tabaka (LM ve SCG)		
LM	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
11 (8+3)	10.8700	0.05505	0.99971	8.0420	0.20114	0.98454
12 (10+2)	2.9279	0.02260	0.99995	8.9571	0.18935	0.98630
13 (9+4)	2.7790	0.01149	0.99999	9.9700	0.19762	0.98508
14 (11+3)	10.7210	0.04235	0.99983	10.6610	0.26221	0.97373
15 (13+2)	4.1462	0.02707	0.99993	6.6673	0.14416	0.99206
16 (10+6)	0.1472	0.01040	0.99999	9.5229	0.16182	0.98999
17 (14+3)	3.4014	0.02199	0.99995	9.9727	0.18801	0.98649
18 (14+4)	1.9460	0.04276	0.99983	13.2680	0.22156	0.98124
SCG	Eğitim			Test		
Neuron Sayısı	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²
11 (8+3)	8.3500	0.04547	0.999800	12.5840	0.28561	0.968830
12 (10+2)	4.7783	0.04169	0.999840	9.6571	0.19615	0.985300
13 (9+4)	6.2327	0.02654	0.999930	11.8100	0.19111	0.986040
14 (11+3)	7.9525	0.04085	0.999840	11.6850	0.26970	0.972200
15 (13+2)	7.8956	0.04496	0.999810	10.5810	0.20161	0.984470
16 (10+6)	1.9743	0.02446	0.999940	10.7140	0.28889	0.968110
17 (14+3)	2.5593	0.03095	0.999910	8.8733	0.21377	0.982540
18 (14+4)	1.8198	0.00622	1.000000	15.1890	0.28383	0.969220

Çizelge 5.13’ de verilen test değerleri incelendiğinde, en iyi sonuçların LM algoritmasında çift gizli tabakaya sahip (13+2) şeklinde dizilmiş, 15 nöron için, SCG algoritmasında ise, çift gizli tabakaya sahip (14+3) şeklinde dizilmiş, 17 nörona sahip ağ sisteminde elde edildiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.14. Aşındırıcı Su Jetiyle Kesme İşleminin Modellendiği YSA Sisteminin Özellikleri

Giriş değişkenlerinin sayısı	2	
Çıkış değişkeninin sayısı	1	
Gizli tabaka sayısı	2	
En iyi ağ yapısındaki nöron sayısı	LM	SCG
	15 (13+2)	17 (14+3)
Kullanılan eğitim algoritması	LM (Levenberg –Marquardt) ve SCG (Scaled Conjugate Gradient Backpropagation)	
Maksimum eğitim süresi (epoch sayısı)	30000	
Eğitim ve transfer fonksiyonları	LM	SCG
	Tansig-logsig	Tansig-tansig
Toplam veri sayısı	62	
Eğitim değerlerinin sayısı	53	
Test değerlerinin sayısı	9	
Öğrenme fonksiyonu	LEARNGDM	
Performans fonksiyonu	MSE	
Eğitim ve test verilerindeki ortalama yüzde hata (MAPE) değerleri	EĞİTİM	TEST
	LM	LM
	0,1472	6,6673
	SCG	SCG
	1,8198	8,8733
Eğitim ve test verilerindeki ortalama karekökteki yüzde hata (RMSE) değerleri	LM	LM
	0,0104	0,1441
	SCG	SCG
	0,0062	0,2137
Eğitim ve test verilerindeki korelasyon katsayısının (R^2) ortalama (%) değerleri	LM	LM
	0,9999	0,9920
	SCG	SCG
	1,0000	0,9825
Veri işleme sistemi	MATLAB	

Modelleme için yapılan kabuller ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.4' de detaylı olarak ifade edilmiştir.

Çizelge 5.15. Test Değerlerine Ait Deneysel Verilerle YSA Değerlerinin Karşılaştırılması (Test–YSA)

Deneysel Veriler			Lineer Kesme Hızı (mm/dk)		
Seçilen Test Verileri	Malzeme	Kalınlık (mm)	Deneysel	LM	SCG
1	St-42	15	100	100,05	96,446
2	Aluminyum	15	200	190,47	196,94
3	Aluminyum	20	180	166,52	177,08
4	INOX-316	20	50	50,033	44,868
5	Granit	15	250	259,27	275,36
6	Granit	20	150	177,37	126,52
7	Beyaz mermer	20	200	224,45	252,72
8	Bakır	30	125	125,79	127,51
9	Bakır	40	100	112,84	108,73

Çizelge 5.16. En İdeal YSA Ağındaki Hata Değerleri (Test–LM)

TEST - LM		
Gizli tabaka sayısı : 2		Nöron Sayısı-15 (13+2)
Seçilen Test Verileri	Malzeme	Eğitilen verilerin hata değerleri
1	St-42	4.5081E-04
2	Aluminyum	9.5285E-02
3	Aluminyum	1.3478E-01
4	INOX-316	3.3138E-04
5	Granit	9.2710E-02
6	Granit	2.7368E-01
7	Beyaz mermer	2.4448E-01
8	Bakır	7.8636E-03
9	Bakır	1.2836E-01

Çizelge 5.17. En İdeal YSA Ağındaki Hata Değerleri (Test–SCG)

TEST - SCG		
Gizli tabaka sayısı : 2		Nöron Sayısı-17 (14+3)
Seçilen Test Verileri	Malzeme	Eğitilen verilerin hata değerleri
1	St-42	3.5535E-02
2	Aluminyum	3.0550E-02
3	Aluminyum	2.9161E-02
4	INOX-316	5.1317E-02
5	Granit	2.5358E-01
6	Granit	2.3480E-01
7	Beyaz mermer	5.2717E-01
8	Bakır	2.5075E-02
9	Bakır	8.7343E-02

Çizelge 5.18. En İdeal YSA Ağındaki Hata Değerleri (Eğitim–SCG)

EĞİTİM - SCG		
Gizli tabaka sayısı : 2		Nöron Sayısı-17 (14+3)
Eğitim verilerinin sayısı	Malzeme	Eğitilen verilerin hata değerleri
1	St-42	1.1521E-02
2	St-42	2.1518E-02
3	St-42	2.8776E-02
4	St-42	3.5535E-02
5	St-42	7.5337E-03
6	St-42	9.8423E-03
7	St-42	3.7532E-03
8	St-42	3.3643E-03
9	St-42	5.1096E-03
10	St-42	5.5707E-03
11	St-42	3.7784E-03
12	Aluminyum	1.3451E-03
13	Aluminyum	2.5893E-03
14	Aluminyum	1.8082E-03
15	Aluminyum	4.3315E-03
16	Aluminyum	1.1005E-05
17	Aluminyum	1.9450E-02
18	Aluminyum	3.8502E-03
19	Aluminyum	5.2030E-03
20	Aluminyum	1.0830E-02
21	Aluminyum	4.4395E-03
22	INOX-316	6.7797E-03
23	INOX-316	3.5954E-02
24	INOX-316	1.4536E-01
25	INOX-316	1.4567E-01
26	INOX-316	4.4845E-02
27	INOX-316	1.2682E-02
28	INOX-316	1.1641E-03
29	INOX-316	7.4479E-04
30	INOX-316	8.3076E-03
31	INOX-316	1.0102E-02
32	INOX-316	2.2469E-03
33	Granit	1.5427E-03
34	Granit	4.0901E-03
35	Granit	3.9581E-04
36	Granit	8.0462E-03
37	Granit	2.5088E-03
38	Granit	6.2389E-03
39	Granit	2.4970E-02
40	Beyaz mermer	2.5943E-03
41	Beyaz mermer	1.4880E-03
42	Beyaz mermer	1.2369E-02
43	Beyaz mermer	2.1896E-03
44	Beyaz mermer	5.3748E-03
45	Beyaz mermer	1.6671E-03
46	Beyaz mermer	7.1673E-03
47	Beyaz mermer	2.2170E-03
48	Bakır	1.7510E-03
49	Bakır	8.3084E-06
50	Bakır	1.1645E-03
51	Bakır	1.1713E-03
52	Bakır	1.1198E-03
53	Bakır	1.3616E-02

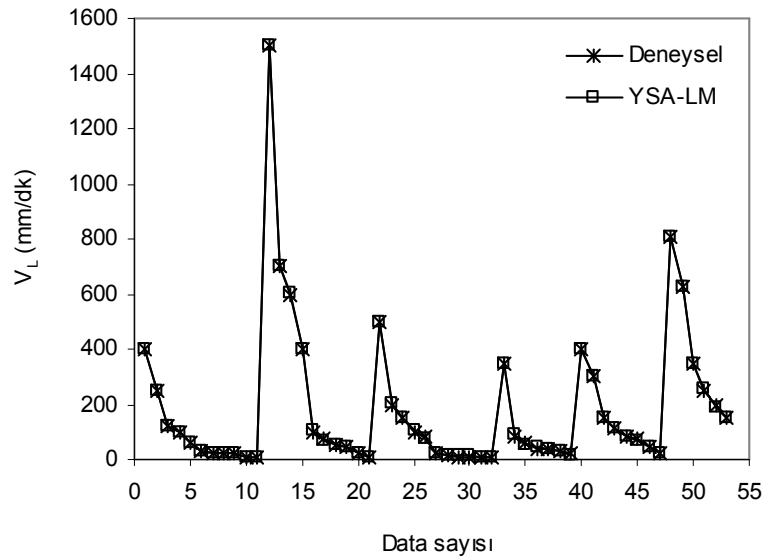
Çizelge 5.19 En İdeal YSA Ağındaki Hata Değerleri (Eğitim-LM)

EĞİTİM - LM		
Gizli tabaka sayısı : 2		Nöron Sayısı-15 (13+2)
Eğitim verilerinin sayısı	Malzeme	Eğitilen verilerin hata değerleri
1	St-42	2.4898E-04
2	St-42	1.1894E-04
3	St-42	1.4400E-03
4	St-42	4.5081E-04
5	St-42	2.6726E-05
6	St-42	5.4735E-04
7	St-42	1.5558E-03
8	St-42	6.6646E-03
9	St-42	7.9329E-03
10	St-42	2.7893E-03
11	St-42	1.7997E-03
12	Aluminyum	1.1666E-04
13	Aluminyum	6.6478E-04
14	Aluminyum	1.0376E-03
15	Aluminyum	7.5625E-05
16	Aluminyum	2.4636E-02
17	Aluminyum	5.8505E-02
18	Aluminyum	2.5310E-02
19	Aluminyum	6.4173E-03
20	Aluminyum	7.3440E-03
21	Aluminyum	3.5645E-03
22	INOX-316	5.7248E-05
23	INOX-316	2.3152E-03
24	INOX-316	2.4530E-03
25	INOX-316	2.7677E-02
26	INOX-316	4.1660E-02
27	INOX-316	2.1711E-03
28	INOX-316	1.8589E-02
29	INOX-316	2.3508E-02
30	INOX-316	1.6917E-02
31	INOX-316	1.1752E-02
32	INOX-316	1.2895E-03
33	Granit	1.3414E-02
34	Granit	7.1133E-02
35	Granit	4.6443E-02
36	Granit	3.2924E-02
37	Granit	8.9014E-03
38	Granit	2.4564E-02
39	Granit	2.7680E-02
40	Beyaz mermer	4.3286E-03
41	Beyaz mermer	6.2769E-03
42	Beyaz mermer	1.7074E-02
43	Beyaz mermer	1.1023E-02
44	Beyaz mermer	1.4138E-02
45	Beyaz mermer	5.4464E-02
46	Beyaz mermer	8.0120E-03
47	Beyaz mermer	5.4225E-02
48	Bakır	5.2220E-05
49	Bakır	2.6015E-04
50	Bakır	2.7957E-03
51	Bakır	5.5777E-02
52	Bakır	9.5303E-02
53	Bakır	3.6478E-02

Çizelge 5.20. Deneysel Verilerle YSA Değerlerinin Karşılaştırılması (Eğitim–YSA)

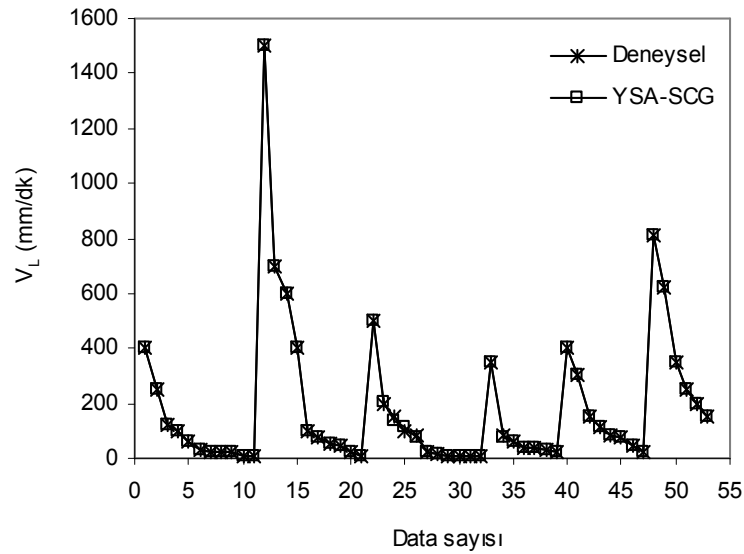
Deneysel Veriler			Lineer Kesme Hızı (mm/dk)		
Eğitim verilerinin sayısı	Malzeme	Kalınlık (mm)	Deneysel	LM	SCG
1	St-42	3	400	400.02	401.15
2	St-42	5	250	250.01	247.85
3	St-42	10	120	119.86	122.88
4	St-42	20	60	60.003	60.753
5	St-42	25	45	45.027	45.868
6	St-42	30	30	30.055	30.984
7	St-42	40	25	24.844	24.625
8	St-42	50	20	20.666	19.664
9	St-42	55	20	19.207	20.511
10	St-42	80	10	10.279	9.4429
11	St-42	100	5	4.82	5.3778
12	Aluminyum	3	1500	1500	1500.1
13	Aluminyum	5	700	699.93	699.74
14	Aluminyum	8	600	600.1	600.18
15	Aluminyum	10	400	399.99	399.57
16	Aluminyum	30	100	102.46	99.999
17	Aluminyum	40	75	69.15	76.945
18	Aluminyum	50	50	52.531	49.615
19	Aluminyum	55	45	45.642	44.48
20	Aluminyum	80	20	20.734	21.083
21	Aluminyum	100	10	9.6435	9.556
22	INOX-316	3	500	500.01	499.32
23	INOX-316	5	200	200.23	203.6
24	INOX-316	8	150	149.75	135.46
25	INOX-316	10	100	102.77	114.57
26	INOX-316	15	80	75.834	75.516
27	INOX-316	30	20	19.783	21.268
28	INOX-316	40	15	13.141	14.884
29	INOX-316	50	10	12.351	9.9255
30	INOX-316	55	10	11.692	9.1692
31	INOX-316	80	7	5.8248	5.9898
32	INOX-316	100	5	5.129	5.2247
33	Granit	10	350	348.66	349.85
34	Granit	30	80	87.113	79.591
35	Granit	40	60	55.356	59.96
36	Granit	50	40	43.292	40.805
37	Granit	55	40	40.89	40.251
38	Granit	80	30	27.544	29.376
39	Granit	100	20	17.232	22.497
40	Beyaz mermer	10	400	400.43	399.74
41	Beyaz mermer	15	300	299.37	299.85
42	Beyaz mermer	30	150	151.71	148.76
43	Beyaz mermer	40	115	113.9	114.78
44	Beyaz mermer	50	80	81.414	80.537
45	Beyaz mermer	55	74	68.554	73.833
46	Beyaz mermer	80	43	42.199	42.283
47	Beyaz mermer	100	20	25.423	19.778
48	Bakır	3	808	808.01	808.18
49	Bakır	5	625	624.97	625
50	Bakır	8	350	349.72	349.88
51	Bakır	10	250	255.58	249.88
52	Bakır	15	200	190.47	199.89
53	Bakır	20	150	153.65	151.36

Kesme hızı için, deneysel (MAJET, 2006) değerler ile YSA metodu kullanılarak hesaplanmış değerler (test değerleri) arasındaki ilişki, verilen çizelgeler (4.154 – 4.173) yardımıyla ifade edilmiştir. SCG (Scaled Conjugate Gradient Backpropagation) ve LM (Levenberg –Marquardt) transfer fonksiyonu kullanılarak eğitilen ağın test değerleri ile gerçek değerlerini karşılaştıran, korelasyon katsayısındaki (R^2) değişim, ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ve ortalama karekökteki yüzde hata (RMSE) sonuçları da verilmiştir.

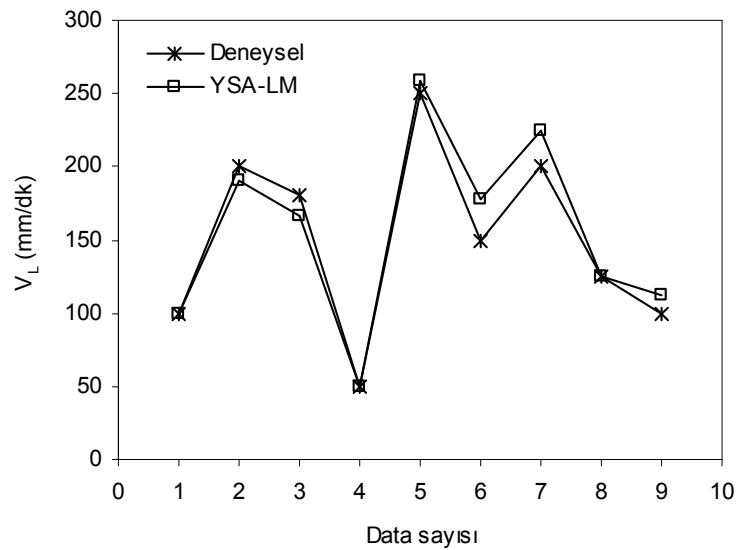


Şekil 5.154. Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Eğitim-YSA-LM)

MAJET firmasında aşındırıcı su jetiyle kesilen farklı kalınlıklardaki St-42, alüminyum, Inox 316, granit, beyaz mermer ve bakır için elde edilen deneysel değerlerle yapılan modellemede 62 adet veri kullanılmıştır. Bunlardan 53 tanesi eğitim verileri olarak belirlenmiştir. Bu veriler sırasıyla LM ve SCG algoritmalarında eğitilmiştir. Eğitim sonucunda elde edilen YSA değerlerine ait kesme hızları ile deneylerde kullanılan kesme hızı değerleri arasındaki ilişki, Şekil 5.154 ve Şekil 5.155’ de gösterilmektedir. Her iki şekilden de görüleceği üzere, LM ve SCG için elde edilen sonuçlar, deneylerdeki değerlerle tam bir uyum içerisindedir.



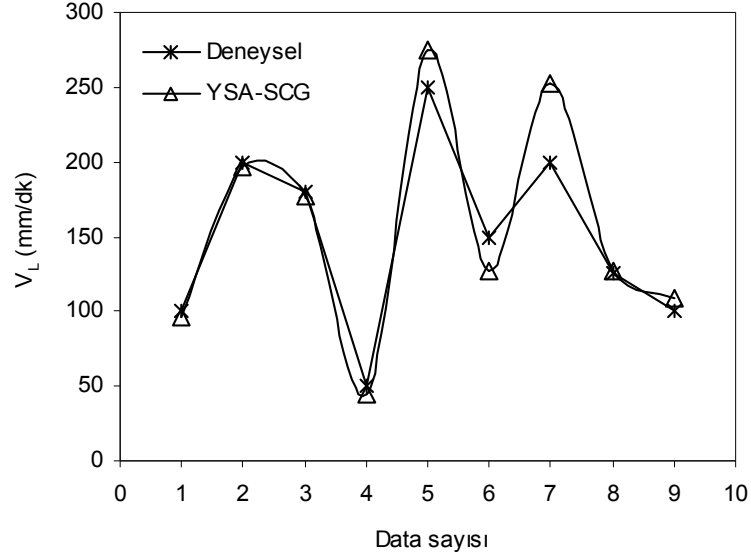
Şekil 5.155. Kesme hızının YSA sonuçlarıyla karşılaştırılması (Eğitim-YSA-SCG)



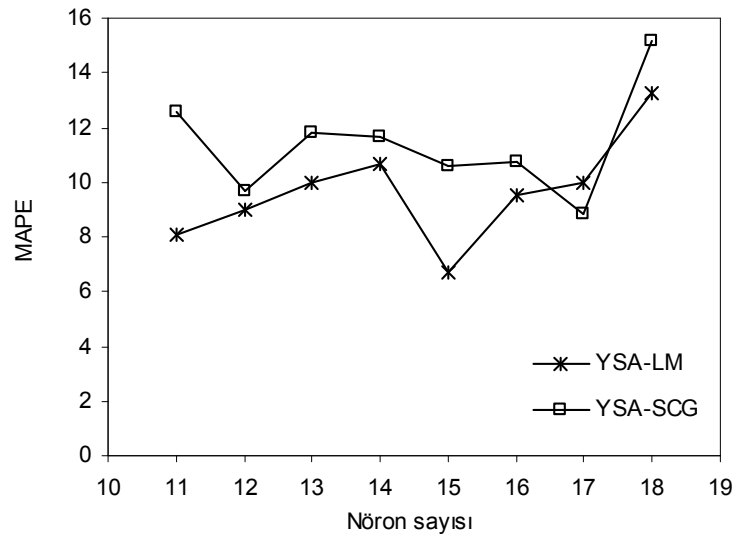
Şekil 5.156. Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-LM)

ASJ ile kesmeye ait toplam 62 verinin 9 tanesi test verileri olarak rasgele seçilmiştir. Seçilen bu veriler önce LM, daha sonra SCG algoritmasında eğitilerek YSA ağı oluşturulmuştur. YSA değerleriyle gerçek veriler arasında her iki algoritma için elde

edilen ilişki, Şekil 5.156 ve Şekil 5.157’ de gösterilmiştir. Gerçek verilerle YSA değerleri karşılaştırıldığında, LM eğitim algoritmasının SCG’ ye göre çok daha başarılı olduğu açıkça görülmektedir.

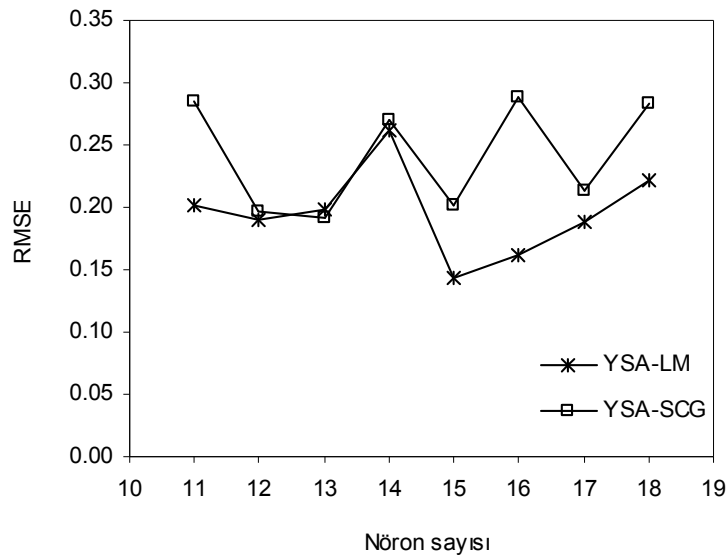


Şekil 5.157. Kesme Hızının YSA Sonuçlarıyla Karşılaştırılması (Test-YSA-SCG)



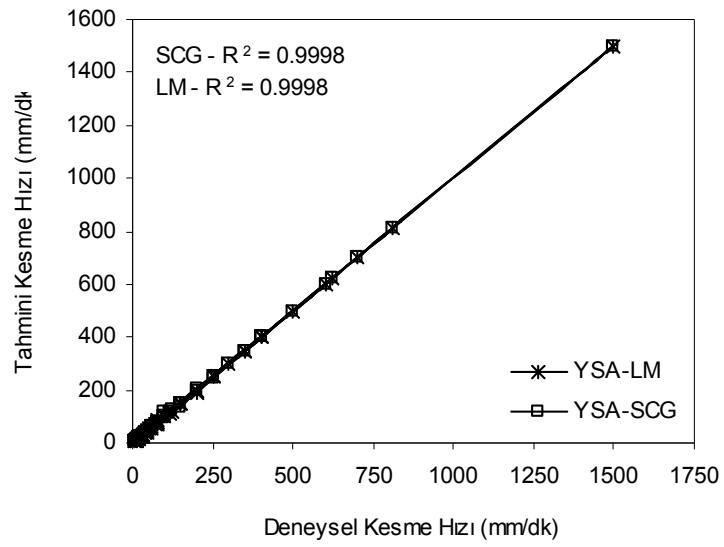
Şekil 5.158. Ortalama Mutlak Yüzde Hatanın Nöron Sayısıyla Değişimi (MAPE-Test)

ASJ ile kesme için oluşturulan YSA sisteminde, en iyi ağ yapısındaki nöron sayılarıyla ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) arasındaki ilişki, Şekil 4.158’ de verilmiştir. Oluşturulan en iyi ağ yapısında, LM eğitim algoritması için 15 nöronunda, SCG eğitim algoritmasında ise 17 nöron sayısında, MAPE değerinin minimum olduğu Şekil 5.158’ de açıkça görülmektedir. Bu sonuçlar, rasgele seçilen test değerleri için geçerlidir.

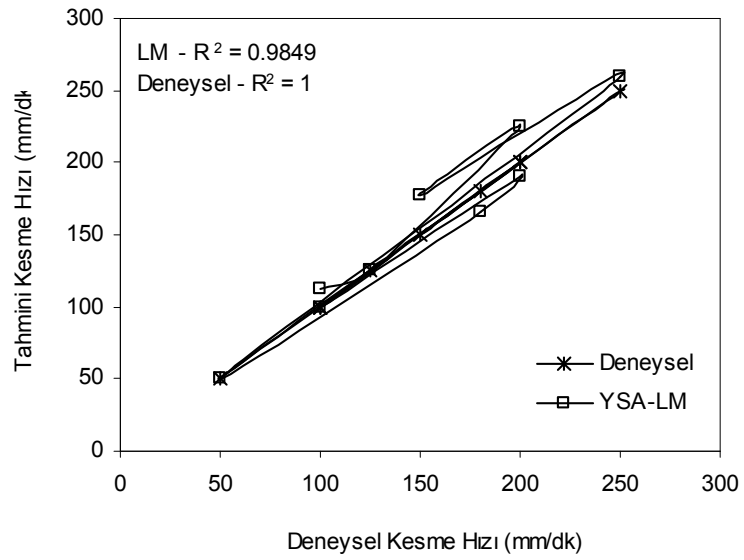


Şekil 5.159. Ortalama Hata Kareleri Kökünün Nöron Sayısıyla Değişimi (RMSE–Test)

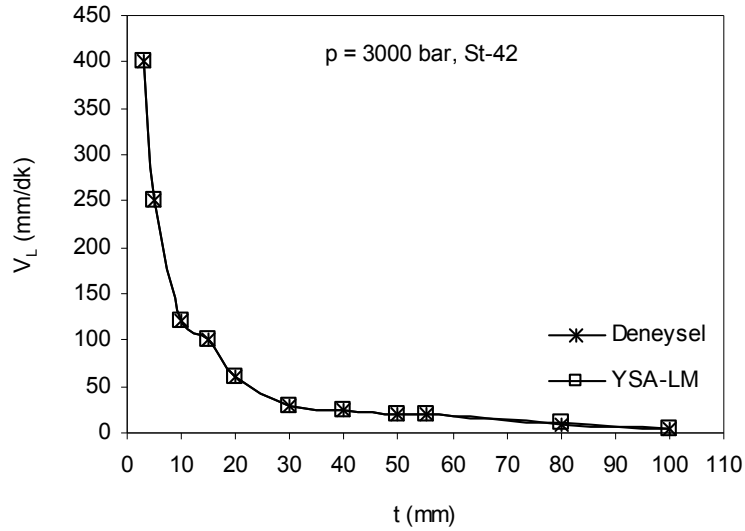
Test değerleri dikkate alınarak elde edilen Nöron sayısı – RMSE arasındaki ilişki, Şekil 5.159’ da görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, ortalama hata kareleri kökü (RMSE), LM için 15 nöronunda, SCG için 13 nöronunda optimum değere ulaşmaktadır. Bir başka deyişle en küçük RMSE değerinde minimum hata elde edilmektedir. Şekil 5.160 ve Şekil 5.161’ de sırasıyla eğitim ve test değerleri için korelasyon katsayısının değişimi gösterilmiştir. YSA değerlerindeki ortalama mutlak hatanın minimum değerinde $R^2 = 1$ ’e yaklaşır. Şekilden de anlaşıldığı gibi, eğitim ve test değerlerindeki hata sırayla, LM için % 0,14 – % 6,66 arasında değişirken, SCG için % 1,81 – % 8,87 arasında değişmektedir.



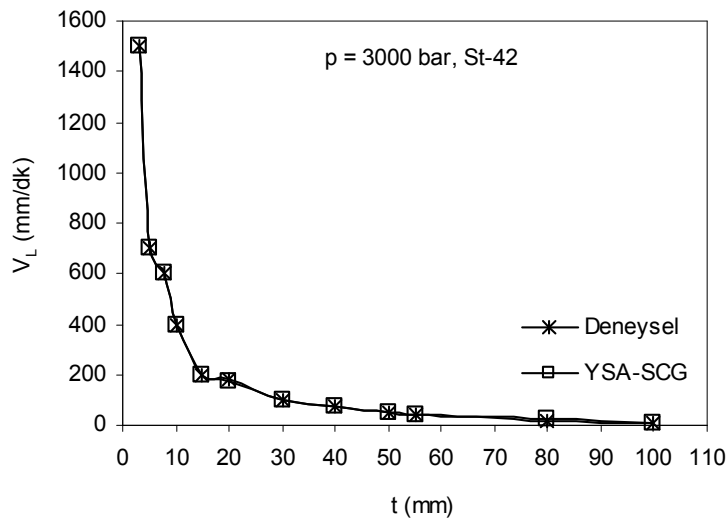
Şekil 5.160. Korelasyon Katsayının Değişimi (R^2 – Eğitim – YSA)



Şekil 5.161. Korelasyon Katsayının Değişimi (R^2 – Test – LM)

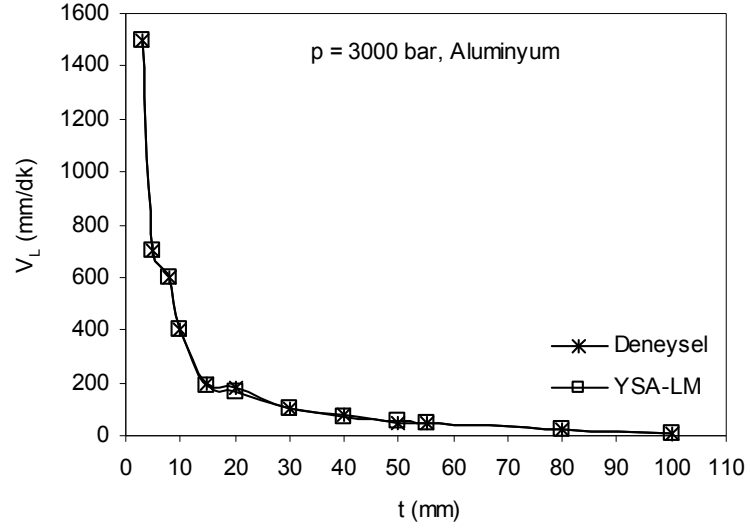


Şekil 5.162. Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 3000 bar, YSA-LM)

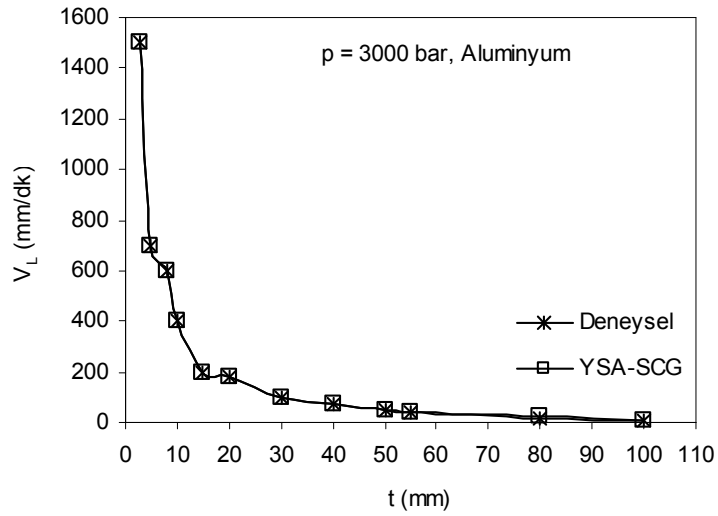


Şekil 5.163. Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 3000 bar, YSA-SCG)

Sabit çalışma basıncında (3000 bar) kesilen farklı kalınlıktaki St-42 için elde edilen YSA sonuçları Şekil 5.162 ve Şekil 5.163'de gösterilmiştir. Kesme hızının kalınlığa göre değişimi, LM ve SCG algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritma için elde edilen verilerin gerçek değerlerle çakışması, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini göstermektedir.

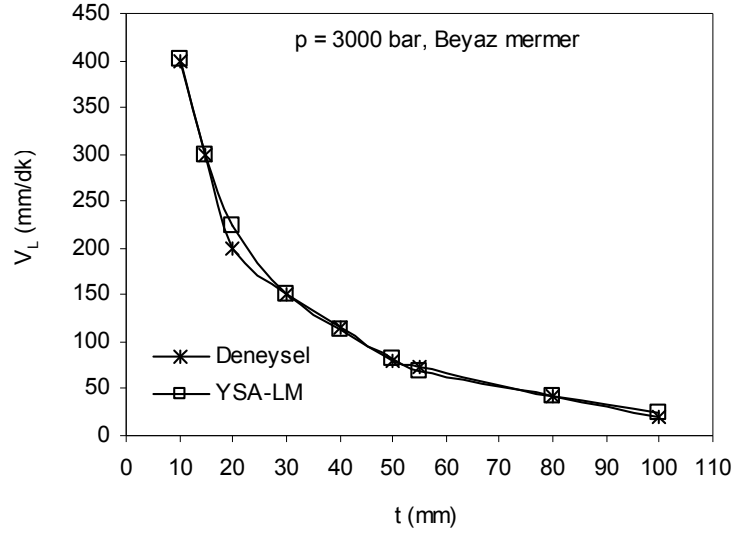


Şekil 5.164. Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 3000 bar, YSA-LM)

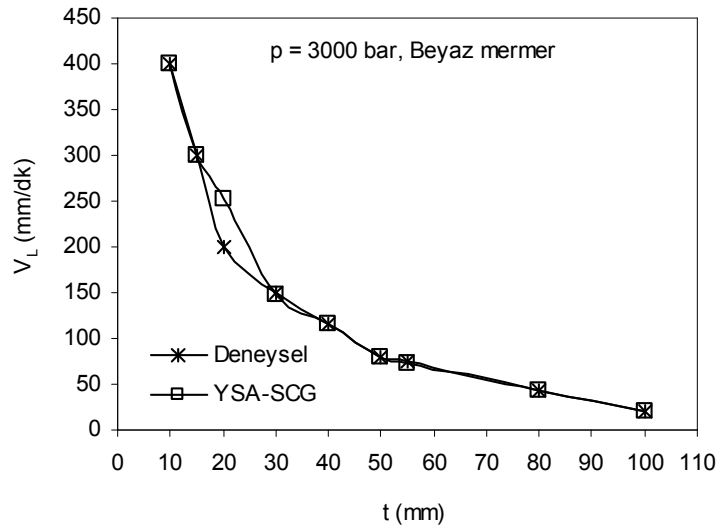


Şekil 5.165. Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 3000 bar, YSA-SCG)

Sabit çalışma basıncında (3000 bar) kesilen farklı kalınlıktaki alüminyum için elde edilen YSA sonuçları Şekil 5.164 ve Şekil 5.165’de gösterilmiştir. Kesme hızının kalınlığa göre değişimi, LM ve SCG algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritma için elde edilen verilerin gerçek değerlerle çakışması, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini göstermektedir.

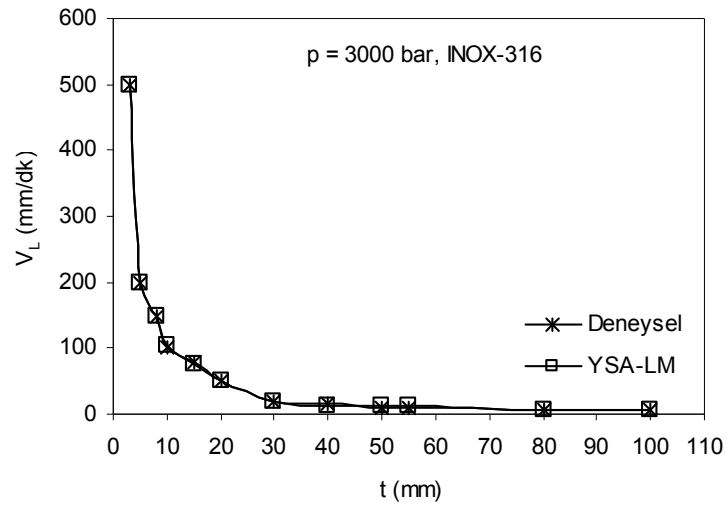


Şekil 5.166. Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 3000 bar, YSA-LM)

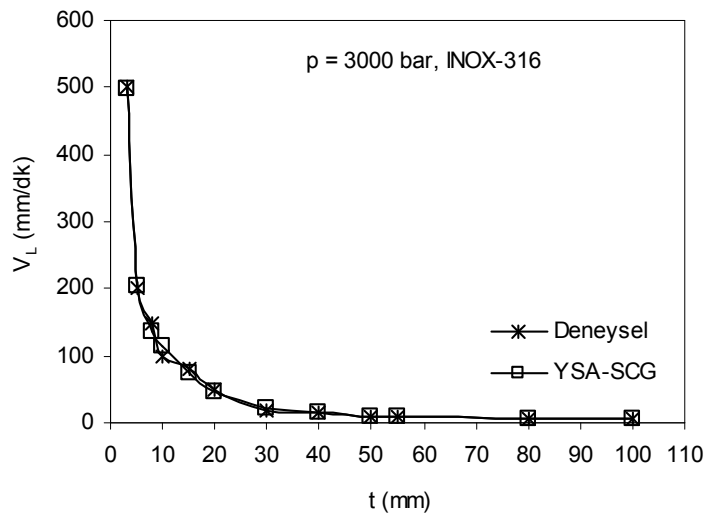


Şekil 5.167. Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 3000 bar, YSA-SCG)

Sabit çalışma basıncında (3000 bar) kesilen farklı kalınlıktaki Beyaz mermer için elde edilen YSA sonuçları Şekil 5.166 ve Şekil 5.167'de gösterilmiştir. Kesme hızının kalınlığa göre değişimi, LM ve SCG algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritma için elde edilen verilerin gerçek değerlerle çakışması, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini göstermektedir.

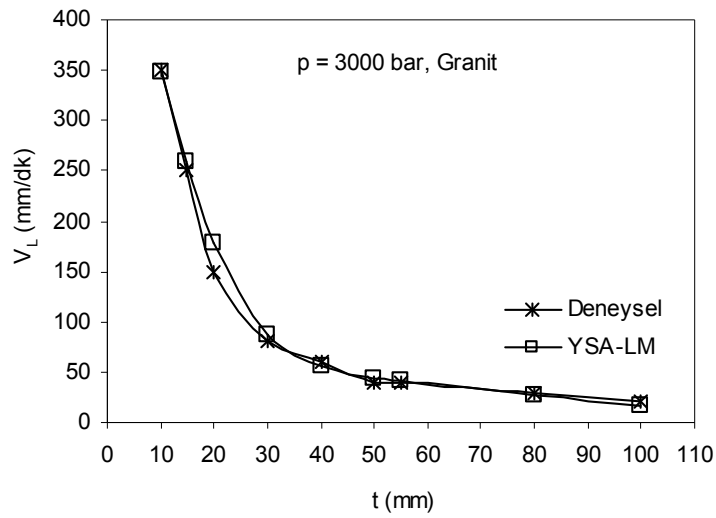


Şekil 5.168. Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi ($p = 3000$ bar, YSA-LM)

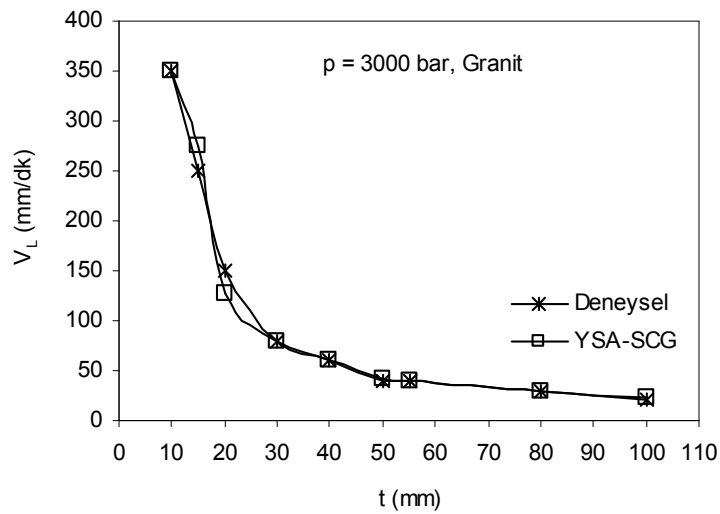


Şekil 5.169. Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi ($p = 3000$ bar, YSA-SCG)

Sabit çalışma basıncında (3000 bar) kesilen farklı kalınlıktaki INOX-316 için elde edilen YSA sonuçları Şekil 5.168 ve Şekil 5.169'da gösterilmiştir. Kesme hızının kalınlığa göre değişimi, LM ve SCG algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritma için elde edilen verilerin gerçek değerlerle çakışması, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini göstermektedir.

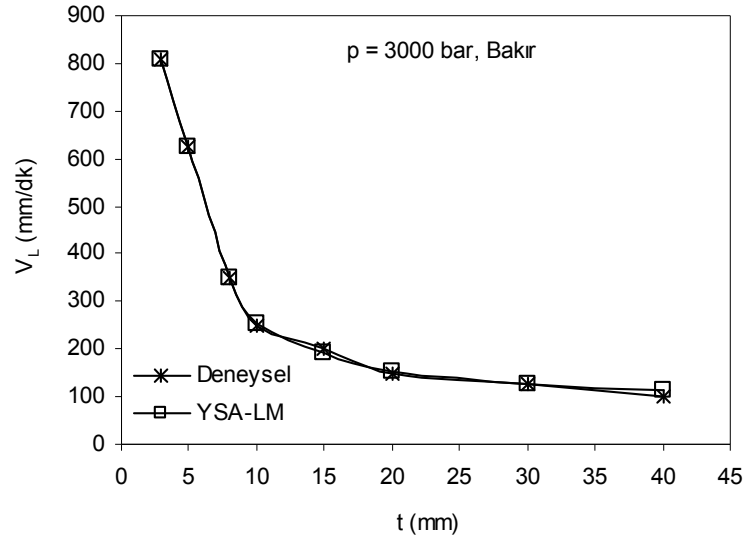


Şekil 5.170. Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 3000 bar, YSA-LM)

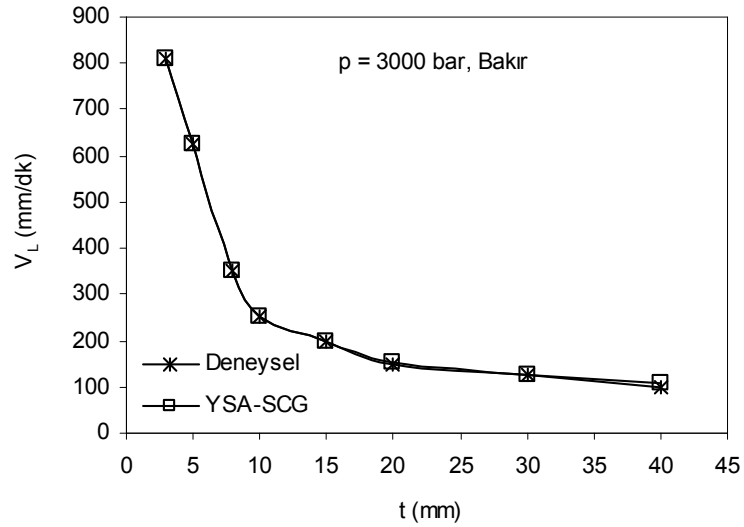


Şekil 5.171. Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 3000 bar, YSA-SCG)

Sabit çalışma basıncında (3000 bar) kesilen farklı kalınlıktaki granit için elde edilen YSA sonuçları Şekil 5.170 ve Şekil 5.171'de gösterilmiştir. Kesme hızının kalınlığa göre değişimi, LM ve SCG algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritma için elde edilen verilerin gerçek değerlerle çakışması, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini göstermektedir.



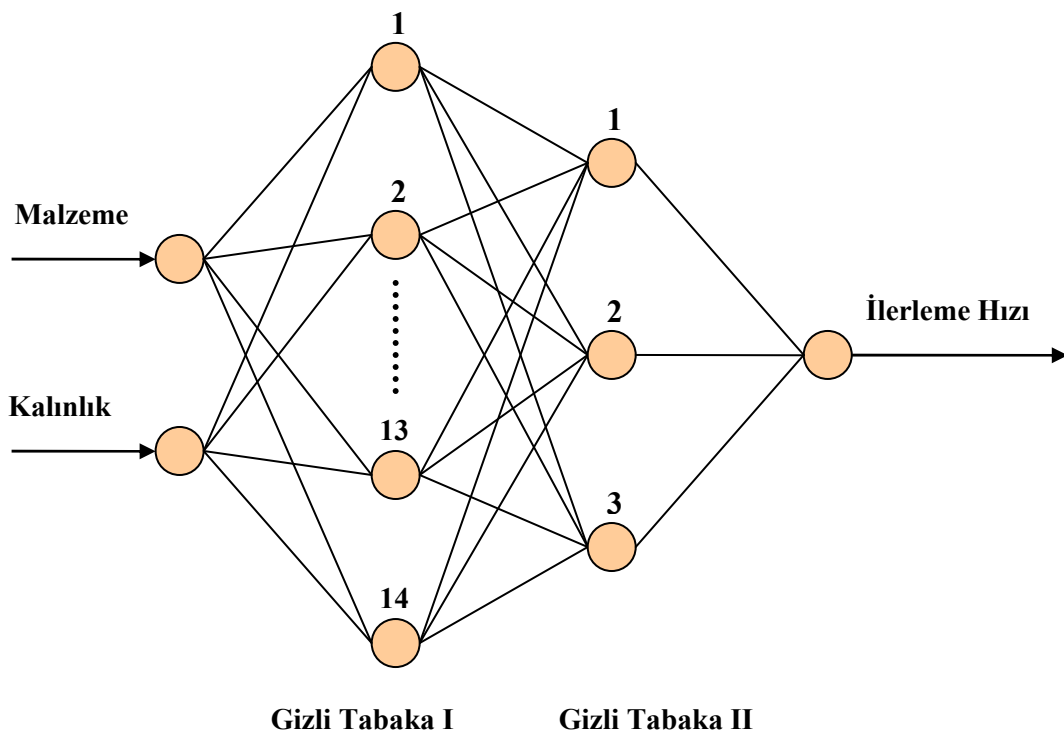
Şekil 5.172. Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 3000 bar, YSA-LM)



Şekil 5.173. Kesme Hızının Kalınlığa göre Değişimi (p = 3000 bar, YSA-SCG)

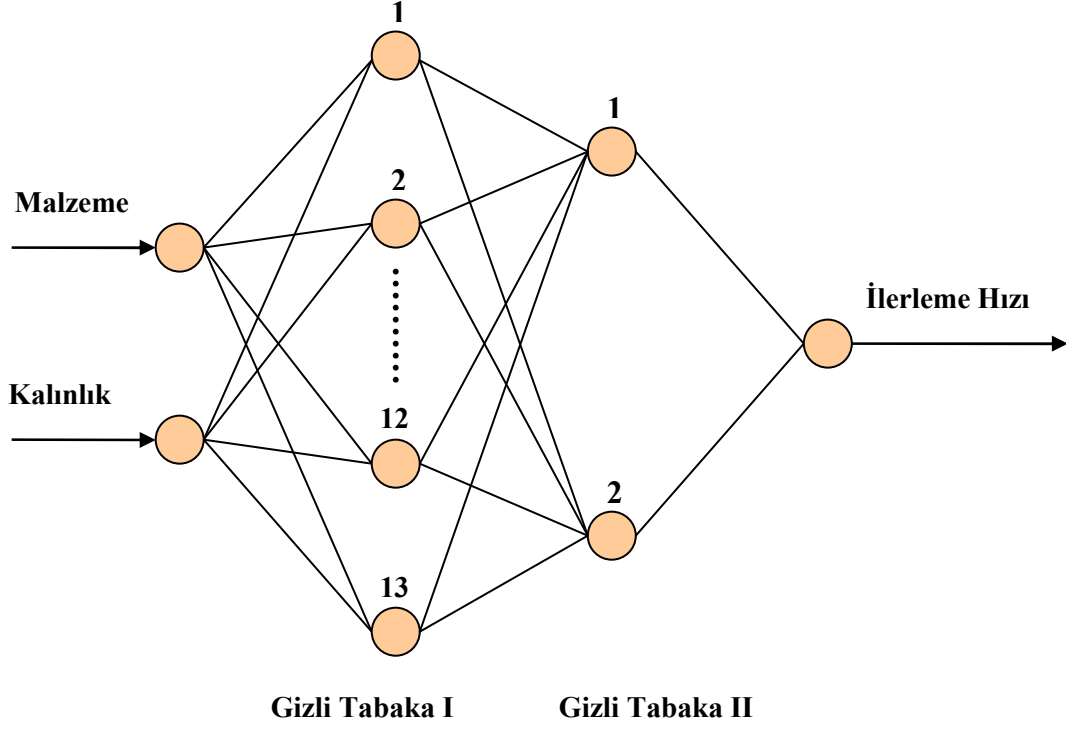
Sabit çalışma basıncında (3000 bar) kesilen farklı kalınlıktaki bakır için elde edilen YSA sonuçları Şekil 5.172 ve Şekil 5.173’de gösterilmiştir. Kesme hızının kalınlığa göre değişimi, LM ve SCG algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki algoritma için elde edilen verilerin gerçek değerlerle çakışması, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini göstermektedir.

MAJET (İkitelli-İstanbul) firmasında yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerin LM ve SCG eğitiminde elde edilen en ideal yapay sinir ağı ve nöron sayısı Şekil 5.174 ve Şekil 5.175’ de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere iki girişli tek çıkışlı ve çift gizli katmana sahip yapay sinir ağının, en ideal öğrenme için gerekli nöron sayısı SCG eğitim algoritmasında 17 (14+3) iken, LM eğitim algoritmasında 15 (13+2) olarak bulunmuştur.

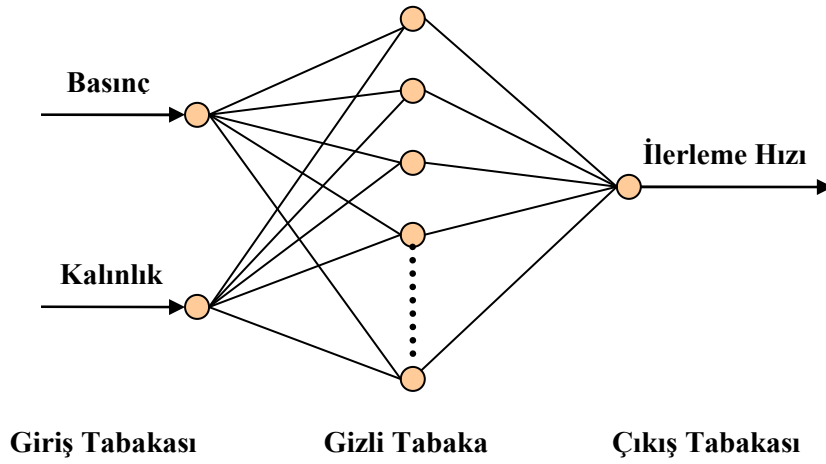


Şekil 5.174 En İyi Ağ Yapısı [2-14-3-1] ve Nöron Sayısı (YSA-SCG)

Bölüm 5.4’ de incelenen ve literatürde mevcut olan aşındırıcı su jetiyle hassas kesme için, farklı kalınlıktaki çeşitli malzemelere ait gerçek (ampirik) değerlerin (Omax, 2005), farklı öğrenme algoritmalarında eğitilmesiyle elde edilen en ideal yapay sinir ağı mimarisi ve nöron sayısı, bir başka deyişle, en ideal öğrenme için gerekli yapay sinir ağı dizilişi ve nöron sayısı Şekil 5.176’ da gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, modellenen yapay sinir ağı iki girişli, tek çıkışlı ve tek gizli katmana sahiptir.



Şekil 5.175. En İyi Ağ Yapısı [2-13-2-1] ve Nöron Sayısı (YSA-LM)



Şekil 4.176. En İyi Ağ Yapısı [2-5-1] ve Nöron Sayısı (YSA-LM-SCG)

6. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada, çok iyi eğitilmiş bir YSA modeliyle elde edilen değerler ile ampirik veriler karşılaştırılmış ve mükemmel sonuçlar bulunmuştur. Yapay sinir ağları yönteminde, en iyi ve hızlı öğrenen algoritma tipinin LM (Levenberg-Marquadt) olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada da; tüm malzemelere ilişkin veriler dikkate alındığında, LM eğitim algoritmasıyla eğitilerek elde edilen en ideal ağ sistemine ait test değerlerinin % 3,381 ortalama mutlak hatayla yani % 96,618 doğrulukla elde edilmiş olması, bu bilginin gerçekliğini bir kere daha ispatlamıştır. LM algoritmasıyla eğitilen verilere ait, korelasyon katsayısındaki ortalama yüzde değişim (R^2), 0,9853 ve ortalama karekökteki yüzde hata (RMSE) değeri 0,0313 olarak hesaplanmıştır. SCG (Scaled conjugate gradient backpropagation) algoritmasıyla eğitilen aynı verilerin test değerleri % 12,668 ortalama mutlak hatayla yani % 87,331 doğruluk yüzdesiyle elde edilmiştir. SCG algoritmasıyla eğitilen verilere ait, korelasyon katsayısındaki ortalama yüzde değişim (R^2), 0,9749 ve ortalama karekökteki yüzde hata (RMSE) değeri 0,0572 olarak hesaplanmıştır. Yapılan modellemede her iki algoritma tipi incelendiğinde, test değerlerindeki ortalama mutlak hatanın (MAPE) % 8,024, korelasyon katsayısındaki ortalama yüzde değişimin (R^2), 0,9801 ve ortalama karekökteki yüzde hata (RMSE) değerinin 0,0443 olarak bulunması, bu çalışmada kullanılan YSA modelinin doğruluk yüzdesi ile eğitim performansının çok yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca, özellikle YSA ile test edilen verilerdeki ortalama yüzde hatalar (MAPE-RMSE- R^2) arasındaki değişimin, son derece uyumlu olduğu da verilen çizelgelerde görülmektedir. Bir başka deyişle, ortalama mutlak hatanın düşmesiyle, ortalama karekökteki yüzde hata da azalmakta, fakat buna karşılık korelasyon katsayısındaki değişim yüzdesi artmaktadır. Burada kullanılan YSA modeli yardımıyla, bu çalışmada yer alan herhangi bir malzemenin, istenilen basınçta ve kalınlıktaki ilerleme değerlerini sırasıyla SCG ve LM algoritmalarında eğiterek, % 87,331 ~ % 96,618 doğruluk yüzdesiyle tahmin etmek mümkün olacaktır. İlerleme değerlerinin tahmin edilmesi demek, kesilecek malzeme yüzeyi kalitesinin de bilinmesi anlamına gelir. Bilindiği üzere, aşındırıcı su jetiyle kesme işleminde ilerleme hızı arttıkça, yüzeyde meydana gelen çizikler ve buna bağlı olarak, yüzey pürüzlülüğü değerleri de artmakta, yani yüzey kalitesi azalmaktadır. Bu modellemede ayrıca nozul çapı, karıştırma tüpü çapı ve aşındırıcı kütleli debisine ait

değerler değiştirilerek, bunlara karşılık gelen su basıncı ve malzeme kalınlıkları da, yine çok iyi sonuçlar verecek şekilde tahmin edilebilir.

MAJET (İkitelli-İstanbul) firmasında yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler, LM ve SCG eğitim algoritmalarında eğitilmiştir. Eğitim sonucunda elde edilen en ideal yapay sinir ağı yapısının; iki girişli, tek çıkışlı ve çift gizli katmana sahip olduğu görülmüştür. Modellenen yapay sinir ağının en iyi ve en hızlı öğrendiği nöron sayısı, SCG algoritmasında 17 (14+3); LM algoritmasında ise 15 (13+2) olarak bulunmuştur. Bilindiği üzere, tek gizli katmanla eğitimi mümkün olmayan durumlarda, eğitilecek sistemin birden fazla gizli tabakaya bölünerek oluşturulan YSA' daki ortalama mutlak hata yüzdesi hızla düşmektedir.

Çizelge 5.13' de gösterildiği gibi, çok katmanlı yapay sinir ağı için öngörülen nöron sayısı, her iki transfer fonksiyonu için, aynı şekilde bölünmüş ve daha sonra eğitilerek modellenmiştir. Bunun anlamı, öngörülen dağılımda modellenen YSA sisteminin son derece başarılı olduğudur. Bir başka deyişle, LM için eğitilen 15 nöron (13+2) sayısındaki sistemin, SCG için de aynı nöron dağılımında çok yakın sonuçlar bulması, elde edilen (eğitilen) YSA sisteminin son derece doğru bir şekilde öğrendiğini göstermektedir.

Yapılan deneysel çalışmada LM ile eğitilen verilerdeki test değerlerinin en iyi ağ yapısı ve nöron sayısı (13+2) için % 6,67 ortalama mutlak hatayla yani % 93,333 doğrulukla elde edilmesi, LM eğitim algoritmasının daha başarılı olduğunu bir kere daha göstermiştir. LM algoritmasıyla eğitilen verilere ait korelasyon katsayısındaki ortalama yüzde değişim (R^2), 0,992 ve ortalama karekökteki yüzde hata (RMSE) değeri 0,1441 olarak elde edilmiştir. En iyi ağ yapısı ve nöron sayısı dikkate alındığında, SCG algoritmasıyla eğitilen aynı verilerin test değerleri % 8,873 ortalama mutlak hatayla yani % 91,127 doğruluk yüzdesiyle elde edilmiştir. SCG algoritmasıyla eğitilen verilere ait korelasyon katsayısındaki ortalama yüzde değişim (R^2), 0,969 ve ortalama karekökteki yüzde hata (RMSE) değeri 0,284 olarak elde edilmiştir. Yapılan modellemede her iki algoritma tipi incelendiğinde, en iyi ağ yapısına ait test değerlerindeki ortalama mutlak hatanın (MAPE) % 7,77; korelasyon katsayısındaki

ortalama yüzde değişimin (R^2), 0,9805 ve ortalama karekökteki yüzde hatanın (RMSE) 0,214 olarak bulunması, bu çalışmada kullanılan YSA modelinin doğruluk yüzdesinin ve eğitim performansının çok yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca ortalama yüzde hataların (MAPE-RMSE- R^2) arasındaki değişimin son derece uyumlu olduğu, Çizelge 5.13' de görülmektedir. Bir başka deyişle, ortalama mutlak hatanın düşmesiyle, ortalama karekökteki yüzde hata da azalmakta iken, korelasyon katsayısındaki değişim yüzdesi artmaktadır. Buna ek olarak, Çizelge 5.16, 5.17, 5.18 ve 5.20' de görüleceği üzere, eğitim tamamlandıktan sonra oluşturulan en iyi YSA sistemine ilişkin hata değerleri, yaklaşık olarak 10^{-5} mertebesinde dir. Mevcut YSA modeli yardımıyla, bu çalışmada yer alan herhangi bir malzemenin, istenilen basınçta ve kalınlıktaki ilerleme değerlerini yüksek doğrulukta (% 91,127 ~ % 93,333) tahmin etmek mümkün olacaktır. Ayrıca, bu modellemede kullanılan nozul çapı, karıştırma tüpü çapı ve aşındırıcı kütleli debisine ait değerler değiştirilerek, su basıncı ve malzeme kalınlıkları ya da, nozul çapı, karıştırma tüpü çapı, aşındırıcı kütleli debisi, su basıncı ve malzeme kalınlıkları değiştirilerek, ilerleme hızı değerleri de yine çok yüksek doğrulukta tahmin edilebilir. Sonuç olarak bu modellemede elde edilen YSA değerleri irdelendiğinde, aşındırıcı su jetiyle malzeme kesme sisteminde, YSA uygulamalarının güvenle kullanılabilceği açıkça görülmektedir.

Yapılan deneylerde (MAJET, İstanbul), pompa basıncı değişmeksizin, malzeme kalınlığında ve ilerleme hızındaki artış, farklı malzemelerde çizik oluşumunu artırmıştır. Paslanmaz platina kesiminde görüldüğü üzere çizik oluşumu, özellikle malzeme sertliği ile daha da belirgin hale gelmiştir. Çalışmada, YSA uygulamalarının ASJ ile işlemlerde pompa basıncı, nozul çapı, malzeme kalınlığı ve ilerleme hızı vb. parametrelerin tahmin ve doğruluğunun hesaplanmasında başarıyla kullanılabilceği açıklığa kavuşturulduğu için, imalat sanayisinde kesinlikle kabul görecektir.

7. ÖNERİLER

Aşındırıcı su jetiyle çevresel kesme işlemlerinde, jetin kuyruk tarafı geometrik bozukluklara neden olabilir. Literatür çalışmalarına göre, jet çarpma açılarının yüksek değerlerinde jetteki gecikme önlenebileceğinden, aşındırıcı su jetiyle çevresel işlemede jet çarpma açısına ilişkin çalışmalar yapılabilir. Mevcut teknoloji ve makineler, böyle bir çalışmada sorun yaratabilir. Ancak kesme kafasının hareketini, manipüle ve kontrol edebilecek yeni teknolojiler yardımıyla, jet çarpma açısının yüksek değerlerinde koniklik açısını dengelemek için yapılacak tüm çalışmalara olanak sağlanacaktır. Aşındırıcı su jetiyle kesme ünitesindeki kumanda sistemlerinin, aşındırıcı toz ve nemden mutlaka korunmuş olması gerekir. Ayrıca, yataklar ve birbiri üzerine kayan diğer aşınma noktalarının da korunması şarttır. Koruma sırasında çevreden gelebilecek tozlar ve seslerin de önlenmesi gerekir. Bundan başka, jet çıkışında kullanılan yakalayıcı (tutucu) ile ilgili gelişmeler de beklenmektedir. Kesme sırasında artan esneklik ile sesteki düşüş, aranılan kriterlerdir.

Aşındırıcı su jeti modelleme yapılarak kullanılacaksa, ön görülen modelden pratikte yararlanma olanaklarını artırabilmek amacıyla, sünek ve kırılğan malzemelerle birlikte her tür malzeme üzerinde yapılan deney sayısını artırmak yararlı olacaktır. Deney sayısının artırılması sırasında, nozul tasarımının ve parçacık hızlarının etkileri de araştırılabilir. Bilindiği üzere akış katsayısı; Reynolds sayısı ve nozul çapının bir fonksiyonudur. Farklı çaplarda nozul kullanarak, çapın akış katsayısı üzerindeki etkisi araştırılmalıdır. Ayrıca akış katsayısı değerleri, farklı geometrideki nozullar (üçgen veya kare kesitli nozullar gibi) için ayrı ayrı incelenebilir. Sınır tabaka ve hız profillerinin tayininde, sapma bölgesindeki akış karakteristiklerini araştırabilmek için büyük nozul kullanılması tavsiye edilir. Sade ve aşındırıcı su jeti oluşumunu çok daha iyi anlayabilmek için, nozul içinde hız ve basınç alanlarının araştırılmasında yarar vardır. Kullanılacak modellerin geri dönüşüm bölgelerinde, üç boyutlu türbülans ve iki fazlı (su ve hava) akışın ele alınması uygun olacaktır. Daha yüksek aşındırıcı parçacık hızı elde etmek için, su-aşındırıcı karıştırma odasına ait, yeni tasarım şekillerini denemek yararlı olacaktır.

Aşındırıcı parçacıkların parçalanmaları ve dağılımlarında, çalışma parametrelerinin etkisi ile aşındırıcı su jetindeki aşındırıcı parçacıkların hız dağılımı da araştırılmalıdır. Aşındırıcı su jetinin çok sayıda özel kullanım alanı araştırılmış olup, iş parçaları ile kesme kafası arasında uygun bir bağlama aparatı olmaması nedeniyle, aşındırıcı su jetiyle işleme kapasitesi henüz tam olarak bir açıklığa kavuşmamıştır. Bu durum, detaylı olarak incelenebilir. Söz konusu bağlama aparatının pastan arınmış, jet kuvvetine karşı dirençli, aşınmaya dayanıklı ve parçayı yükleme ve alma sırasında sorun yaratmayacak şekilde olmasına özen gösterilmelidir. Aparat tasarımı, üç boyutlu işlemede hem çok önemli hem de acil ele alınması gereken bir konudur. Çalışma ortamının ses kontrolü ile birlikte, geri dönüşüm veya atık su ile aşındırıcı arasındaki ilişkinin iyileştirilmesine çalışılmalıdır. Geliştirilip uygulamaya konulan tüm bağıntıların ve sınırlayıcı değerlerin aşındırma ve işlemede, her malzeme için uluslararası kullanılabilir nitelikte olması sağlanmalıdır. Farklı malzemelerin işlenmesinde birden fazla jet kullanıldığında, iki jet arasında işlenmemiş bölgenin kalmaması için çalışmalar yapılmalıdır. Aşındırıcı su jeti nozullarının, aşınma – kesme verimleri birbirleriyle karşılaştırılarak incelenebilir. Aşınma arttıkça, aşındırıcı su jeti nozullarında kesme verimi düşecektir. Çünkü, çıkış çapı artışıyla kesme verimindeki düşüş arasında kesin bir korelasyon vardır. Bu aşamada nozul boyu, nozul çapı, giriş açısı, aşındırıcı debisi ve su basıncı etkilerinin ayrı ayrı incelemesinde yarar vardır.

Aşınma direncini tayin edecek, malzemeye ait mekanik ve metalurjik özelliklerin çok iyi tanımlanması için, talaş ve parçalanmış aşındırıcılar mikroskop yardımıyla incelenmelidir. İşlem mekaniğine bağlı olarak, aşındırıcı parçacık hızındaki kararsızlık, ciddi bir şekilde kullanımı sınırlayacağından, aşındırıcı parçacık hızının tayininde, nozulda gerçekleşen olayı daha iyi anlayabilmek için, çok daha detaylı çalışmaların yapılması tavsiye edilir. Bu tür incelemelerde, üç fazlı akışın (su damlacıkları, aşındırıcı parçacıklar ve hava) etkisi de ele alınmalıdır. Yüksek hızdaki jetin kararlılığında, atmosferik yoğunluğun etkisi ayrı bir araştırma konusu olabilir. İyi tasarlanmış bir vakum odasında, ortam basıncı değiştirilerek deney sayısı artırılabilir. Bunların yanı sıra, su jetine ait başlangıç (veya giriş) debisinin, performans üzerinde yapabileceği etkiler de incelenebilir. Ayrıca en ideal jet performansı için, uygun jet ve aşındırıcı parametreleri seçilerek, su ve parçacık analizi yapılmalıdır. Aşındırıcı su

jetine ait yörüngenin iş parçasıyla temasından önce, teması sırasında ve temas sonrasında çok daha iyi irdelenebilmesi için, üç boyutlu gözleme dayalı çalışmaların yapılması tavsiye edilir. Bu çalışmaların yapılabilmesi için, yüksek kapasiteli ve yüksek hızda resim kaydı yapabilen kamera kullanılmalıdır. Aşındırıcı su jeti kullanılarak, başta seramikler olmak üzere her tür çelik, kompozit, cam, mermer, granit ve birçok sayıda malzemenin kolaylıkla işlenebilmesi mümkündür.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Anderson, D. and McNeil, 1992, Artificial neural networks technology, Data & Analysis Center for Software.

Altıntaş, E.,2005, Yapay sinir ağları ve tanıma sistemleri, www.yapay-zeka.org.

Arasawa, H., 1986, controlled cutting of concrete structure with abrasive water jet, Proc. of 8th International Symposium on Water Jet Cutting Technology, Durham, England, Sept. 9-11, 211-218.

Arndt, R.E.A., 1981, Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures, ann. Rev. Fluid Mech.,13,273-328.

Barker, C. R., M. Mazurkiewicz, 1982, Evaluation of an abrasive cleaning system, Proc. of International Symposium on Water Jet Cutting Technology, Cranfield, England, April 6-8, 429-446.

Barton, R.E.P., and Saunders, D.A., 1982, WJ/AWJ cutting of concrete and reinforced concrete, Proc. of the 6th Int. Symp. on Jet Cutting Techn., BHRA Fluid Eng., Cranfield, 489-502.

Baumann, L., 1986, Fundamental investigation into the improvement of water jet performance by the use of abrasive additives, Proc. of 8th Int. Symp. on Water Jet Cutting Techn., Durham, Sept. 9-11, 277-285.

Becker, R., and Gray, G. M., 1992, Evaluation of a water jet cutting systems for slicing potatoes. Journal of Food Science, 57, (1).

Berkeley Chemical Research Inc., 2001, USA.

Bitter, J.G.A., 1963a, A study of erosion phenomenon–Part I., Wear, 6, 5-21.

Bitter, J.G.A., 1963b, A study of erosion phenomenon–Part II., Wear, 6, 69-190.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Blickwedel, H., Guo N.S., 1990, Haferkamp H., Louis H., Prediction of abrasive jet cutting efficiency and quality, Proc. of 10th Int. Symp. on Jet Cutting Techn., the Netherlands, 163-180.

Boride products Inc., 1996, USA.

Buhlmann, S., 1970, ein Stochastisches Model der Prallzerkleinerung. Chemie-Ing. Technik, 42 277-281.

Burnham, C. D., 1990, Abrasive waterjets come of age, Machine Design.

Chao, J., and Geskin E., 1993, Experimental study of striation formation and spectral analysis of the AWJ generated surfaces, Proc. of the 7th U.S Waterjet Conf., 1, 27-41.

Chen, F.L., and Siores E., 2001, The effect of cutting jet variation on striation formation in abrasive water jet cutting, Int. J. Mach. Tools Manuf. 41, (10), 1479-1486.

Chen, W.L., and Geskin, E.S., 1991, Measurements of the velocity of AWJ by the use of laser transit anemometer, Jet Cutting Techn., Elsevier Sci. Public., London, 23-36.

Clark, H.M., and Burmeister, L.C., 1992, The influence of the squeeze film on particle impact velocities in erosion. International Journal of Impact Engineering, 3, 415-426.

Claude, X., Merlen, A., They, B., and Gatti, O., 1998, Abrasive waterjet velocity measurements, Louis H. (Ed.), Jetting Technology, 235-251.

Clements, M.P. and Hendry, D.F., 1993, On the limitations of comparing mean squared forecast errors, Journal of Forecasting, 12, 617-638.

Cox, E.P., 1927, A method of assigning numerical and percentage values to the degree of roundness, Journal of Paleontology, 1, 179-183.

Curnham, J., Reuber M. and Kim T.J., 1989, Force control of surface finish in abrasive waterjet cutting, PED (41), 31-36.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Davies, T.W., Jackson, M.K., 1981, Optimum conditions for the hydraulic mining of China Clay, Proceedings 1stUS Water Jet Symposium, 4/1-4/16.
- Deam, R.T., Lemma E. and Ahmed D.H., 2004, Modelling of the AWJ cutting process, *Wear*, 257,(9-10), 877-891.
- Decker, B., Haferkamp H., and Louis H., 1988, Schneiden Hochdruckwasserstrahlen (Cutting with high-pressure waterjets), *Kunststoffe* 78, 34-40.
- Dickey, D. and Fuller, W.A., 1979, Distribution of the estimates for autoregressive time series with a unit root, *J. of American Statistical Association*, 74, 427-431.
- Diebold, F.X. and Mariano, 1995, Comparing predictive accuracy, *Journal of Business and Economic Statistics*, 13, 253-264.
- Doty, P.A., Groves, K.O., and Mort, G., 1989, Composite Carbides-A new class of wear materials from ROC Process, 1st Int. Ceramic Scie. and Tech. Cong., Anaheim, CA.
- Dubbel, 1998, Taschenbuch für den Maschinenbau (Manual Mechanical Engineering), 13th ed., Springer, Berlin.
- Eddingfield, D.L., and Trinh, V.D., 1980, A preliminary study of coal comminution with a high velocity water jet, 5th Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Fluid Eng. E1, 251 p.
- Elman, J., 1990, Finding structure in time cognitive science, 14, 179–211.
- Erdmann, J.F., Hassan, A. M. and Louis H., 1976, A study of the oscillations effects on the cleaning and cutting efficiency of high speed water jet, Proc. 3rd Int. Jet Cutting Techn. Symp., BHRA, Paper C3.
- Fairhust, R.M., 1992, DIAJET—a new abrasive-waterjet cutting technique, Proc. of 8th Int. Symp. on Jet Cutting Techn., UK, 395-402.
- Finnie, I., 1958, The mechanism of erosion of ductile metals, Proc. of the 3rd US National Congress of Applied Mechanics, ASME, New York, 527-532.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Finnie, I., 1960, Erosion of surfaces by solid particles, *Wear*, 3, 87-103.

Franz, N.C., 1972, Fluid additives for improving high velocity jet cutting, *Proc. of the 1st Int. Symp. on Jet Cutting Techn.*, England, A7-93/A7-104.

Galecki, G., Mazurkiewicz, M., 1987, Hydroabrasive cutting head–energy transfer efficiency, *Proc. 4th US Water Jet Conference*, ASME, New York, 109-111.

Griffiths, et al., 1983, Abrasive injection usage in United Kingdom, *Proc. of 2nd U.S. Water Jet Conference*, May 24-26, 423-432.

Gropetti, R., Gutema, T., and Lucchio, A.D., 1998, A contribution to the analysis of some kerf quality attributes for precision AWJ cutting, *Proc. of the 14th Int. Conf. on Jetting Technology*, Belgium, 253-269.

Grossberg, S. and Carpenter, G.A., 1995, A neural network architecture for autonomous learning, recognition and prediction in a nonstationary world, 465-482.

Guo, N.S., et al., 1987, Surface structure and kerf geometry in AWJ cutting formation and optimization, *Proc. of 4th U.S.A Water Jet Conference*.

Guo et al., 1990, Recycling capacity of abrasives in AWJ cutting *Proc. of 9th Int. Conf. on Jetting Techn.*, BHR Group Limford, Dordrecht, Netherland.

Guo, N.S., Louis, H., and Meier, G., 1993, Surface structure and kerf geometry in AWJ: formation and optimisation, *Proc. of 7th American Waterjet Conference*, USA, 1-26.

Guo, N.S., Louis, H., Meier, G. et al., 1994, Abrasive water jet cutting-methods to calculate cutting performance and cutting efficiency, *Rakowsski Z (ed.), Geomechanics 93*, A.A.Baldema, Rotterdam, 291-299.

Guo, N.S., 1994, Schneidprozeß und Schnittqualität beim Wasserabrasivstrahlschneiden. *VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 2, Nr 328*.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Gülseçen, S., 1993, Yapay sinir ağları işletme alanında uygulanması ve bir örnek çalışma, Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi.

Hashish, M., 1977, Theoretical and experimental investigation of high velocity waterjet cutting, Ph.D. Thesis, Concordia University, Montreal, Canada.

Hashish, M., and Duplessis, M. P., 1978, Theoretical and experimental investigation of continuous jet penetration of solid, J.of Eng.for Industry, ASME Trans., 100, 88-94.

Hashish, M., and Duplessis, M. P., 1979, Prediction equations relating high velocity jet cutting performance to stand-off distance and multipasses, J. Eng. Ind.,101, 311-318.

Hashish, M., 1982, Steel cutting with abrasive waterjets, Proc. of the 6th Int. Symp. on Jet Cutting Techn., BHRA, The Univ. of Surry, U.K., 465-487.

Hashish, M., 1983, Experimental studies of cutting with abrasive water jets, Proc. of the 2nd U.S. Water Jet Symp., Rolla, Missouri, p 379.

Hashish, M., et al., 1984, Abrasive fluid jet system (USA Patent No: 5643058).

Hashish, M., 1984a, A modeling study of metal cutting with AWJ, J. Eng.Mat., 106, 88-100.

Hashish, M., 1984b, Cutting with abrasive waterjets, Mechanical Engineering, 60-69.

Hashish, M., 1984c, On the modeling of abrasive waterjet cutting, Proc. of the 7th Int. Symp. on Jet Cutting Techn., Ottawa, Canada, 249-265.

Hashish, M., 1986, Aspects of abrasive-waterjet (AWJ) performance optimization, Proc. of the 8th Int. Symp. on Jet Cutting Techn., BHRA, Durham, England, 297-308.

Hashish, M., 1987a, An improved model of erosion by solid particle impact, Proc. of the 7th Int. Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, UK, 66-1/66-9.

Hashish, M., 1987b, Turning with AWJ—a first investigation, J. Eng. Ind., 109, 281-290.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hashish, M., 1988, Visualisation of surfaces machined with abrasive-waterjet cutting process, *Experimental Mechanics*, 28, (2), 159-168.
- Hashish, M., 1989a, A model for abrasive water jet machining, *J. Eng. Mater. Technol.*, 111, 154-162.
- Hashish, M., 1989b, Pressure effects in abrasive waterjet (AWJ) machining, *Journal of Eng. Materials and Techn.*, ASME, 111, 221-228.
- Hashish, M., 1991a, Advances in abrasive waterjet machining, *Proceedings of the 1st Asian Conference on Recent Advances in Jetting Technology*, Singapore, 43-60.
- Hashish, M., 1991b, Characteristics of surfaces machined with abrasive-waterjet, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 113, 354-362.
- Hashish, M., 1991c, Optimisation factors in AWJ machining, *J. of Eng. Ind.*, 113, 29-37.
- Hashish, M., 1993, Prediction models for AWJ machining operation, *Proc. of 7th American Waterjet Conference*, USA, 205-209.
- Hashish, M., and Du Plessis M.P., 1979, Prediction equations relating high velocity jet cutting performance to stand-off-distance and multipasses, *Trans. ASME, J. Engng. Ind.*, 101, 311-318.
- Hashish, M., Monserud D.O., Bondurant, P.D. et al., 1993, A new AWJ nozzle for automated and intelligent machining, *Proc. of the 7th USA WJ Conf.*, USA, 2, 829-842.
- Haykin, S., 1999, *Neural Networks A Comprehensive Foundation*, Prentice Hall Int., Inc.
- Heston, T., 1998, *Metalforming*, 22 Fabricating and Metarkin, October fan dmmag.com.
- Himmelreich, U., 1992, *Fluiddynamische modelluntersuchungen an wasserabrasivstrahlen*. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 7, Nr 219.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Himmelreich, U., Rieß W., 1991, Laser-velicometry investigations of the flow in AWJ with varying cutting head geometry, Proc. 6th USA WJ Conf., 355-369.

Hunt, D.C., Burnham, C.D., and Kim, T.J., 1987, Surface finish characterisation in machining advanced ceramics by AWJ, Proc. of 4th USA WJ Conf., 169-174.

Hutchings, I.M. and Levy, A.V., 1989, Thermal effects in the erosion of ductile metals, *Wear*, 131, 105-131.

Hutchings, I.M., 1979a, Energy absorbed by elastic waves during plastic impact, *Journal of Physics, D: Applied Physics.*, 12, 1819-1824.

Hutchings, I.M., 1979b, Mechanisms of the erosion of a metals by solid particles, *Erosion: Prevention and Useful Applications*, ASTM STP 664, W. F. Alder, Ed., 59-76.

Iioshi, S., Nakao, K., and Torii, K., 1986, Preliminary study on AWJ assist Roadheader, Proc. of the 8th Int. Symp. of Jet Cutting Techn., BHRA Fluid Eng., Cranfield, 71-77.

Jablonowski, J., et al., 1989, editor-in-chief. Reduced nozzle wear in AWJ, *American Machinist*.

Jablonowski, J., et al., 1990, Performance comparision four waterjet nozzles SME Technical paper MR90–535.

Johnson, V.E., Jr., Thiruvengadam, A., and HI, R.E., 1968, Rock tunneling with high-speed water utilizing cavitation damage, *ASME*, (8), FE-42.

Kalpakjan S., 1995, *Manufacturing engineering and technology*, Addison Wesley, USA.

Kim, T. J., et al., 1985, Piercing and cutting ceramics by AWJ, *Int. Symp. on Machining of Ceramic Materials and Components*, ASME, Proc. PED (17), December, 19-24.

Kovacevic, R., and Chen, G., 1989, A workpiece reactive force as a parameter for monitoring the nozzle wear in turning operation with AWJ, *PED*, 41, 43-49.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Kovacevic, R., and Beardsley, H., 1990, On-line monitoring the quality of the surface cut by the abrasive water jet, SME TP MR90-535, 1-10.

Kovacevic, R., Liaw, H.H., Barrows, J.F., 1988, Surface finish and its relationship to cutting parameters, SME TP MR88-589, Society of Manuf. Eng., Dearborn, 1-5.

Kovacevic, R., Mohan, R., and Beardsley, H., 1996, Monitoring of thermal energy distribution in AWJ cutting using infrared thermography, J. Eng. Ind., 118, 555-563.

Kovacevic, R., Mohan, R., and Zhang, Y.M., 1995, Cutting force dynamics as a tool for surface profile monitoring in AWJ, ASME J. Eng. Ind., 117, 340-350.

Kovacevic, R., Yong, Z., 1996, Modeling of 3D AWJ machining, Proc. of the 13th Int. Conf. on Jet. Tech., 73-82.

Kovacevic, R., and Fang, M., 1994, Modeling of the influence of the AWJ cutting parameters on the depth of cut based on fuzzy rules, J. Mach. T. Manuf., 34, (1), 55-72.

Kramer, A.H. and Sangiovanni-Vincentelli, A., 1989, Efficient paralel learning algorithms for neural networks, Advances in neural information process. syst., 1, 40-48.

Kulekci, M.K. and Güray, A., 2000, Endüstriyel malzemeleri keserek şekillendirmede su jeti uygulamaları, 8. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli, Turkey, 85-93.

Kulekci, M.K., 2002, Processes and apparatus developments in industrial WJ applications, Int. J. of Mach. Tools & Manuf., 42, 1297-1306.

Labus, D.A., High pressure equipment and systems, 1991, WJTA, St Louis, MO, USA.

Laurinat, A., Louis, H. and Tebbing, G., 1992, Premixed abrasive water jets-the influence of important parameter, Jet Cutting Techn., Dordrecht, 577-591.

Leach, S. J. and Walker, G. L., 1966, The application of high speed liquid jets to cutting: Some aspects of rock cutting by high speed WJ, Phil.Trans.(A)., 260, 295-303.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Lemma, E., Chen, L., Siores, E., Wang, J., 2002, Optimising the AWJ cutting process of ductile materials using nozzle oscillation technique, *J. Mach. T. Manuf.* 42 (7), 781-789.

Leslie, E.N., 1976, Application of the water jet to automated cutting in shoe industry, 3rd Int. Symp. on Jet Cutting Techn., BHRA Fluid Eng., Cranfield, U.K., F3-23.

Leu, M.C., et al., 1998, Mathematical modeling and experimental verification of stationary waterjet claning process. *Trans. ASME, J.Manuf. Sci.Eng.*,120, 571-579.

Levy, A.V., et al., 1987, Erosion of steel in coal solvent slurries, *Wear*, 117, 115-127.

Levy, Alan, V., and Chik, P., 1983, The effects of erodent composition and shape on the erosion of steel, *Wear*, 89, 151-162.

Li, H.J., et al., 1988, Investigation of forces exerted by an AWJ on a workpiece, *Proc. of the 5th American WJ Conf.*, Toronto, Canada, 69-77.

Lichtarowicz, A.,1974, Experiments with cavitating jets, *Proc. of 2nd Int. Jet Cutting Techn.Symp.*,BHRA, Paper D1.

Lichtarowicz, A., and Nwachukwu, G., 1978, Erosion by an interrupted jet, 4th Int. Symp. on Jet Cutting Techn., BHRA Fluid Eng., Canterbury, B2, 6 p.

Liu H., 2004, A study of the cutting performance in AWJ contouring of alumina veramics and Ass. Jet dynamics characteristics, PhD Thesis, Queensland Univ.

Louis, H., Meier, G., 1991, Methods of process control for abrasive water jets, *Proc. 64th USA WJ Conf.*, 427-437.

Matsui, S., et al., 1991, Prediction equations for depth of cut made by AWJ, *Proc. 6th. USA WJ Conf.*, 31-41.

Mazurkiewicz, M., and Galecki, G., 1990, Energy consumed for hydro-abrasive jet formation, *Int. J. Water Jet Technol.* 44-50.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Mazurkiewicz, M., et al., 1988, Investigation of abrasive cutting head internal parameters, Proc. 9th Int. Symp. Jet Cutting Techn., BHRA Fluid Eng., Cranfield, 75-84.

Mc Cullough, W.S. and Pitts, W., 1943, A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, Bulletin of Mathematical Biophysics, 5, 115-133.

Meier, G., 1991, Abrasive jet cutting from the laboratory stage to real application, Progress Rep. No. 1, Europ. Comm. Res. Progr. Decomm. Nucl. Inst., Project A3.

Minsky, M.L and Papert, S.A., 1969, Perceptrons, Cambridge, MA: MIT Pres.

Momber, A.W., 1995a, A generalized abrasive water jet cutting model, Proc.of the 8th USA WJ Conf. 1, Water Jet Technology Association, St Louis, 359-371.

Momber, A.W., 1995b, A simplified mathematical energy dissipation model for water jet and abrasive water jet cutting processes, Proc. of the 8th USA WJ Conf., 2, 829-843.

Momber, A.W., 2001, Energy transfer during the mixing of air and solid particles into high-speed WJ: an impact-force study, Experim. Thermal and Fluid Science 25, (31).

Momber, A.W.,and Kovacevic, R., 1995a, Energy dissipative proxesses in high speed water-solid particle erosion, ASME Heat Trans. and Fluid Eng., NewYork, 243-356.

Momber, A.W., and Kovacevic, R., 1995b, Quantification of energy absorption capability in AWJ machining Inst. of mech. Eng., J. of Eng. Manuf., 209, 491-498.

Momber, A.W., Kovacevic, R., and Ye, J., 1995, the fracture of concrete due to erosive wear by high velocity water flow. Tribol. Trans., 38, 686-692.

Momber, A.W., and Kwak, H., et al., 1996, Investigation in AWJ erosion based on particle analysis, ASME, J. Tribology, 118, 759-766.

Momber, A.W., et al.,1997, An alternative method for the evaluation of the AWJ cutting process in gray cast iron, J. Mater. Proc. Tech., 65, 65-72.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Momber, A.W. and Kovacevic, R., 1998, Principles of abrasive water jet machining.
- Murai, H., and Nishi, S., 1989, Structure of WJ and erosion of materials, Proc. of 5th USA WJ Conf., Canada, 89-98.
- Nakaya, M., et al., 1984, Concrete cutting with AWJ, Proc. of 7th Int. Symp. on WJ Cutting Techn., June 26-28, Ottawa, Canada, 281-292.
- Nanduri, M., and Kim T., et al., 1996, Wear patterns in AWJ nozzles, Proc. of 13th Int. Symp. on Jet Cutting Techn., Sardinia, Italy, 27-43.
- Nanduri, M., et al., 1996, A new velocity micro-particle impact technique applied to AWJ cutting head design, Proc. of the 8th Int. Cong. Nashville, 433-434.
- Neusen, K.F., et al., 1994, Axial variation of particle and drop velocities downstream from an AWJ mixing tube, N.G. Allen (Ed.), Jet Cut. Techn., London, 93-103.
- Ohlsen, J., 1997, Recycling on ferststoffen beim wasserabravstrahlverfahren. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 15, Nr. 175.
- Ohlson, L., and Powell, J. C., et al., 1994, Mechanisms of striation formation in AWJ cutting, 12th Int. Symp. on Jet Cutting Tech., Rouen, France, 151-164.
- Ohlsson, L., 1995, The theory and practice of AWJ cutting, PhD thesis, ISSN 0348-8373, Lulea Univ. of Techn.
- Ohman, J.L., 1993, Abrasives: their characteristics and effect on WJ cutting, Proc. of 7th USA WJ Conf., 405-409.
- Osman, A.H., and Buisine, D., et. al., 1996, Measure of air low rate according to the mixing chamber designs, Jet. Techn., Mech. Eng., London, 223-236.
- Oweinah, H., 1989, Eistungsteigerung des hochdruckwasserstrahlshneidns durch zugabe von zusatzstoffen. Ph.D Thesis, TU Darmstadt.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Öjmerts, C., 1993, AWJ milling—an experimental investigation, in: Proc. of 7th USA WJ Conf., Seattle, 771-791.

Öjmerts, C., 1994, AWJ machining, Licentiate Thesis, Chalmers Univ. of Techn.,

Öjmerts, C., 1996, Analysis of surfaces produced by abrasive waterjet milling techniques, in: Proc. of 13th Int. Conf. on Jet Cutting Techn., Sardinia, Italy, 753-768.

Öztemel, E., 2003, Yapay sinir ağları, Papatya Yayıncılık, ISBN975-97-39-8, İstanbul.

Raissi, K., et al., 1996, Mixing tube geometry influence on AWJ flow, Proc. of 13th Int. Conf. on Jetting Techn., Italy, 247-267.

Ramulu, M., and Arola, D., 1993, WJ and AWJ cutting of undirected graphite/epoxy composite, Composite 24 University of Washington, USA, 24, (4), 299-308.

Ramulu, M., Arola D., 1994, The influence of AWJ conditions on the surface quality of graphite/epoxy laminates, Int. J. Tools Manuf., 34, 295-313.

Ruppel, P., and Brauer, H., 1986, Comminution of single particles by repetitive impingement on solid surfaces, Proc. 1st World Cong. Particle Tech., Nuremburg, 17-28.

Saraç, T., 2004, Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapay Sinir Ağları Seminer Projesi.

Schmelzer, M., 1994, Mechanismen der strahlerzeugung beim wasser-abrasivstrahlschneiden, dissertation, technische Hochschule, Aachen.

Shavlovsky, D.S., 1972, Hydrodynamics of high pressure fine continuous jets, Proc. of the 1st Int. Symp. of Jet Cutting Techn., BHRA Fluid Engineering, Cranfield, A6-A81.

Sheldon, G. L., and Kanhere, A., 1972, An investigation of impingement erosion using single particles, Wear, 21, 195-209.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Shtuckaturov, K.T., and Kuklin, I.S., 1962, Basic factors and fracturing ability of water jet, Akad. Nauk SSSR, Uralyskiy Filial., 3.

Siores, E., Wong, W.C.K., Chen, L., and Wager, J.G., 1996, Enhancing abrasive waterjet cutting of ceramics by head oscillation techniques, *Cirp Ann.* 45 (1) 327-330.

Summers, D.A., 1991, *Fluid Jet Technology—Fundamentals and Applications*, WJTA, St Louis, MO, USA.

Summers, D.A., Barker, C.R., and Keith, H.D., 1980, Water jet drilling horizontal holes in coal, *Mining Engineering*, 698 p.

Taggart, D.G., and Nanduri, M., et al., 1997, Evaluation of an acceleration on wear test for AWJ nozzles, *Proc. of the USA WJ Conf.*, Deadborn, MI, 230-250.

Tikhomirov, R.A., Babanin, V.B., Pethukov, E.N., et al., 1992, High-pressure jet cutting, ASME Pres, New York.

Timoshenko, S., and Goodier, J.N., 1969, *Theory of elasticity*, McGraw Hill Publ. NY.

Truckenbrodt, E., 1968, *Strömungsmechanik (Fluid Mechanics)*, Springer, New York.

Van Riemsdijk, J., and Bitter, J.G.A., 1959, 5th World Petrol. Cong., 7, (4), New York.

Veltrup, E.M., 1976, Application of oscillating nozzles for cutting and cleaning, *Proc. of the 3rd Int. Symp. on Jet Cutting Technology*, Chicago, C1-1 - C1-13.

Vijay, M.M., 1995, Advances in application of high speed fluid jets, *Proceedings of the 4th Pasific Rim Int. Conf. on Water Jet Techn.*, Shimizu, Japan, 27-46.

Vijay, M.M., and Brierley, W.H., 1980, Drilling of rocks by high pressure liquid jets: A review, *Petroleum Division of the ASME*, 80-Pet-94.

Vijay, M.M., Brierley, W.H., 1979, A study of erosion by high-pressure cavitating and noncavitating WJ, *ASTM STP 664*, W.F. Adler, Ed., 512-529.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Wang, J., 1999, The erosive process in AWJ cutting of polymer matrix composites, 15, 880-885.

Wang, J., 2000, An analysis of the cutting performance in multipass abrasive-waterjet machining: Yasunaga, et al., (Ed.), Adv. Abras. Technol. Soc. Grind. Eng., 444-449.

Willshaw D.J., and Malsburg C., 1976, How patterned neural connections can be set up by self-organization, Proc. R Soc. Lond B Biol. Sci., 194, (1117), 431-445.

Woodward, M.J., 1993, Water soluble abrasives, Proc. of 7th USA WJ Conf., 397-404.

www.nevtasmakine.com (Majet), İstanbul, 2006.

www.forming fabricating. com “Forming Fabricating”, May 2001, 8 ~ 5.

www.omax corporation, water requirements, 2005.

www.qualjet.com., 2005, ‘The impact of pressure fluctuation on surface finish.’ and “Does abrasive waterjet cutting cause surface hardening?”

www.stonage waterjet tools, 2005.

www.trumpf.com., 2006.

www.waterjetting directory.com, 2004.

www.waterjets.org., 2005.

Yanaida, K., 1974, Flow characteristics of water jets, Proc. 2nd Int. Symp. of Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, A2/19-A2/32.

Yanaida, K., Ohashi, A., 1978, Flow characteristics of water jet, 4th Int. Symp. on Jet Cutting Techn., BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England, A3, A3-39.

Yanaida, K., Ohashi, A., 1980, Flow characteristics of water jets in air, Proc. 5th Int. Symp. Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, A3, 34-44.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Yashima, S., Kanda, Y., and Sano S., 1987, Relationships between particle size and fracture energy or impact velocity required to fracture as estimated for single particle crushing, *Powder Techn.*, 51 277-282.

Yie, G. G., 1983, Cutting Hard Rock with Abrasive Entrained ater Jet at Moderate Pressures, *Proc. of 2nd U.S. Water Jet Conference*, May 26-26, rolla MO, 407-422.

Yurtoğlu, H., 2005, Yapay sinir ağları metodolojisi ile öngörü modellenmesi: bazı makroekonomik değişkenler için Türkiye örneği, *DPT-Uzmanlık Tezi*, Yayın No: 2683

Zeng, J., 1992, Mechanism of brittle material erosion associated with high pressure AWJ processing: A modeling and application study, *The University of Rhode Island*.

Zeng, J., and Kim, T.J., 1992, Development of an AWJ kerf cutting model for brittle materials, *Proc. of the 11th Int. Conf. on Jetting Techn.*, 483-501.

Zeng, J., and Kim, T.J., 1996, An erosion model for AWJ milling of polycrystalline ceramics, *Wear*, 199, 275-282.

Zeng, J., and Munoz, J., 1997, Surface finish evaluation for abrasive waterjet cutting, *Proc. of the 9th USA WJ Conf.*, Dearborn.

Ek Açıklamalar - A

Şekil A1. ASJ Tezgâhında Kesme Kafasının Görünüşü (MAJET, 2006)



Şekil A2. ASJ Tezgâhında Malzeme Kesimi (MAJET, 2006)

Ek Açıklamalar - B

Şekil B1. ASJ Tezgâhında Kesme Nozulu ve Aşındırıcı Hattı (MAJET, 2006)



Şekil B2. ASJ Tezgâhında Taşıyıcı Konsol ve Kesme Kafası (MAJET, 2006)

Ek Açıklamalar – C

Şekil C1. Granit Uygulaması



Şekil C2. Granit – Seramik Uygulaması

Ek Açıklamalar – D

Şekil D1. Paslanmaz Sac– Granit Uygulaması



Şekil D2. Sarı Malzeme – Seramik Uygulaması

Ek Açıklamalar – E

Şekil E1. Sarı Malzeme Kesimi



Şekil E2. Mermer Döşeme (Granit – Seramik) Uygulaması

Ek Açıklamalar – F

İşletme Maliyeti

Su jeti ile kesme yöntemi diğer yöntemlere göre daha ekonomik bir kesme işlemi sağlamaktadır. Elektrik sarfiyatı, kullanılan garnet aşındırıcısı sarfiyatı ile orifis, nozul (odaklama tüpü) ve sızdırmazlık kiti sarf malzemelerinin 1 saat için işletme maliyeti aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 50 HP ve 100 HP gücündeki pompaların kullanılması durumunda maliyet tabloda ayrı ayrı görülmektedir.

Çizelge F1. Aşındırıcı Su Jeti Düzenine İlişkin Maliyet Tablosu

Maliyet Türü	Maliyet Birimi	Kullanım Ömrü	Kesme Maliyeti (EURO/dk)
Elektrik	0,15 (EURO/kW)	72 kW	0,09
		36 kW	0,045
Garnet aşındırıcı (80 #)	0,24 (EURO/kg)	500 (gr/dk) [100 HP]	0,12 (100 HP)
		300 (gr/dk) [50 HP]	0,07 (50 HP)
Orifis	30 (EURO/parça)	100 saat	0,005
Odaklama tüpü	150 (EURO/parça)	100 saat	0,025
Sızdırmazlık	250 (EURO/set)	50 saat	0,016 (100 HP)
			0,008 (50 HP)
TOPLAM MALİYET (1/dk)			0,25 (100 HP)
			0,15 (50 HP)
Pompa boyutu	100 HP	50 HP	
Pompa maliyeti (1/h)	15 EURO	9 EURO	

ÖZGEÇMİŞ

H. Sevil ERGÜR

30. 09. 1973 Eskişehir’ de doğdu. 1993 yılında Eskişehir Anadolu Lisesi’nde lise öğrenimini tamamladı. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 1997 yılında Makine Mühendisi, 2000 yılında ESOGÜ Fen Bilimleri Enstitüsünden Makine Yüksek Mühendisi derecelerini aldı. 1999 yılından itibaren Prof. Dr. Yaşar PANCAR’ ın danışmanlığında Makine Mühendisliği Bölümü’nde, Hidrolik Makineler, Hidrolik Devreler, Hidrolik Makineler Tasarımı, Hidrolik Makineler Laboratuvarları, Maden Mühendisliği Bölümünde Akışkanlar Mekaniği, Fen Bilimleri Enstitüsünde Hidrolik–Pnömatik Sistemler ve Pnömatik derslerinde yardımcıılığı devam etmektedir. Ayrıca Yapay Sinir Ağları üzerine çalışmalar yapmaktadır. 2002 yılından itibaren Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Doktora çalışmalarına başlamıştır.

Yayımları:

1. Prof. Dr. Yaşar PANCAR; Araş. Gör. H. Sevil ERGÜR, 2005 “Hidrolik Makineler – Teori ve Uygulamaları (Pompa–Türbin–Vantilatör)” ESOGÜ (Eskişehir Osmangazi Üniversitesi) Yayın No: 110, ISBN 975 – 7936 – 46 – 4.
2. H. Sevil Ergür, Mustafa Gölcü, Yaşar Pancar, Ö. Altan Dombaycı, “Analysis of the cutting power on abrasive waterjet system applications” The 5th International Symposium On Intelligent Manufacturing Systems, May 29–31, 2006, Sakarya University (SAU), Sakarya, Turkey

3. H. Sevil Ergür, Yılmaz Yörü, İrfan Üreyen, “Pnömatik Taşımada Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Yollarının Araştırılması”, TMMOB, Makine Mühendisleri, İzmir Şubesi, Aralık/2005, İzmir.
4. Mustafa Gölcü, Yaşar Pancar, H. Sevil Ergür, Ö. Altan Dombaycı, “The fuzzy logic modelling of head-flow curves of deep well pump impellers with splitter blades”, IMS’2004 5th International Symposium On Intelligent Manufacturing Systems, September, Sakarya University, Sakarya, Turkey.
5. H. Sevil Ergür, Mustafa Gölcü, Yaşar Pancar, V. Şahin, “Prediction of linear cutting speed for aluminium plates”, International Conference on Modelling and Simulation 2006, 28–30 August, Konya, Turkey, Selçuk University.
6. Kutlu, Alı, D., ERGUR, Sevil, H., GOLCU, M., “Magma Pump” ve “Pompa çarklarında ara kanatçığın pompa karakteristiğine etkisi” (2006), adlı yayınlar editörlerde incelemededir.