

58062

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

*DÜZGÜN BİR YÜZEYE ÇARPAN JETDE  
KÜTLE AKTARIMI*

Soner KUŞLU

ERZURUM - 1996

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

*DÜZGÜN BİR YÜZEYE ÇARPAN JETDE  
KÜTLE AKTARIMI*

Soner KUŞLU

Yönetici: Doç.Dr. Hürriyet ERŞAHAN

Yüksek Lisans Tezi

## ÖZET

Çarpan jetler çarpma bölgesinde oluşturdukları yüksek kütle ve ısı aktarımı katsayıları nedeniyle endüstride genellikle ısıtma, soğutma, kurutma vb. gibi işlemlerde kullanılır. Elektrokimyasal sınırlayıcı difüzyon akım tekniği kullanılarak düzgün bir yüzeye çarpan daldırılmış jetin oluşturduğu kütle aktarım olayının karakteristik davranışı incelenmiştir. Gözönüne alınan parametreler daldırılmış jet dağıtıcı ile düzgün yüzey arasındaki mesafe, akışkanın Reynolds sayısı ve durgunluk noktasından itibaren radyal yöndeki mesafe olarak seçilmiş ve bu parametrelerin sırasıyla 1.6-9.6 cm, 9190-73510 ve 0.8-9.6 cm aralıklarındaki değerleri alınmıştır.

Nerst-Planck ve Faraday eşitlikleri kullanılarak, hesaplanan kütle aktarım katsayıları boyutsuz Sherwood sayısına dönüştürülerek bu sayı ile Reynolds sayısı arasındaki ilişki bulunmuştur.

Deneysel sonuçlar  $Sh=aRe^bSc^{1/3}$  şeklinde korele edilmiştir. Ayrıca düzgün yüzey üzerindeki çarpma ve duvar jet bölgesinin yerleri de tespit edilmiştir.

Yapılan çalışma sonuçlarına göre Reynolds sayısında meydana gelen artışın, sınırlayıcı akım yoğunluğunun; dolayısıyla da kütle aktarım hızının artmasına sebep olduğu gözlenmiştir.

## ***SUMMARY***

Impinging jets are widely used in industry for heating, cooling, drying etc., because of the high mass and heat transfer rates occurred in the impingement region. The characteristic behaviour of the mass transfer coefficient of impinging jet on a flat surface have been investigated, using electrochemical limiting diffusion current technique. The distance between jet distributor on the flat surface, Reynolds number of fluid and radial distance on the surface from the centre of the stagnant point, which were varied from 1.6 to 9.6 cm, from 9190 to 73510 and from 0.8 to 9.6 cm, respectively, were chosen as parameters.

The relation between Sherwood number and Reynolds number was found, by using mass transfer coefficient calculated by Nerst-Planck and Faraday equations.

The results of the study was correlated in the form,  $Sh = aRe^b Sc^{1/3}$ . The impingement region and the wall jet region on the flat surface was also determined.

According to the result of the study it was observed that an increase in the Reynolds number increased the limiting current density, hence the mass transfer rates.

**TEŞEKKÜR**

Bu tezin hazırlanmasında yapılan alışmaları yakından takip ederek yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Sinan YAPICI'ya ve yardımlarını esirgemeyen tez yöneticim Doç. Dr. Hürriyet ERŞAHAN'a teşekkür ederim.



**KISALTMALAR VE SİMGELER**

<b>Sembol</b>	<b>Anlamı</b>	<b>Birimi</b>
A	Elektrot alanı	[m <sup>2</sup> ]
C	Konsantrasyon	[mol.m <sup>-3</sup> ]
C <sub>A,s</sub>	Çarpma levhası yüzeyindeki konsantrasyon	[mol.m <sup>-3</sup> ]
C <sub>A,e</sub>	Lüle çıkışındaki akışkan konsantrasyonu	[mol.m <sup>-3</sup> ]
C <sub>A,∞</sub>	Çevre konsantrasyonu	[mol. m <sup>-3</sup> ]
d	Boru çapı	[m]
D <sub>AB</sub>	Kütle difüzyon katsayısı	[m <sup>2</sup> .sn <sup>-1</sup> ]
D	Lüle çapı	[m]
F	Faraday sabiti, 96487	[Coulomb.mol <sup>-1</sup> ]
H	Lüle çıkışı ile hedef yüzey arasındaki boşluk mesafesi	[m]
I <sub>L</sub>	Sınırlayıcı akım yoğunluğu	[A.m <sup>-2</sup> ]
k	Kütle transfer katsayısı	[m.sn <sup>-1</sup> ]
N	Kütle aktarım akısı	[kmol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
R	Radyal yön eksenini	[m]
T <sub>s</sub>	Çarpma levhası yüzeyindeki sıcaklık	[°C]
T <sub>e</sub>	Lüle çıkışındaki akışkan sıcaklığı	[°C]
T <sub>∞</sub>	Çevre sıcaklığı	[°C]
z	Elektrokimyasal reaksiyonda aktarılan elektron sayısı	
ρ	Yoğunluk	[kgm <sup>-3</sup> ]
μ	Dinamik viskosite	[kgm <sup>1</sup> .s <sup>-1</sup> ]
μ <sub>w</sub>	Duvar sıcaklığındaki akışkan viskositesi	[kgm <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ]
μ <sub>∞</sub>	Serbest akım sıcaklığında akışkan viskositesi	[kgm <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ]
ν	Kinematik viskosite	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
ρ <sub>w</sub>	Duvar sıcaklığında akışkan yoğunluğu	[kgm <sup>-3</sup> ]

$\rho_o$ 

Serbest akım sıcaklığında akışkan yoğunluğu

[kgm<sup>-3</sup>]**Boyutsuz Gruplar**

Re	Reynolds sayısı ,	$DV\rho / \mu$
Sc	Schmidt sayısı ,	$\nu / D_{AB}$
Sh	Sherwood sayısı ,	$kd / D_{AB}$
H/D	Lüle çıkışı ile çarpma yüzeyi arasındaki boşluk mesafesinin lüle çapına oranı	
R/D	Yüzey merkezindeki elektrod ile diğer elektrotlar arasındaki mesafenin lüle çapına oranı	
Pr	Prandtl sayısı ,	$\nu / \alpha$
Nu	Nusselt sayısı ,	$hd / k$
St <sub>m</sub>	Modifiye edilmiş Sherwood sayısı ,	$Sh_L / Re_L Sc$
J <sub>H</sub>	Colburn J faktörü ,	$St_m Sc^{2/3}$

**İÇİNDEKİLER**

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>KISALTMA VE SİMGELER</b> .....	<b>iv</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Jet Çarpması .....	<b>1</b>
1.2. Çarpan Jetin Hidrodinamik ve Geometrik Şekli .....	<b>3</b>
1.3. Literatür Araştırmaları .....	<b>6</b>
1.3.1. Çarpan Jetler ile İlgili Hidrodinamik Çalışmalar .....	<b>6</b>
1.3.2. Çarpan Jetler ile İlgili Isı Aktarım Çalışmalar .....	<b>8</b>
1.3.3. Çarpan Jetler ile İlgili Kütle Aktarım Çalışmalar .....	<b>13</b>
<b>2. DENEYSEL YÖNTEM</b> .....	<b>15</b>
2.1. Materyal ve Metod .....	<b>15</b>
2.2. Elektrokimyasal Sınırlayıcı Difüzyon Akım Tekniği .....	<b>15</b>
2.3. Deney Sistemi .....	<b>20</b>



<b>3.SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>25</b>
<b>4. KAYNAKLAR .....</b>	<b>47</b>



## ***1. GİRİŞ***

Kimya Mühendisliği proseslerinde ısı, kütle ve momentum aktarımları büyük önem taşır. Hemen hemen bütün proses işlemlerinde bu aktarım olayları ile karşılaşılır ve günümüzde malzeme, enerji, zaman ve ekonomi gibi faktörler göz önünde bulundurularak, proses işlemleri üzerinde konvektif ısı, kütle ve momentum aktarım olaylarının geliştirilmesi yönünde çalışmalar yapılmaktadır.

Konvektif aktarım olaylarının daha hızlı bir şekilde gerçekleşmesini sağlamak amacı ile birçok teknik kullanılmaktadır. Bu teknikler pasif ve aktif teknikler olarak iki ana grupta ele alınır. İşlenmiş, pürüzlü ve genişletilmiş yüzeylerin, helis oluşturucu aletlerin, bükümlü tüpler ile sıvı ve gazlar için katkı maddelerinin kullanılmaları ekstra bir dış güç gerektirmeyen pasif tekniklerdir. Ekstra bir dış güç kaynağı gerektiren teknikler aktif teknikler olarak isimlendirilirler ve bu teknikler yüzey ve sıvı vibrasyon uygulamaları, elektrostatik alan oluşturma, enjeksiyon veya emme gibi metodları içerirler.

Bu çalışmada, konvektif kütle aktarım hızının artırılmasına yönelik pasif tekniklere örnek olarak; elektrokimyasal sınırlayıcı difüzyon akım şartlarında türbülans seviyedeki daldırılmış sıvı jetinin dik olarak, üzerinde elektrotların bulunduğu düzgün bir yüzey üzerine çarptırılması ile ortaya çıkan kütle aktarımının karakteristik değerleri incelenmiştir.

Jet çarpması tekniği kullanılarak aktarım olaylarının artırılması ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi özellikle ısı aktarımı yönünden birçok araştırmanın konusu olmuştur.

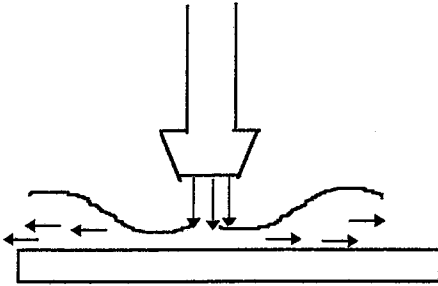
### ***1.1. Jet Çarpması***

Bir yüzeye çarpan jetler, çarpma bölgesinde oluşturdukları yüksek ısı/kütle aktarımı sebebiyle, yüzeylerde kurutma, ısıtma ve soğutma amacıyla yüksek sıcaklıktaki gaz türbinlerinde, kağıt ve cam imalat tesislerinde, metallerin ısıl işlemlerinde, cam levha temperlemesinde, tekstil ve kâğıt sanayiinde, elektronik devre elemanlarının bulunduğu

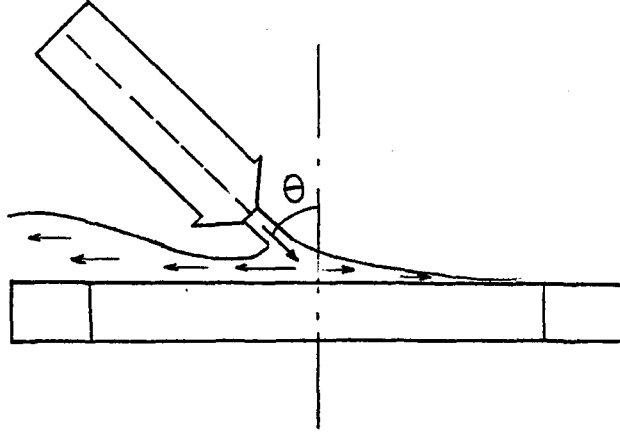
pek çok endüstriyel sistemde, gaz-sıvı arasındaki aktarım olayını daha iyi seviyeye getirmek amacıyla gaz-sıvı kondaktörlerinde kullanılır. Jet çarpması, akışkan ile yüzey arasında yüksek lokal ısı/kütle aktarım katsayısı elde edilmesinde kullanılmakta olup ısı/kütle aktarımında önemli derecede artışlar elde edildiğinden enerji tasarrufu da sağlamaktadır(1).

Çarpan jet bir lüleden çıkan akışkanın yüzeye çarptırılması ile elde edilir ve aktarım olayının artırılması için genellikle türbülans seviyedeki jet çarpmaları kullanılır. Maksimum değerde ısı/kütle aktarımı için çarpan jetin türbülans seviyesinin ne olacağı, lülenin yüzey merkezinden hangi uzaklığa yerleştirileceği, lüle açısının ne olacağı önemli problemlerdir. Ayrıca çarpan jetler oluşturulurken lülelerin şekli ( tek, çok sıralı, uzun, dar, yarı, iki boyutlu vs...) boyutu, yüksekliği, lüleler arası mesafe, çarptırılan akışkanın hızı, sıcaklığı/konsantrasyonu, yüzey üzerine çarpma şekli (dönerli, açılı, eğik, dik vs...) aktarım olayını etkileyen parametrelerdir.

Çarpan jet, konveksiyonla yüzeyde ısı/kütle aktarım olayını artırma prensibine dayanan pasif tekniklerden biridir. Şekil 1(a) ve(b) 'de gösterildiği gibi, uygulamalarda bu çarpma yüzeye dik olabileceği gibi değişik açılarda olabilmektedir.



Şekil 1.(a). Yüzey üzerine jetin dik çarptırılması



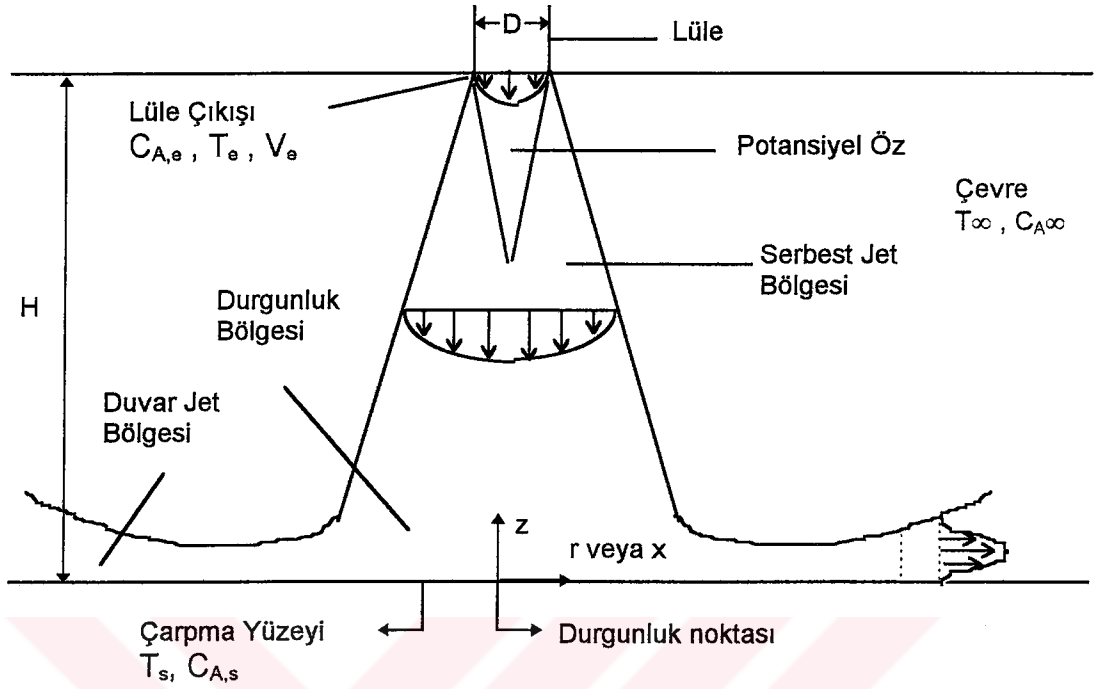
Şekil 1.(b)Yüzey üzerine jetin  $\theta$  açısı ile çarpıtılması

Bir akışkan jeti  $\theta$  açısında bulunan sabit düz bir yüzey üzerine çarptığı zaman geri dönmez ve yüzey üzerinde tüm yönlere doğru akar. Yüzeye normal doğrultuda, yüzey üzerinde akım hızı sıfır olur ve yüzeye normal doğrultuda momentum yoktur. Bu nedenle jet üzerinde yüzey ile zıt ve eşit bir etki oluşacaktır. Yüzeye paralel yönde oluşan kuvvet akışkan ile yüzey arasındaki kesme gerilimine bağlı olacaktır. İdeal bir akışta kesme gerilimi ve yüzeye paralel kuvvet olmayacaktır. Bu akış yüzey üzerinden dışarı akacak ve böylece yüzeye paralel toplam momentum değişmeden kalacaktır(2).

### 1.2. Çarpan Jetin Hidrodinamik ve Geometrik Şekli

Şekil 2 bir lüle'den çıkan ve lüle çıkış yeri ile yüzey arasında oluşan akışkan çarpan jet profilini göstermektedir.

Şekil 2' deki jet hız profili 'nden görüleceği gibi, serbest jet bölgesi, durgunluk veya çarpma bölgesi ve duvar veya yan jet bölgesi olmak üzere üç bölge vardır(3).



Şekil 2 : Dik olarak çarpan bir jetin lüle çıkışı ile çarpma yüzeyi arasında oluşan profili ve bölgeleri.

Serbest jet bölgesi akışkanın lüleden durgun çevre ortamına boşalmasıyla meydana gelir. Bu bölgenin özellikleri çarpma levhasından etkilenmez. Lüle çıkışındaki hız profili uniform'dur. Jet ile çevre arasında oluşan momentum lüleden uzaklaştıkça serbest jet sınırını genişletir ve eksen üzerinde potansiyel öz'ü meydana getirir. Aşağı doğru inildikçe potansiyel öz içindeki hız profili uniform durumdan sapar ve maksimum hız lüle çıkışından itibaren artan mesafe ile azalır. Potansiyel jet uzunluğu yaklaşık olarak jeti oluşturan lüle çapının 6-8 katı kadardır ve levha üzerinde maksimum ısı/kütle aktarımı elde etmek için levhanın potansiyel öz'ün olduğu mesafe dışına yerleştirilmesi gerekir(4).

Çarpma bölgesini radyal yönde terkeden akışkan artık yüzeye paralel akar ki bu bölgeye duvar jet bölgesi adı verilir. Duvar jet'in olduğu bölgede duvar jet bölgesidir. Düz bir levha üzerindeki akış karakteristiğini yansıtır. Yüzeyden uzaklaştıkça sınır tabaka kalınlığı artar.

Çarpma bölgesinde akış tam bir yöne sahip değildir. Akışkan levhaya çarpınca hızı aniden düşer ve r yönünde hızlanır. Hızlanan akım çarpma bölgesinden sonra gittikçe genişleyen duvar jet'e dönüşür. Dik çarpan jetlerde jet merkezinden geçen eksen çizgisinin yüzeyde gösterdiği geometrik çarpma noktasının, durgunluk noktası ile çakıştığı yerde akım hızı sıfırdır ve dik jetlerde maksimum ısı aktarımı durgunluk veya çarpma bölgesi denilen yerde meydana gelir(5).



### ***1.3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI***

Çarpan jet'ler ile ilgili yapılan çalışmalar öncelikle bu tekniğin hız profilini, akış karakteristiğini, levha üzerinde oluşturduğu basınç ölçümlerini, çeşitli yüzeyler üzerindeki akım karakteristiklerini ortaya çıkarmak ile alakalıdır. Isı/kütle aktarım hızlarının artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmış ve boyutsuz sayılar ile ısı/kütle aktarım katsayısı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu nedenle literatür araştırması üç bölümde ele alınacaktır. Birinci bölümde çarpan jetler üzerine yapılan hidrodinamik araştırmalar, ikinci bölümde çarpan jetler kullanılarak yapılan ısı aktarımı ile ilgili çalışmalar ve üçüncü bölümde bu teknikle yapılan kütle aktarım çalışmalarına yer verilecektir.

#### ***1.3.1. Çarpan Jetler İle İlgili Hidrodinamik Çalışmalar***

Incropera ve Witt (3), yuvarlak bir lüleden çıkan ve sabit bir yüzeye çarpan jet'in oluşturduğu hız profilini incelemişler ve bu profilde serbest jet, çarpma ve duvar jet bölgelerinin yerlerini belirlemişlerdir.

Sıvı yüzeyi üzerinde çarpan sıvı jet ile çok sayıda kabarcığın oluşumundan dolayı sıvı jetler gaz-sıvı kondaktörlerinde kullanılmaktadır. Bu amaçla Kumagai ve Endoh(6) tarafından sulu çözeltilerin kinematik viskozitesinin ve yüzey geriliminin çarpan bir sıvı jetinin gaz giriş hızı üzerine olan etkisini dairesel bir lüle kullanarak incelemişlerdir. Ortaya çıkan 3 geçiş noktası üzerinde bulunan 3 kritik jet hızının sıvının kinematik viskozitesinin artması ile arttığı bulunmuştur. Çarpan sıvı jeti gaz giriş hızının, ilk giriş bölgesinde azalma eğiliminde olduğu bu arada; kinematik viskozite arttığı için de düşük jet hız bölgesinde arttığı gözlenmiştir. Yüksek jet hız bölgesinde kinematik viskozitenin gaz giriş hızı üzerindeki etkisinin ise belirsiz olduğu ayrıca sıvının yüzey geriliminin gaz giriş hızı ve 3 geçiş noktası üzerindeki etkisinin ihmal edilebileceği vurgulanmıştır.

Bin(7), türbülans jetlerle oluşturulan çarpmalarda sıvı yüzeyinin davranışını araştırmış ve serbest sıvı yüzeyi içine jet penetrosyonunun maximum uzunluğunu, delik şeklini,

büyükliğini, sıçrama ve göz önüne alınan sıvıdaki karışma prosesini incelemiştir. Serbest bir sıvı yüzeyi ile ilgili olan gaz ve sıvı jetler için korele edilen verilerde belirgin bir farklılığın bulunmadığı görülmüştür.

Foss ve Kleist(8), simetrik jetin eğik çarpması ile ortaya çıkan akım karakteristik özelliklerini  $0.5 \leq H/D \leq 2$ ,  $0 \leq R/D \leq 5$  ve  $0^\circ \leq \alpha \leq 12^\circ$  parametre aralıklarında incelemiş ve bu akım alanındaki karakteristik değerleri belirtmişlerdir. Bu çalışmaya göre püskürtülen jet yüzey üzerine çarpmadan önce hava tabaka yüzeyini etkiliyorsa, o zaman uygun bir boşluk dizaynında levha üzerine havanın çarpmasında akım vorteksleri meydana geldiği belirlenmiştir.

Yine Foss(9), dik olmayan jet çarpması ile ilgili akım karakteristik ölçümlerini  $\alpha=45^\circ$ ,  $H/D=4.95$ ,  $Re=4.8 \times 10^4$  ve Mach sayısını 0.1 olarak incelemiş ve bir önceki çalışmasına (8) göre daha kompleks durumlar için akım karakteristiğini belirlemiştir.

Lau(10), Mach sayısı ve sıcaklığın jetler üzerine olan etkisini, Mach sayısını 0.3-1.7 aralığında ve lüle çıkış sıcaklığı ile çevre sıcaklığı oranını 0.8-2.3 aralığında alarak ölçmüştür. Bu oranlardaki akım hızları ve türbülans etkiler incelenmiş, radyal ve aksenal yöndeki dağılımlar bulunmuştur. Mach sayısındaki artışın sıçrama hızını artırdığı ve izotermal jetlerde artan Mach sayısı ile sıçrama hızının azaldığı görülmüştür.

Glowack(11), döndürülen bir yüzeyin yakınlarında çarpan jetin türbülans karakteristiğini incelemiş ve polimer ilavesiyle meydana gelen etkileri araştırmıştır. Radyal yöndeki türbülans dağılımı değişiminin serbest jet türbülans yapısının sonucu olduğunu bulmuştur. Polimer ilavesinin hız gradyanında değişime sebep olduğu ve türbülans seviyeyi artırdığı görülmüştür.

Deshpande ve Varshnav(12), düz bir yüzey üzerinde daldırılmış laminar jet çarpımını  $10 \leq Re \leq 2000$  ve  $3 \leq H/D \leq 4$  aralığında incelemiş ve bu değerlerdeki duvar kesme gerilimini, basınç gradyanını ve hız profillerini incelemişler bu ve durumlar için kararlı hal Navier-Stokes eşitliklerini çözmüşlerdir. Reynolds sayısının düşük



değerlerinde lüle çıkış noktası ile hedef yüzey üzerindeki artış duvar kesme geriliminde azalmaya yol açmıştır. Parabolik çıkıştan düz profile geçerken momentum akısının azalmasının duvar kesme gerilimini azalttığı bulunmuştur.

Donaldsan ve Snedeker(13), çarpan jetlerin davranışını deneysel olarak incelemiş, serbest jet ile ilgili olarak jet içinde basınç dağılımını ölçmüş, serbest jet yayılımı ve hız profillerini tespit etmişlerdir. Ayrıca lüleden çıkan jetin silindir ve düz bir levha üzerine çarptırılması ile ortaya çıkan akım karakteristikleri deneysel olarak belirlenmiştir.

Lamonti ve Hunt(14), dik ve eğik plakalar üzerinde gelişmiş aksenal jet çarpımını  $30^{\circ}$ - $90^{\circ}$  arasında bulunan plaka açıları kullanarak incelemişlerdir. Yüzey basınç dağılımları gölge grafik resimlerle verilmiştir. Jetin lokal yapısının akım alanında güçlü bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Demir(15), hava akımı üzerinde lüle değişim etkisini iki çeşit (Taslan ve Hemajet ) lüle kullanarak, hava hızlarını 50-320 m/s aralığında ve basıncı 5-10 bar olarak incelemiştir. Ayrı çıkış bölümlü şekillerin, elde edilen akım özellikleri üzerinde belirli bir rolü olmadığını ve aktarımın hızlı olması için giriş deliğinin çıkış noktasından belirli bir mesafede olması gerektiği belirtilmiştir.

Loth ve Faeth(16), su içinde daldırılmış döner türbülent hava jetinin yapısını ve karışım özelliklerini 8:1 lik genişleme oranı altında incelemiş ve statik basınç, hız değişimi, akım şekli ve akım yapısını araştırmıştır. Statik basınç ölçümleri hava içindeki jetler için genişleme bölgesini ihtiva eden güçlü dalga mevcudiyetini göstermiştir.

### ***1.3.2. Çarpan Jetler ile İlgili Isı Aktarım Çalışmaları***

Feralan ve arkadaşları(17), ince mürekkep filmlerinin kurutulma işlemini göz önüne alarak çarpan hava jetlerinin oluşturduğu yüksek ısı/kütle aktarımı sebebiyle, kurutma işlemi üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Hava hızı ve sıcaklığı, lüle yüzey aralığının ısı/kütle aktarımı üzerine olan etkisi incelenmiş toplam kurutma süresi hesaplanmıştır.

Lüle-yüzey arası uzaklığın ısı/kütle aktarım üzerindeki etkisi incelenmiş ve boyutsuz lüle-yüzey aralığı  $H/D=6, 8$  bölgesinde lokal ısı aktarım katsayısının maximum değerleri elde edilmiştir. İlk durgunluk noktası için;

$$Nu=0.178Re^{0.58}Pr^{1/3} \quad (2.1)$$

korelasyonu verilmiştir.

Abrosimov(18), nümerik metod kullanarak düz bir yüzey üzerine dik olarak çarpan dairesel laminar jetin ısı aktarımını Reynolds sayısının 68-11000 aralığında ve  $H/D$  değerini 0.5-1.0 şeklinde alarak elde edilen tüm verilerin çıkış noktasındaki hız profili için aşağıdaki korelasyona uyduğunu göstermiştir.

$$St_m=1.49Re^{-0.5}Pr^{-0.62} \quad (2.2)$$

Shadlesky(19), düz bir yüzey üzerine çarpan jetin oluşturduğu ısı aktarımının durgunluk noktasındaki değerini ve katı roket motorlarının ateşleme sistemi üzerine etkisini belirtmiştir.

Incropera ve Witt(20), yuvarlak bir lüleden çıkan ve sabit bir yüzeye çarpan jetin oluşturduğu ısı aktarım karakteristik değerlerini çeşitli Reynolds sayıları, çeşitli lüleler, değişik lüle-yüzey boşluk mesafeleri ve radyal mesafeleri alarak aşağıdaki şekli ile vermiş ve ısı ile kütle analogisinden dolayı kütle aktarım korelasyonunda Nusselt ve Prandtl boyutsuz sayıları yerine sırasıyla Sherwood ve Schmidt boyutsuz sayıları yazılarak elde edilebileceğini belirtmiştir. Aşağıda değişik durumlar için korelasyonlar verilmiştir.

#### Tek bir döner lüle

$$2000 \leq Re \leq 4.10^5 \quad , \quad 2 \leq H/D \leq 12 \quad , \quad 2.5 \leq R/D \leq 7.5 \text{ aralıklarında}$$

$$\frac{Nu}{Pr^{0.2}} = G\left(\frac{R}{D} \cdot \frac{H}{D}\right) \cdot F_1(Re) \quad (2.3)$$

(2.3) denklemini geçerlidir. Bu denklemde;  $F_1$  Reynolds sayısının,  $G$  lüle çapı, jet ile çarpan levha arasındaki mesafe ve levha üzerinde çarpma noktasından olan uzaklığın fonksiyonudur.

#### Tek bir delikli lüle

$3000 \leq Re \leq 9 \cdot 10^4$  ,  $2 \leq H/D \leq 10$  ,  $4 \leq R/D \leq 20$  aralıklarında

$$\frac{Nu}{Pr^{0.2}} = \frac{3.06}{\frac{R}{D} + \frac{H}{D} + 2.78} \cdot Re^m \quad (2.4)$$

denklemini geçerlidir. Burada  $m$ ,  $H/D$ 'nin fonksiyonudur.

#### Sıralı döner lüle

$2000 \leq Re \leq 10^5$  ,  $2 \leq H/D \leq 12$  ,  $0.004 \leq Ar \leq 0.04$  için

$$\frac{Nu}{Pr^{0.2}} = K\left(Ar, \frac{H}{D}\right) \cdot G\left(Ar, \frac{H}{D}\right) \cdot F_2(Re) \quad (2.5)$$

2.5 denklemini geçerlidir.  $K$ ,  $H/D$  ve  $Ar$ 'nin,  $F_2$  ise, Reynolds sayısının fonksiyonudur.

#### Sıralı delikli lüle

$$1500 \leq Re \leq 4.10^4, \quad 2 \leq H/D \leq 80, \quad 0.008 \leq Ar \leq 2.5.A$$

$$\frac{Nu}{Pr^{0.2}} = \frac{2}{3} Ar_0^{3/4} \left( \frac{2Re}{Ar / Ar_0 + Ar_0 / Ar} \right)^{2/3} \quad (2.6)$$

Burada  $Ar_0$ ,  $H/D$  'nin fonksiyonudur.

Popiel et. al. (21), düşük Reynolds sayılarında bir levha üzerine çarpan döner sıcak gaz jetinin oluşturduğu konvektif ısı aktarımı olayını incelemiş, Reynolds sayısını 1860 ve 1050,  $H/D$  oranını 5-8 alarak aşağıdaki korelasyonu tesbit etmişlerdir.

$$Nu = (0.65 + 0.084 H/D) Re^{0.5} Pr^{0.4} \quad (2.7)$$

Bouchez ve Goldstein(22), çapraz bir akım halindeki dairesel bir jetden ileri gelen soğutma etkisini incelemiştir. Üfleme hızının 12 m/sn ve lüle yüzey arası boşluk mesafesinin 6 olduğu durumda ısı aktarım katsayısı %62 verimle 700 W/m<sup>2</sup>K olarak bulunmuştur.

Hyracak(23), döner halde çarpan jetlerle düz bir yüzeyde oluşturulan ısı aktarımını Reynolds sayısının 14000 - 67000 aralığındaki değişen değerlerinde ve 3.18-12.7 mm arasında değişen lüle çaplarında incelemiş ve  $R < 0.9$  için,

$$Nu_0 = 1.53 Pr^{0.34} Re^{0.5} (H/D)^{-0.2} \quad (2.8)$$

şeklindeki korelasyonu elde etmiştir.

Boughn et.al.(24), düz bir yüzey üzerine çarpan ısıtılan döner jetin oluşturduğu ısı aktarım etkisini inceleyerek, ısı aktarımı yönünden verimin Reynolds sayısından bağımsız; fakat Jet sıcaklığına bağımlı olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Elison ve Webb(25), çarpan sıvı jetlerinin lokal ısı aktarımını laminar, geçiş ve türbülans rejimlerde serbest yüzey ve daldırılmış jetler ile incelemiştir. Reynolds sayısı 300-7000 jet çapları 0.584, 0.315 ve 0.246 mm olarak alınmıştır. Nusselt sayısının Reynolds sayısına bağımlılığının laminar akımda  $Nu \propto Re^{0.8}$ , türbülans akımda  $Nu \propto Re^{0.5}$  şeklinde olduğu bulunmuştur. Bu ilişkilerin hem serbest yüzey hemde daldırılmış jetler için geçerli olduğu belirtilmiştir.

Goldstein ve Behbahani(26) ,çapraz akımlı ve çapraz akımsız dairesel çarpan jetler için lokal ısı aktarım katsayılarını belirlemişlerdir. Normal (dik) çarpan jetler için maximum Nusselt sayısı (lüle-plaka arası boşluk mesafesinin 12 birim olduğu durumda) çapraz akımın artması ile azalmıştır ve  $H/D=6$  için maximum Nusselt sayısı çapraz akımın artması ile artmıştır.

Lee et.al.(27), sıvı kristal kullanarak düz bir yüzeye çarpan elliptik bir jetle elde edilen lokal ısı aktarım ölçümlerini Reynolds sayısı aralığı 5000 -20000,  $H/D$  aralığı 2-10 için incelemiştir. Bütün Reynolds sayılarında ve  $H/D$ 'nin 4-10 aralığındaki değerlerde lokal Nusselt sayısı radyal mesafe artışı ile azalmıştır.  $H/D$ 'nin 2-6 aralığı için  $Nu \propto Re^{0.5}$  ve  $H/D=10$  için  $Nu \propto Re^{0.74}$  şeklinde ilişkiler bulunmuştur. Çarpma bölgesinde elliptik jetten elde edilen Nusselt sayısının dairesel jetten elde edilen Nusselt sayısından daha büyük olduğu gözlemlendi.

Huang ve Genk(28), düz bir yüzeye çarpan dairesel jetin ısı aktarımını, lokal ve ortalama Nusselt sayısını bulmak amacıyla bir çalışma yaptılar. Yüksek Reynolds sayısında ( $6.110^4 \leq Re \leq 1.2410^5$ ) ve  $H/D=8$ 'de maximum Nusselt sayısı elde edilmiştir. Bu çalışmada

$$Nu = Re^{0.76} Pr^{0.42} (a + bH + cH^2) \quad (2.9)$$

şeklinde bir korelasyon elde edilmiştir. a, b ve c sabittir.

Goldstein et.al.(28),dairesel çarpan hava jetinin lokal ısı aktarım katsayısı ve dönüşüm faktörünün dağılımını incelemiştir. Dönüşüm faktörünün lüle-plaka arası boşluk değerine bağımlı fakat Reynolds sayısından bağımsız olduğunu tespit etmişlerdir. Yaklaşık olarak çapın 7 katı mesafede maksimum durgunluk bölgesi ısı aktarımı meydana gelmiştir. Isı aktarımının en iyi  $Nu \propto Re^{0.76}$  şeklinde korele edildiği belirlenmiştir.

Boughn ve Shimuza (30), uniform ısı akıllı çarpan jet ile ilgili olarak bir yüzyedeki ısı aktarım ölçümlerini deneysel olarak incelemiştir. En ilginç dağılımlardan biri  $H/D=2$  de oluşmuş ve bu durumda maksimum ısı aktarım katsayısı durgunluk noktasında meydana gelmiştir.

Donaldsan et.al.(31),serbest jet türbülans yapısının ve jet çarpmasının ısı aktarım boyutunu incelemiştir. Reynolds sayısı 8000 ile 20000 ,lüle çıkışı ile yüzey arası boşluk mesafesi 6 ile 20 arasında seçilerek parametre etkileri değerlendirilmiştir.

### ***1.3.3. Çarpan Jetler ile İlgili Kütle Aktarım Çalışmaları***

Çarpan jetlerle kütle aktarım incelemeleri ısı aktarımı kadar ilgi görmemiş olup bu konu ile ilgili çalışma çok azdır.

Gapola ve Venkateswarlu (5) , düz bir yüzey üzerine çarpan daldırılmış multijetlerin mevcudiyetinde aşağıdaki sonuçları elde etmiştir:

1)Sınırlayıcı akım yoğunluğu ile radyal mesafede yapılan çalışmalar 2 bölgenin varlığını gösterir ki bu bölgeler Çarpma bölgesi ve Duvar Jet bölgesidir,

2)Duvar Jet bölgesi radyal mesafe arttıkça azalan sınırlayıcı akım ile karakterize edilirken, çarpma bölgesi, sınırlayıcı akımın hemen hemen sabit değerleri ile belirtilir,

3)Her iki bölgede de delik sayısındaki azalma kütle aktarım katsayısını azaltmıştır,

4)Çarpma bölgesinde hedef yüzey ile dağıtıcı arasındaki boşluk mesafesinin artması kütle aktarım katsayısını azaltmıştır,

5)Çarpma bölgesinde, kütle aktarımı aşağıdaki 2.10 korelasyonu ile verilir.

$$(Sh/Sc^{0.33})^{0.4} (H/D)^{0.25}=0.0102 (Re)^{0.6} \quad (2.10)$$

Duvar Jet bölgesi ise aşağıdaki korelasyon ile karakterize edilir:

$$(Sh/Sc^{0.33})(N)^{-0.4} =0.014.(Re)^{0.52} \quad (2.11)$$

Chin ve Hsueh (32), daldırılmayan dairesel çarpan jetlerin sınır tabaka rejiminde ve çarpma bölgesindeki ortalama kütle aktarım hızını, sınırlayıcı difüzyon akım tekniğini kullanarak ölçmüşlerdir. Reynolds sayısı 2500-20000, H/D oranı 0.1-5 ve aktif kütle aktarım alanı çapları lüle çapının 0.1-5 katı arasında değişmektedir. Tüm deneyler 23°C sıcaklıkta yapılmış ve elektrolit çözeltisi olarak potasyum ferrisiyanür ve potasyum ferrosiyanür karışımı kullanılmıştır.

0.5 < H / D < 5 için çarpma bölgesinde ve duvar jet'in sınır tabaka bölgesinde aşağıdaki korelasyonlar elde edilmiştir.

$$R/D < 0.8 \text{ için} \quad Sh=0.9Re^{1/2}Sc^{1/3} (H/D)^{-0.09} \quad (2.12)$$

$$0.8 < R/D < 4 \text{ için} \quad Sh=0.77 Re^{1/2}Sc^{1/3} (R/D)^{-1/2} \quad (2.13)$$

Popiel ve Boguslawski (4), düz bir yüzey üzerine çarpan dairesel bir jet'in oluşturduğu ısı/kütle aktarımına ait akım şekillerini incelemişlerdir. Radyal yönde oluşan kütle aktarım katsayısı naftalinin süblimasyonu tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Çalışma sonucu akım karakteristikleri kütle aktarımının radyal dağılımı, durgunluk noktasındaki kütle aktarım ölçümleri ve korelasyonları verilmiştir

## **2. DENEYSEL YÖNTEM**

### **2.1. Materyal ve Metod**

Düz bir yüzey üzerine çarpan jet kullanımıyla elde edilen kütle aktarım karakteristik değerleri, elektrokimyasal sınırlayıcı difüzyon akım tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Deney sistemine ve göz önünde bulundurulan parametrelere geçmeden önce elektrokimyasal sınırlayıcı difüzyon akım tekniği hakkında bilgi verilecektir.

### **2.2. Elektrokimyasal Sınırlayıcı Difüzyon Akım Tekniği**

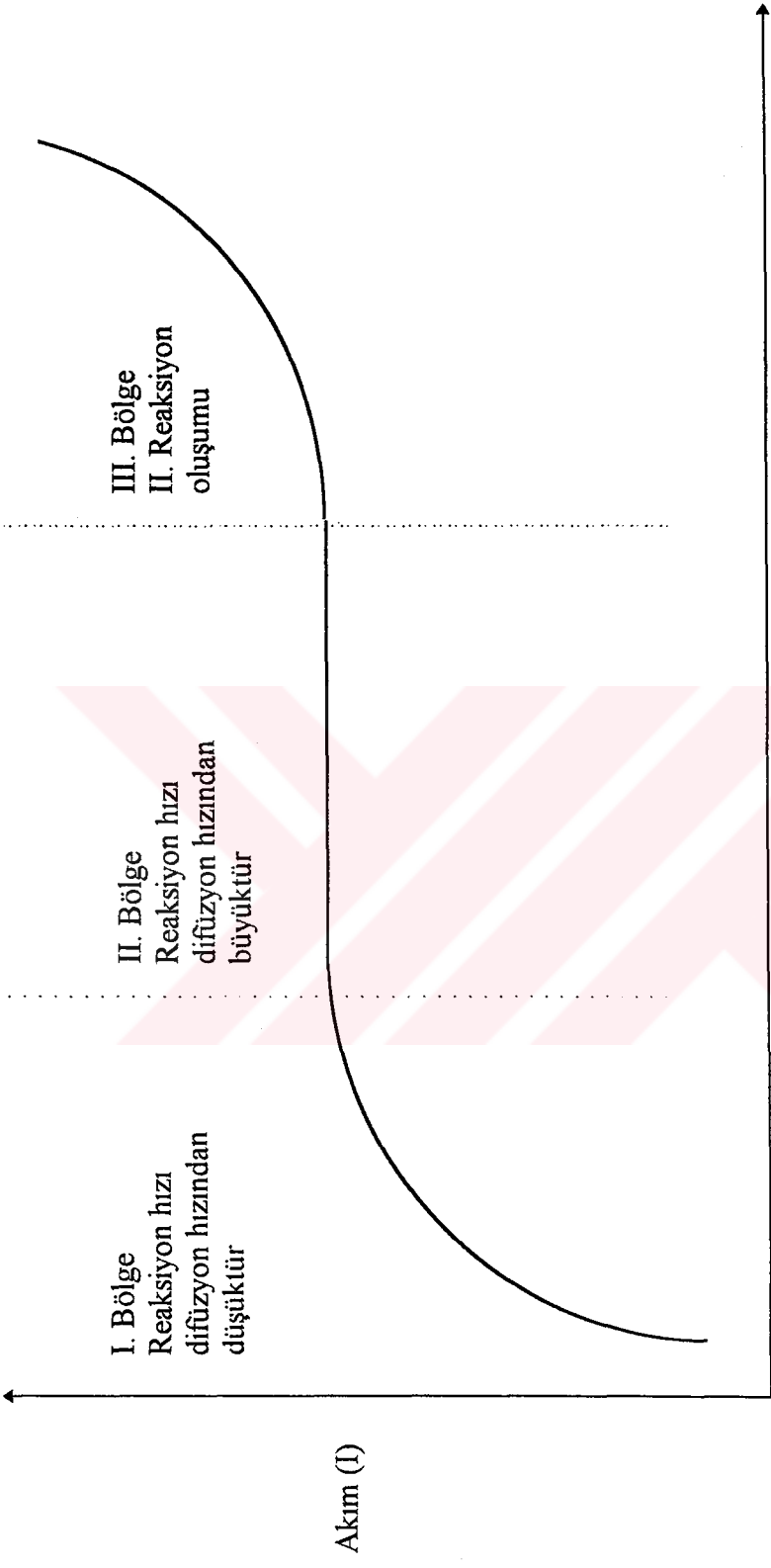
Kütle aktarımı çalışmalarında akım ve konsantrasyon alanının belirlenmesi için elektrokimyasal tekniklere geniş ölçüde başvurulmaktadır(33). Bu teknik lokal ve ortalama kütle aktarım katsayıları, hız ve momentum, momentum ve kütle türbülans sıçramaları ölçümlerinin çok kolay ve hızlı bir şekilde yapılmasına imkân verir. Bu metodun kullanımıyla elde edilen veriler, analogi yardımı ile ısı aktarım hesaplamalarında da kullanılabilir.

Aktif iyon ihtiva eden bir elektrolit çözeltisi içerisine 2 elektrot daldırılır ve bu 2 elektrot arasına artan bir şekilde potansiyel fark uygulandığı zaman, Şekil 3 ile gösterilen potansiyel fark-akım eğrisi elde edilir. Şekil 3'ten de görüleceği gibi bu eğri 3 bölgeye ayrılır. Elektrolit hücrenin içindeki çözelti konsantrasyonunun homojen olduğu kabul edilerek;

1) Uygulanan potansiyel fark düşük olduğu zaman elektrot yüzeyi üzerindeki reaksiyon hızı, reaktantların yüzeye aktarım hızından (reaktant'ın film tabakasından difüzyon hızı ) daha yavaştır veya bu hıza eşittir.

2) Potansiyel fark artırıldığı zaman, belirli bir potansiyel farkından sonra reaksiyon hızı, reaktant'ın film tabakasından elektrot yüzeyine aktarım hızından daha hızlı olur. Böylece





Uygulanan Potansiyel Farkı (V)

Şekil 3. Potansiyel Fark-Akım Eğrisi

akımın sabit kaldığı bir plato bölgesi elde edilir. Bu durumda elektrot yüzeyine ulaşan reaktant reaksiyonla hemen tükenir, böylece; elektrot yüzeyi üzerinde reaktant konsantrasyonu sıfır olur. Proses, yani sistemden geçen akım, iyonların film tabakasından difüzyonu ile kontrol edilir. Bu bölgede elde edilen akıma “Elektrokimyasal Sınırlayıcı Difüzyon Akımı” adı verilir.

Şekil 3’ de gösterilen 3. bölge’de, sistemde diğer bir reaksiyon meydana gelmeye başlar. Bu genellikle çözücü ayrışması, yani katotda hidrojen oluşumudur.

Sınırlayıcı akım halinin kontrol edici faktörü reaktant’ın elektrot yüzeyine gelmesi olduğundan dolayı, elektrolitik çözelti içerisindeki reaktantların bir yerden başka bir yere aktarımını değerlendiren mekanizma direkt olarak sınırlayıcı akıma dayandırılır(34).

Elektrot yüzeyine gelen akımlar difüzyon, migrasyon ve yığın akış olaylarıdır. Yani;

$$I_{\text{Toplam}} = I_{\text{difüzyon}} + I_{\text{migrasyon}} + I_{\text{yığın akış}} \quad (3.1)$$

Bu elektrokimyasal metod kullanıldığı zaman genel amaç elektrik alanı içindeki kütle aktarım değerlerinin verilen bir akış durumu için bulunmasıdır. Migrasyon katkısının bertaraf edilerek prosesin tamamen difüzyonla meydana gelmesi istenir. Dolayısıyla mümkün olduğu kadar bu aktarım bertaraf edilir. Bunun için çözeltiliye reaktif olmayan kuvvetli bir elektrolit fazlıca ilave edilerek sistemdeki potansiyel gradyent bertaraf edilir ve proseste migrasyon olayı da giderilmiş olur. Sınır tabaka içinde yığın akış katkısında ihmal edilebilecek derecede olduğundan;

$$I_{\text{toplam}} = I_{\text{difüzyon}} \quad (3.2)$$

ifadesi yazılabilir.

Bir elektrot için tek yönlü, tek boyutlu kütle aktarımı Nerst-Planck (3.3) eşitliği ile verilir.

$$N_i = -D_i \left( \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) - (z_i \cdot F / RT) \cdot D_i \cdot C_i \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + C_i \cdot V_x \quad (3.3)$$

Difüzyon                      Migrasyon                      Yığın Akış

Aktif elektrolit çözeltisi içine destek elektrot ilavesiyle migrasyondan gelen akım bertaraf edilir ve konveksiyonla iyon aktarımı ihmal edilirse; yukarıdaki (3.3) eşitliği basitleşir:

$$N_i = -D_i (\partial C_i / \partial x) \quad (3.4)$$

$$-D_i / \partial x = k \quad (3.5)$$

$$\partial C_i = (C_{i\infty} - C_{ie}) \quad \text{olarak alınırsa;} \quad (3.6)$$

$$N_i = k (C_{i\infty} - C_{ie}) \quad (3.7)$$

Sınırlayıcı akım koşulları elde edildiği anda aktif iyon konsantrasyonları yüzeyde sıfır olacağından:

$$N_i = k C_{i\infty} \quad (3.8)$$

elde edilecektir.

Faraday Kanunu'na göre reaksiyon veren iyonların yüzeye aktarımı sınırlayıcı akım miktarıyla doğru orantılı olup aşağıdaki şekilde verilir.

$$N = I_L / zAF \quad (3.9)$$

(3.8) ve (3.9) eşitlikleriyle sistemdeki kütle aktarımını doğrudan sınırlayıcı akıma bağlayan aşağıdaki denklem elde edilir.

$$k = I_L / z A F C_{i\infty} \quad (3.10)$$

Elektrokimyasal sınırlayıcı difüzyon akımı tekniği., kütle aktarım çalışmalarında önemli faydalar ve üstünlükler sağlar(35). Bunlar;

- 1)Kütle aktarım hızları elektriksel akım ile kesin ve direkt olarak ölçülebilir,
- 2)Aktarım hızları , sistem içindeki dalgalanmalar ve cevaplar kolayca gözlenebilir,
- 3)Elektrot yüzeyinde sınır şartlarının kesinliği söz konusudur,
- 4)Kütle aktarım hızının yüzey üzerindeki hız profiline doğrudan bir fonksiyonu olduğu için sınırlayıcı difüzyon akımı hız profiline, kesme gerilimi dağılımını ve türbülent akışı incelemek için kullanılabilir,
- 5)Sistem içinde meydana gelen akış hızının değişiminin etkisi anında görülebilir,
- 6)Kimyasal kararlılık, aktif iyonların yüksek oranda çözünürlüğü, tam tanımlanabilen bir plato verecek yeterli elektrot potansiyele ve düşük fiata sahip olması .

Kütle aktarımı ile ilgili yapılan çalışmalarda en çok kullanılan elektrokimyasal çözeltiler aşağıda verilmiştir:

A) Destek Elektrolit : Sodyum hidroksit

Aktif Elektrolit : Potasyumferri siyanür ve potasyum ferrosiyonür.

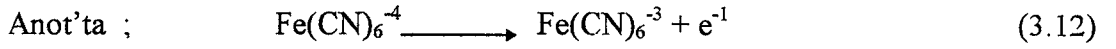
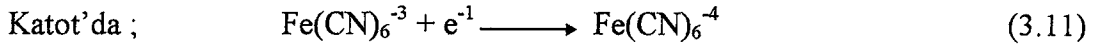
B) Destek Elektrolit : Sülfirik asit

Aktif Elektrolit : Bakır sülfat

Yapılan deneylerde konvektif proses uygulamaları için uygun olan (A) çözeltisi kullanılmıştır. (B) çözeltisi ile yapılan çalışmalarda metal bozunma prosesinden dolayı

zamanla yüzey değişimi söz konusudur. Kütle aktarım çalışmasında yüzeyinin zamanla değişmemesi gerekli olduğu için (A) çözeltisi tercih edilmiştir.

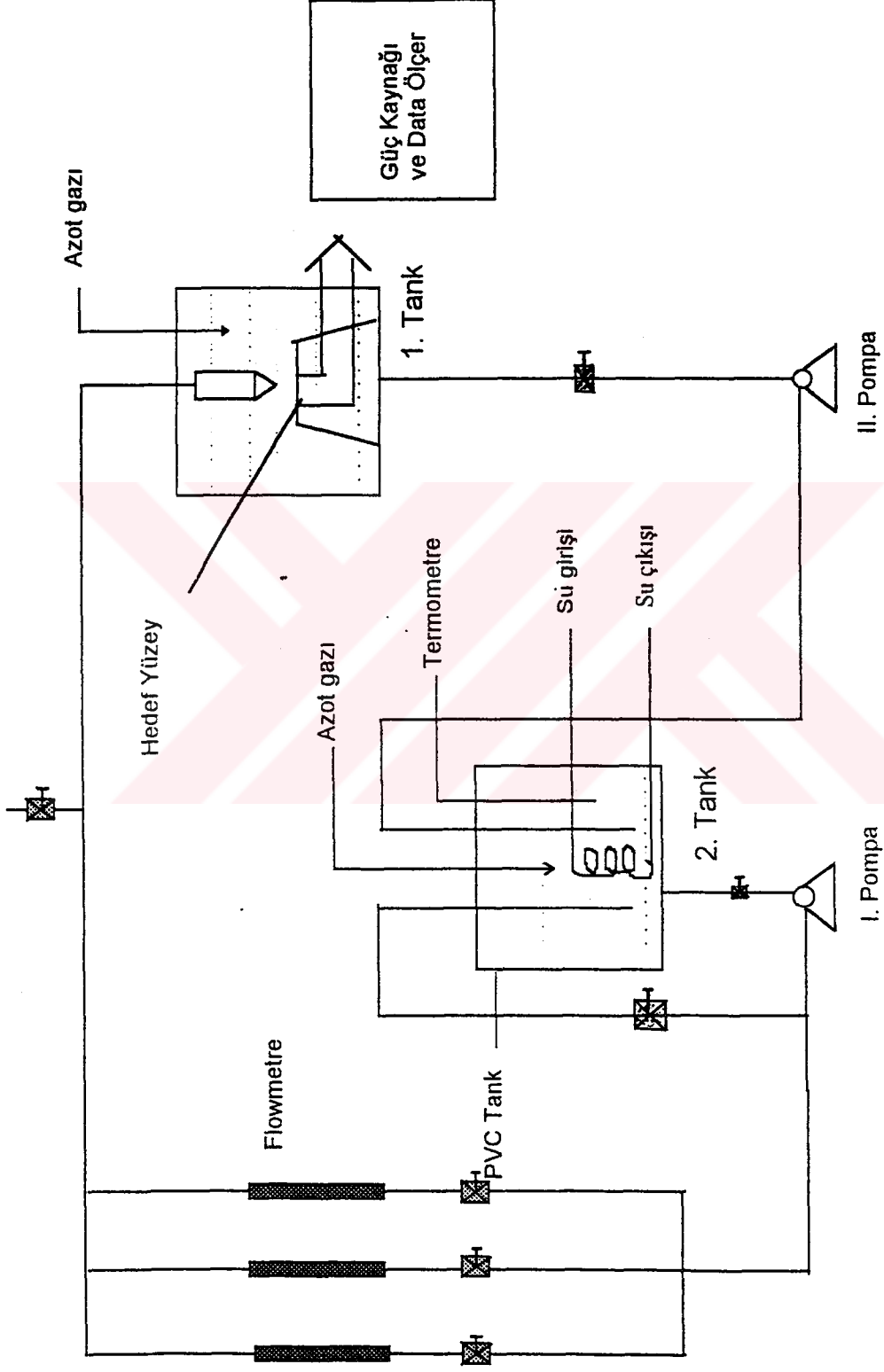
Kullanılan elektrolit / elektrot sistemi potasyum ferrisiyonür ve potasyum ferrosiyonür ile nikel'den yapılan katot ve anot elektrot sistemidir. (A) çözeltisi ve katot ile anot'un bulunduğu hücrede, elektrotlara potansiyel fark uygulandığı zaman ;



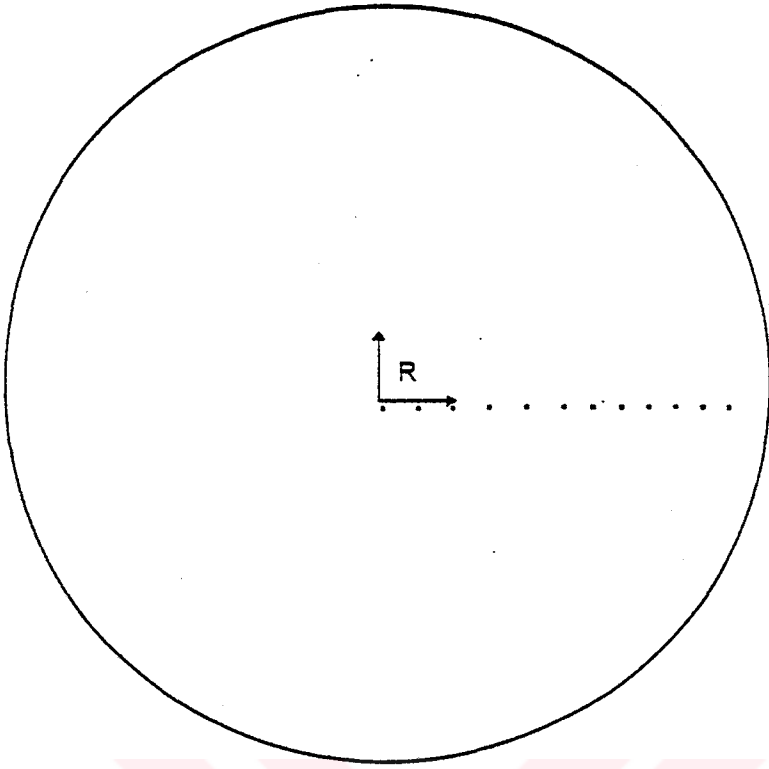
reaksiyonları meydana gelir. Reaksiyonun katodik kontrollü olduğundan emin olmak için anod yüzey alanı katot yüzey alanından fazla tutulur. Böylece sistemde aktif iyonların konsantrasyonları sabit kalır.

### 2.3.DENEY SİSTEMİ

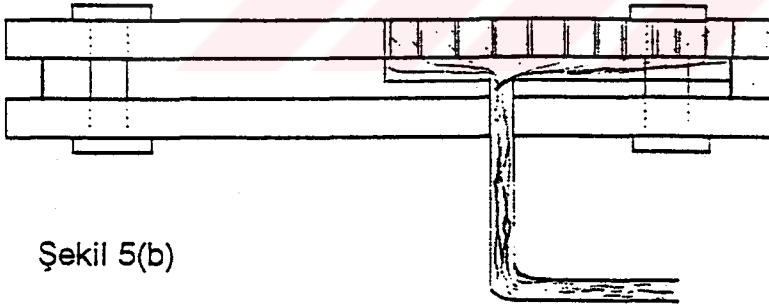
Deney sistemi şekil (4) de, hedef yüzey üzerindeki elektrotların konumu şekil (5.a-b) de ve teflon lüle şekil (6) ile gösterilmiştir. Deney sistemindeki tüm bağlantılar ( boru, vana, tank, vs.) elektrolite tesir etmemesi için PVC ' den yapılmıştır.Elektrolit 60 litrelik PVC tankından bir pompa yardımı ile istenen Reynolds sayısını elde etmek için flowmetrelere gönderildi. İstenen Reynolds sayısına ayarlanan elektrolit çözeltisi,birbiri içinden geçmeli teflon kütüklerle yapılan ve jet oluşumunu sağlayan lüle içinden geçerek 1.tank içinde bulunan ve üzerinde elektrotların yerleştirildiği hedef yüzey üzerine püskürtülerek jet çarpması sağlanmıştır. 1. tanktaki sıvı seviyesi, hedef yüzey ve lüle'nin elektrolit çözeltisi içerisinde kalacak şekilde, sabit tutuldu. Bu işlem için 1. tank altına başka bir pompa yerleştirildi. Herhangi bir tehlikeye karşı 2. tanktan alınan ve 1. pompa ile flowmetrelere gönderilen çözeltinin bir kısmına by-pass yaptırıldı. Difüzyon katsayısının sıcaklıkla güçlü bir ilişkisi olduğundan dolayı (34) sıcaklık kontrolü için sisteme su soğutmalı bir serpantin yerleştirilerek sistemdeki çözelti sıcaklığı  $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$  'de tutuldu.



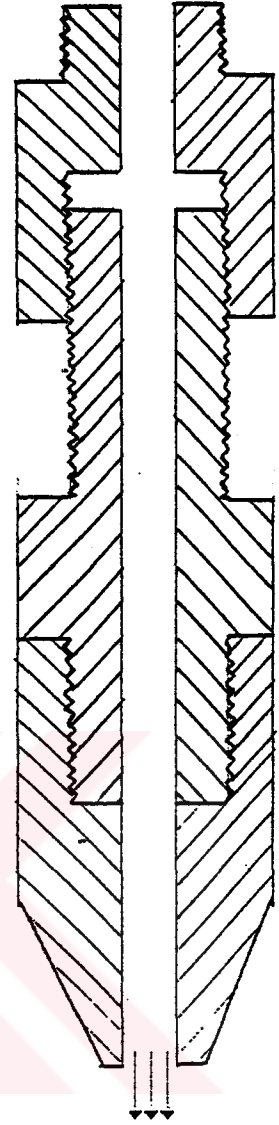
Şekil 4. Deneysel Sistemi



Şekil 5(a).



Şekil 5(b)



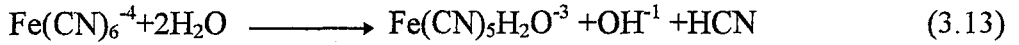
Şekil 6.

Şekil 5(a). Hedef yüzeyin üstten görünüşü

Şekil 5(b). Hedef yüzeyin önden görünüşü

Şekil 6. Teflondan yapılmış iç içe geçebilen lüle

Hazırlanan sodyum hidroksit çözeltisinden, aktif iyonların ilavesinden önce, azot gazı geçirilerek oksijenin çözelti üzerine olumsuz etkisi indirildi. Aksi takdirde ferrisiyanür iyonları oksitlenir ve çözünmüş oksijen katotta indirgenirdi. Elektrolit çözeltisini ışıktan korumak için sisteme ışık girmeyecek şekilde tedbirler alındı. Çünkü; potasyum ferrisiyanür aşağıdaki reaksiyonda gösterildiği gibi ışık ile hidrojen siyanür oluşturarak bozunur (33) . Bu bozunma katot yüzeyinde kirlilik oluşturur.



Hedef yüzey üzerinde bulunan her bir elektrottaki akımı ölçmek ve potansiyel farkı oluşturmak için güç kaynağı, ampermetre ve voltmetre kullanıldı.

Jet oluşturucu, teflon kütükten yapılmış birbiri içinden geçmeli ve jet çıkış kısmı ile hedef yüzey arası boşluk mesafesi değiştirilebilecek şekilde yapılmıştır. Bunların yardımı ile deneylerimizde H/D oranlarını ayarlamamız mümkün olmuştur.

Hedef yüzey üzerinde bulunan elektrotlar 1 mm çapında ve %99.99 saflıkta nikel tellerle yapılmış ve hedef yüzey üzerinde çeşitli mesafelerle yerleştirilerek deneylerde R/D oranı etkisi gözlenmiştir.

Hedef yüzey, 12 cm çapında dairesel bir yüzey olup bir teflon kütük yardımı ile I. tank içerisinde yerleştirilmiştir. Tek bir merkezi elektrot çevresinde radyal yöndeki elektrotlar bu yüzey üzerindedir. Bu elektrotlar yüzey üzerine plastik çeliği yapıştırıcı ile pürüzlülük oluşturmayacak şekilde yerleştirilmiştir.

Deneylerde kullanılan çözeltinin fiziksel özellikleri Tablo (2.1)'de verilmiştir(36).

Ayrıca deneye başlamadan ve her bir ölçümden önce aşağıda belirtilen tedbirler alınmıştır:

1)Hedef yüzey üzerindeki elektrotlar sıfır zımpara ile önce mekanik olarak temizlendi ,



- 2)Elektrotlar seyreltik  $H_2SO_4$  ile inorganik ve sonrada  $CCl_4$  ile organik olarak temizlendi,
- 3)Bu işlemlerden sonra elektrotlar bol saf su ile yıkandı ,
- 4)Elektrot yüzeylerinin elektrokimyasal olarak temizlenmesi için aşırı potansiyel uygulanarak hidrojen oluşumu sağlandı ,
- 5)Tanktaki elektrolit her zaman azot gazı atmosferi altında tutuldu ,

**Tablo 2.1. NaOH , Potasyum ferrisiyanür, Potasyum Ferrosiyanür çözeltisinin 20 °C 'deki fiziksel özellikleri(36)**

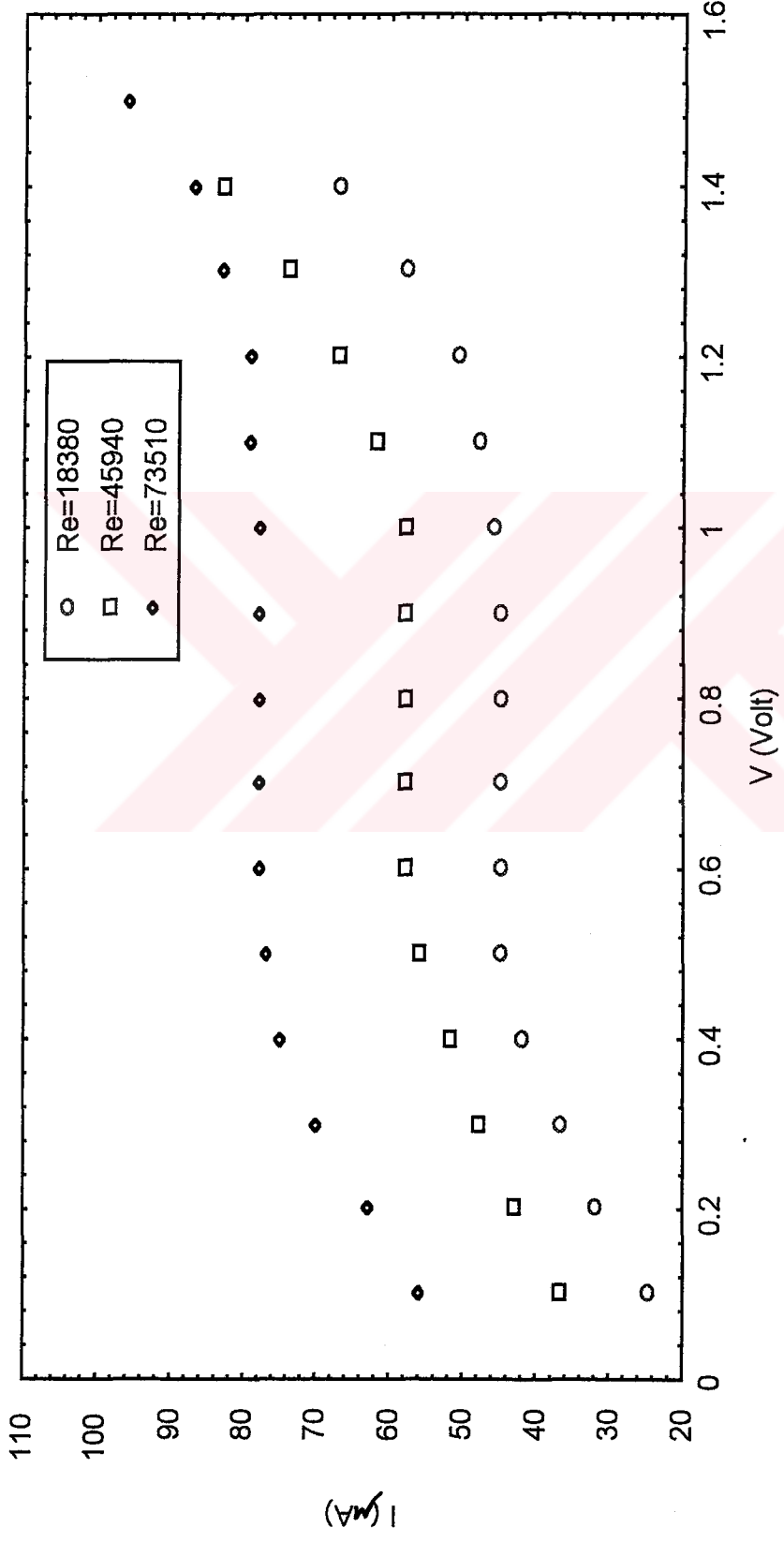
Yoğunluk, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1027.23
Viskosite, $\mu$ (kg/msn)	$0.9961 \times 10^{-3}$
Difüzyon katsayısı, $D_{ferri}$ (m <sup>2</sup> /sn)	$6.455 \times 10^{-10}$
Schmidt sayısı, Sc	1692

Yukarıda belirtilen tedbirler alındıktan sonra istenen akım hızı ve boşluk mesafesi değerlerinde merkezi elektrot'tan başlayarak radyal yönde yerleştirilmiş 12 elektrota 0.90 Voltluk potansiyel fark uygulandı ve herbir katotdaki akım değerleri ayrı ayrı kaydedildi.

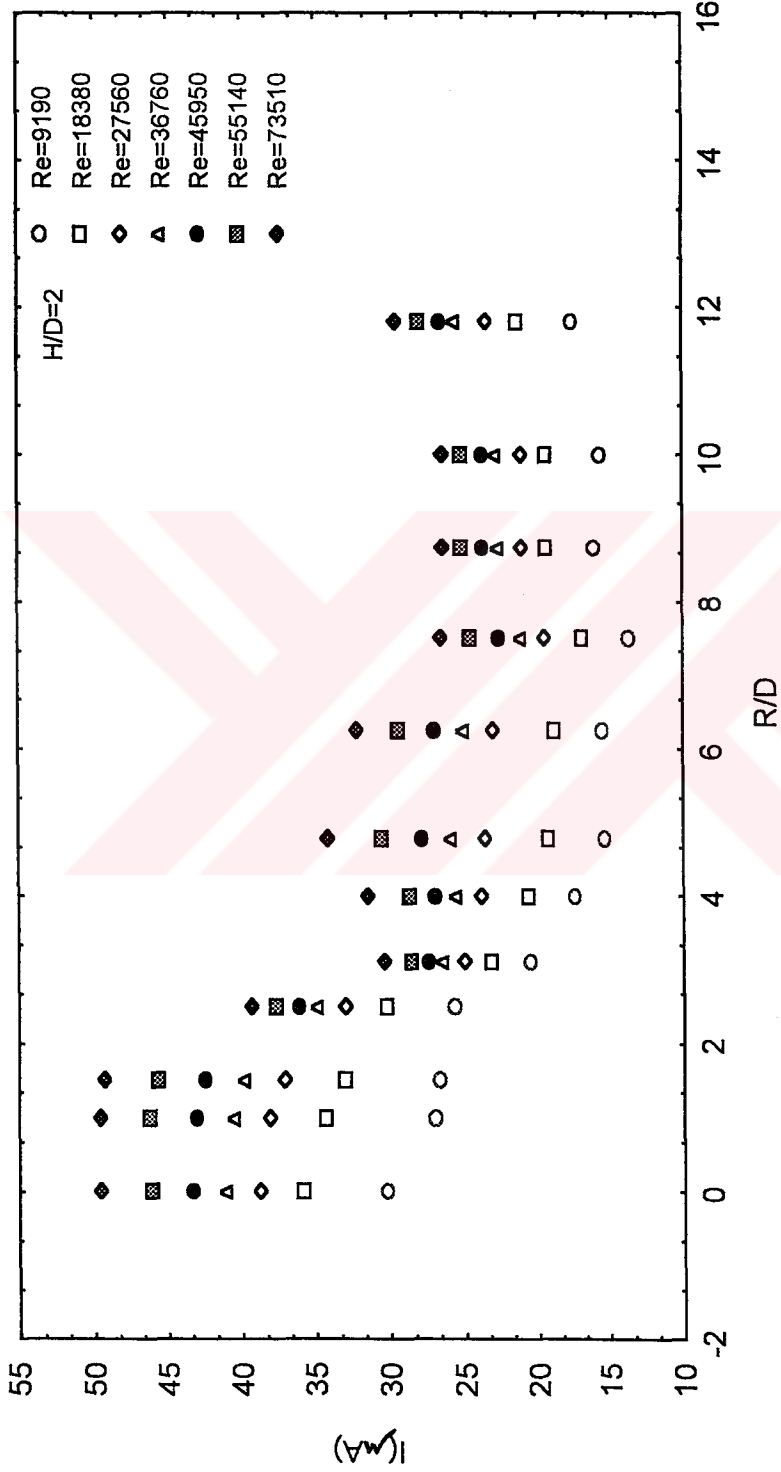
#### **4.SONUÇLAR VE TARTIŞMA**

Bu bölümde elektrokimyasal sınırlayıcı difüzyon akım şartlarında düzgün bir yüzeye çarpan jet'den elde edilen kütle aktarım ölçümleri verilmektedir. İlk olarak düzgün yüzey üzerinde bulunan elektrotlardan biri üzerinde değişik Reynolds sayılarında uygulanan voltaj-akım eğrisi elde edilerek (Şekil 7) deneylerimiz sırasında kullandığımız sınırlayıcı difüzyon akım şartını sağlayan uygun voltajı belirlemeye çalıştık. Şekil 7'den de görülebileceği gibi sınırlayıcı difüzyon akım şartını en iyi şekilde 0.9 Volt değerinde elde edebileceğimizi düşünerek deneylerimizi 0.9 Volt potansiyel değerinde gerçekleştirdik.

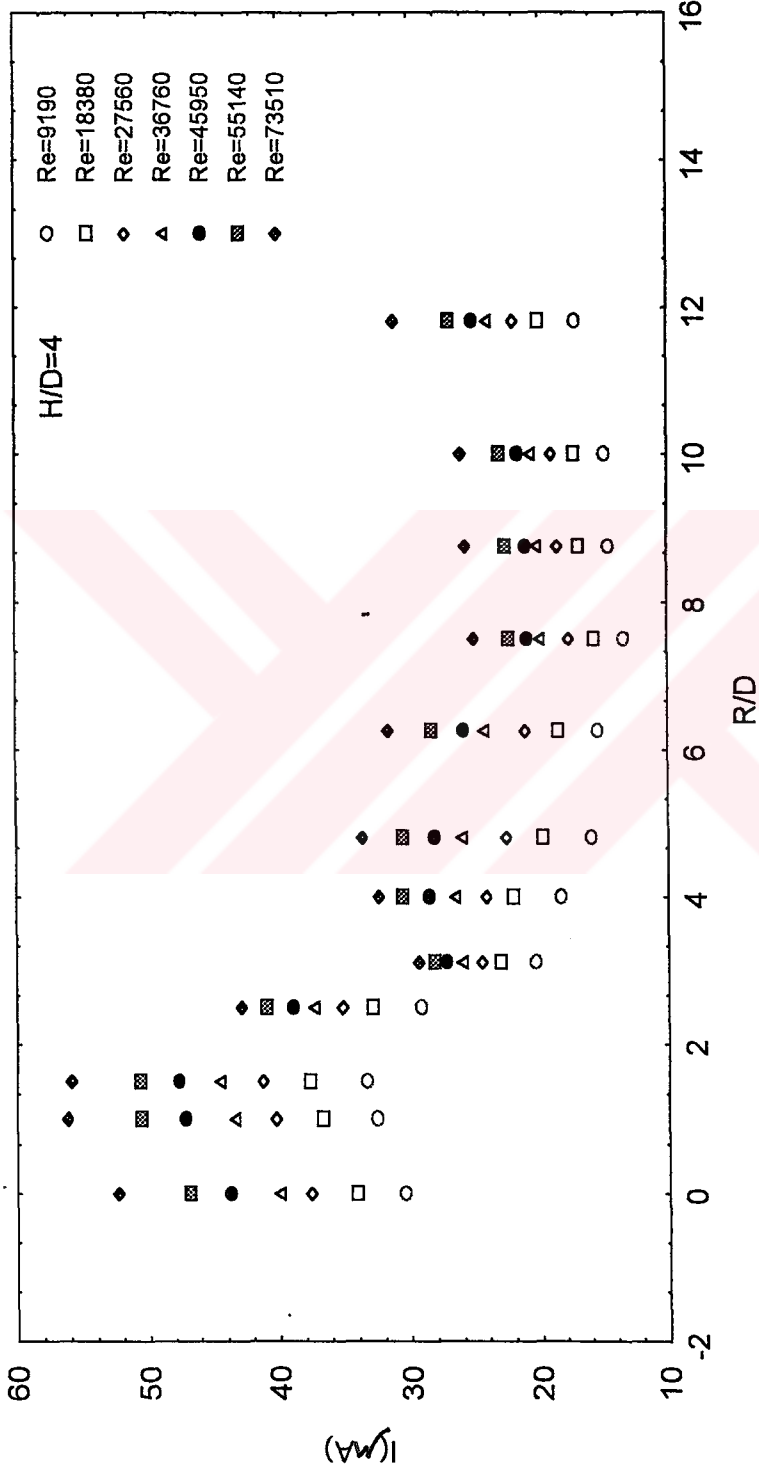
Daha sonra, 0.9 Voltaj değeriyle  $9190 \leq Re \leq 73510$ ,  $2 \leq H/D \leq 12$  ve  $0 \leq R/D \leq 12$  aralıklarında elde edilen sınırlayıcı akım değerleri ve bunun sonucunda elde edilen kütle aktarım karakteristik değerleri gösterilmiştir.



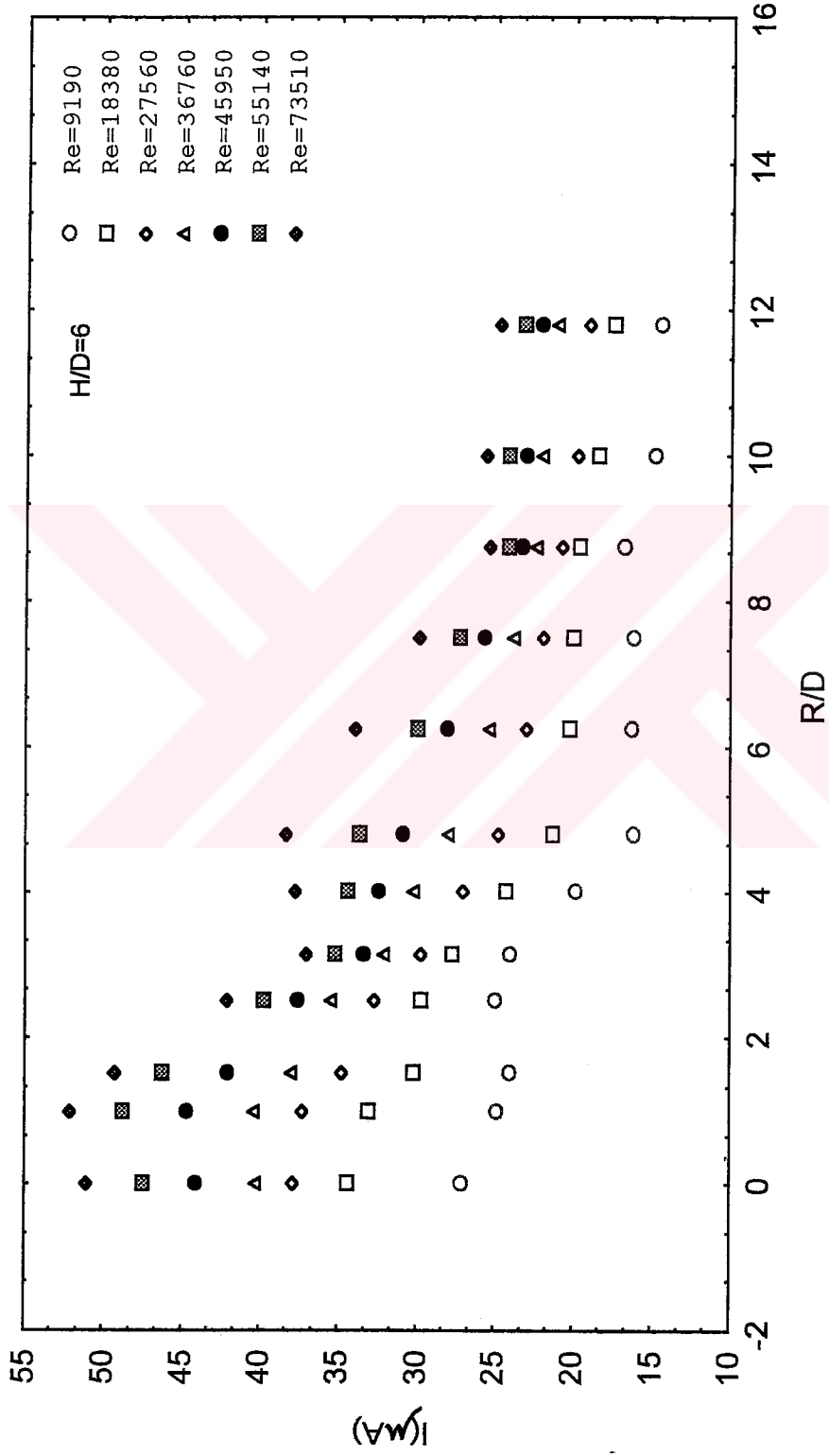
Şekil 7. Değişik Reynolds sayılarında düzgün yüzey üzerinde bulunan bir elektrota uygulanan Voltaj - Akım Eğrisi



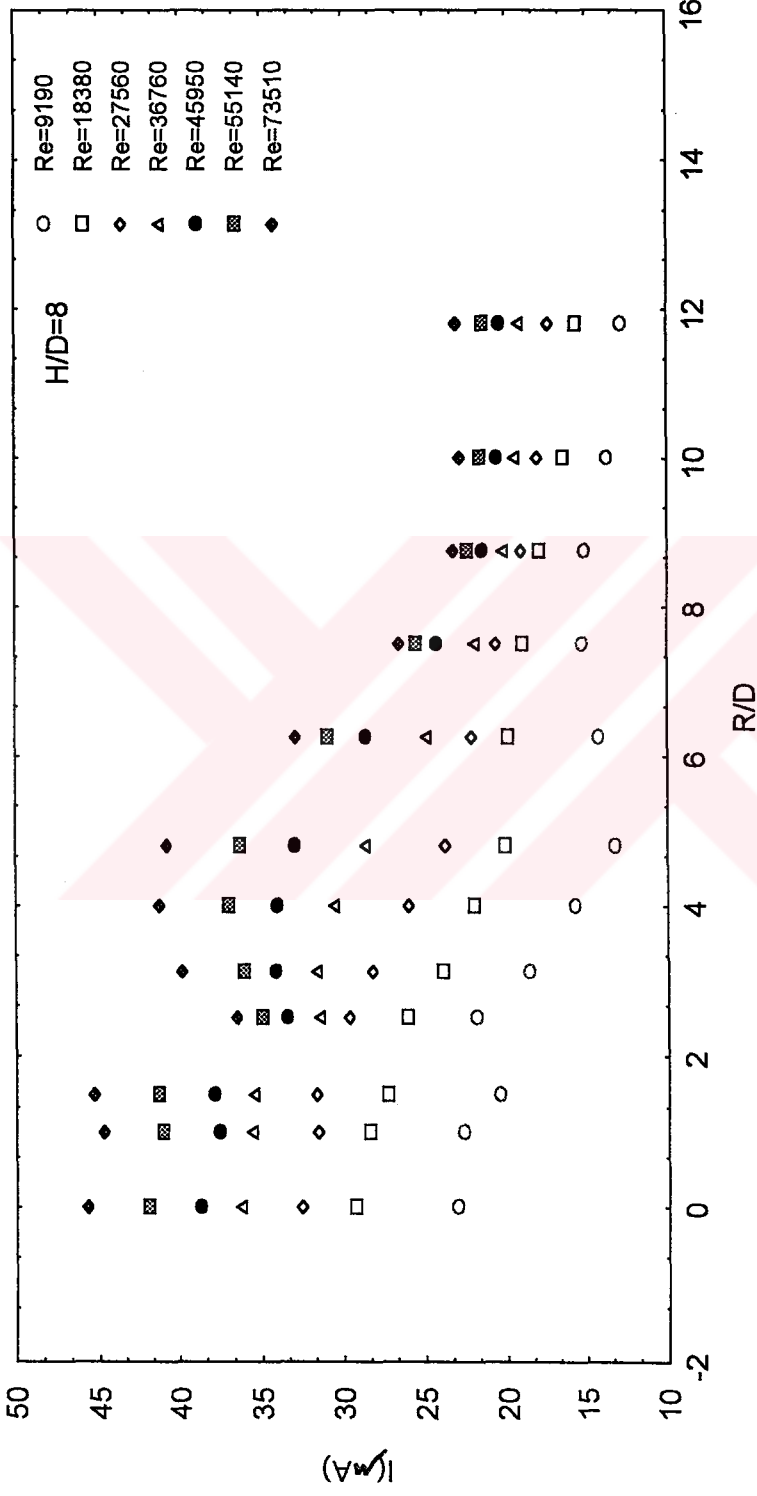
Şekil 8.  $H/D=2$  için sınırlayıcı akımın değişik Reynolds sayılarında çarpma yüzeyinde radyal yönde değişimi



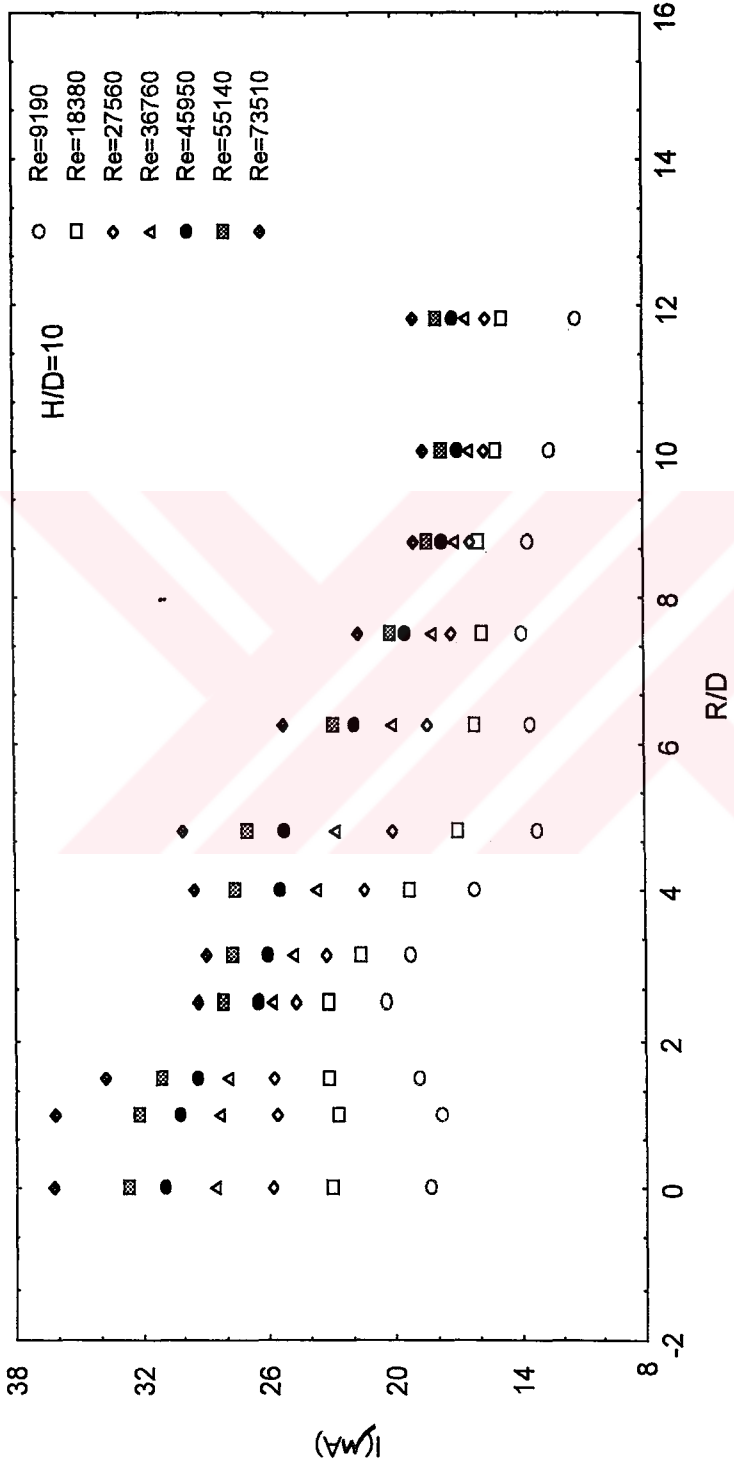
Şekil 9.  $H/D=4$  için sınırlayıcı akımın değişik Reynolds sayılarında çarpma yüzeyinde radyal yönde değişimi



Şekil 10. H/D=6 için sınırlayıcı akımın değişik Reynolds sayılarında çarpma yüzeyinde radyal yönde değişimi

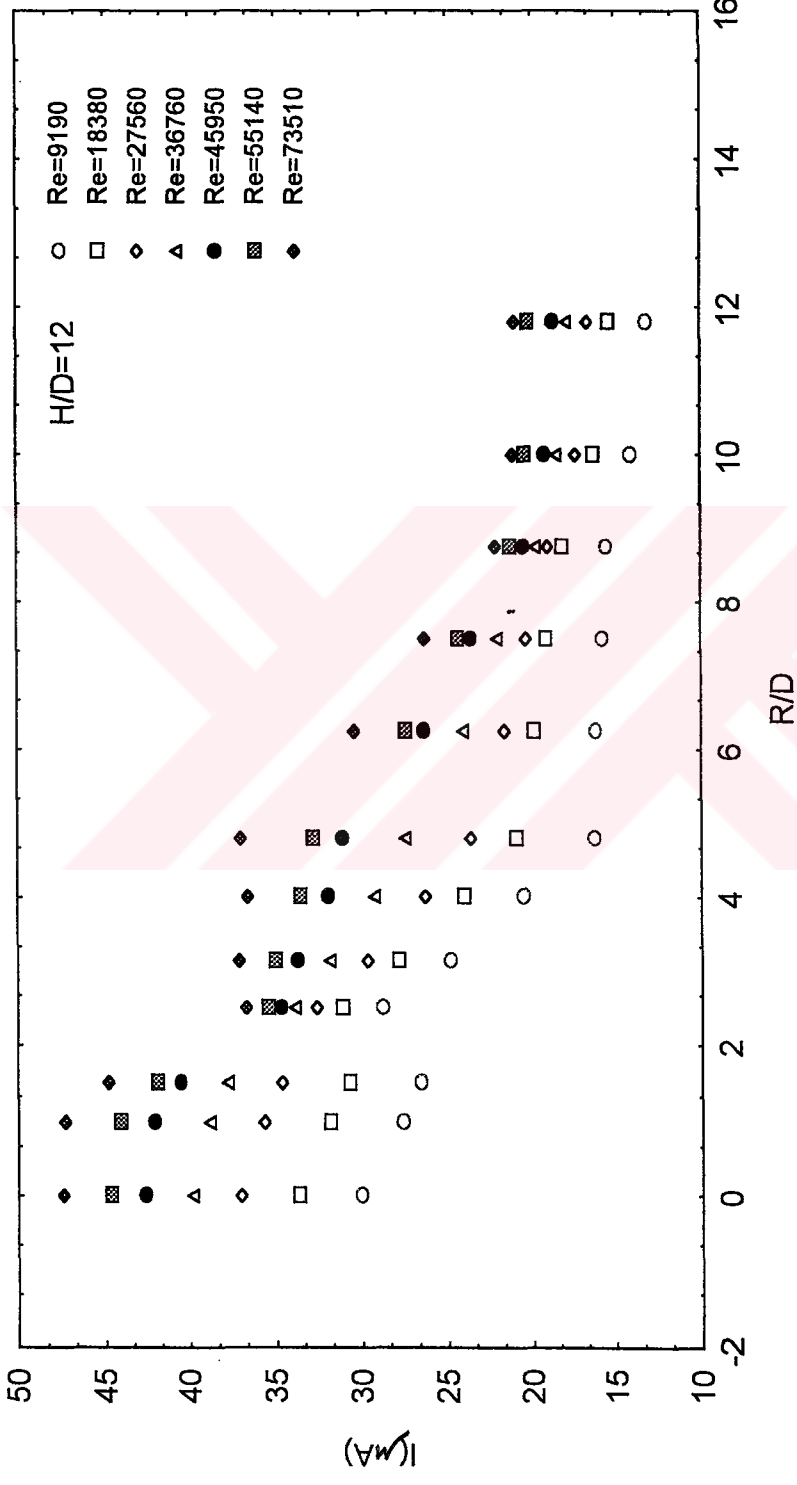


Şekil 11.  $H/D=8$  için sınırlayıcı akım değişik Reynolds sayılarında çarpma yüzeyinde radyal yönde değişimi



Şekil 12. H/D=10 için sınırlayıcı akımın değişik Reynolds sayılarında çarpma yüzeyinde radyal yönde değişimi





Şekil 13.  $H/D=12$  için sınırlayıcı akımın değişik Reynolds sayılarında çarpma yüzeyinde radyal yönde değişimi

Şekil 8-13 arasında bulunan grafiklere bakıldığı zaman görülür ki göz önünde bulundurulmuş  $H/D$  ve  $R/D$  değerleri her ne olursa olsun kullanılan elektrolit çözeltisinin Reynolds sayısı arttıkça sınırlayıcı akım değeri dolayısıyla da kütle aktarım katsayısı artmaktadır.

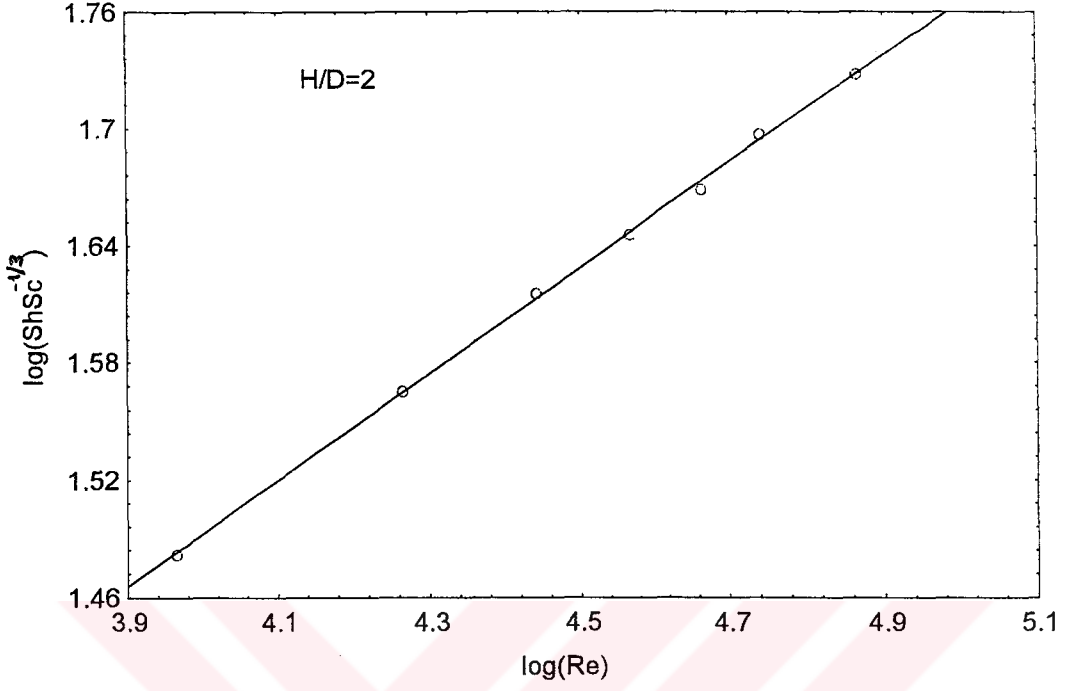
$0 \leq R/D \leq 4$  aralığının da ihmal edilebilecek küçük sapmalar dışında  $H/D$  ve Reynolds sayılarının değişik tüm parametrelerinde sınırlayıcı akımın radyal yönde değişimi yaklaşık olarak aynı davranışı göstermektedir. Sınırlayıcı akım değerinin hemen hemen sabit olduğu bölge çarpma bölgesi olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada  $0 \leq R/D \leq 2.5$  bölgesi çarpma bölgesidir. Literatürde (5) bu bölge  $0 \leq R/D \leq 3.2$  şeklindedir. Çarpma bölgesi özellikle  $H/D < 8$  değerlerin de bariz olarak gözlemlenmiştir.

$R/D > 4.5$  değerinden sonra bütün  $H/D$  ve Reynolds sayılarında elde edilen sınırlayıcı difüzyon akım değeri tedrici olarak azalır. Çarpma yüzeyi üzerinde radyal mesafenin  $4 \leq R/D \leq 12$  aralığına düşen bölge duvar jet bölgesi olarak tanımlanır ki; bu bölgede akışkan hedef yüzey üzerinde radyal yönde duvar boyunca akarken sınır tabaka kalınlığı artacağından kütle aktarım katsayısı da tedrici olarak azalır.

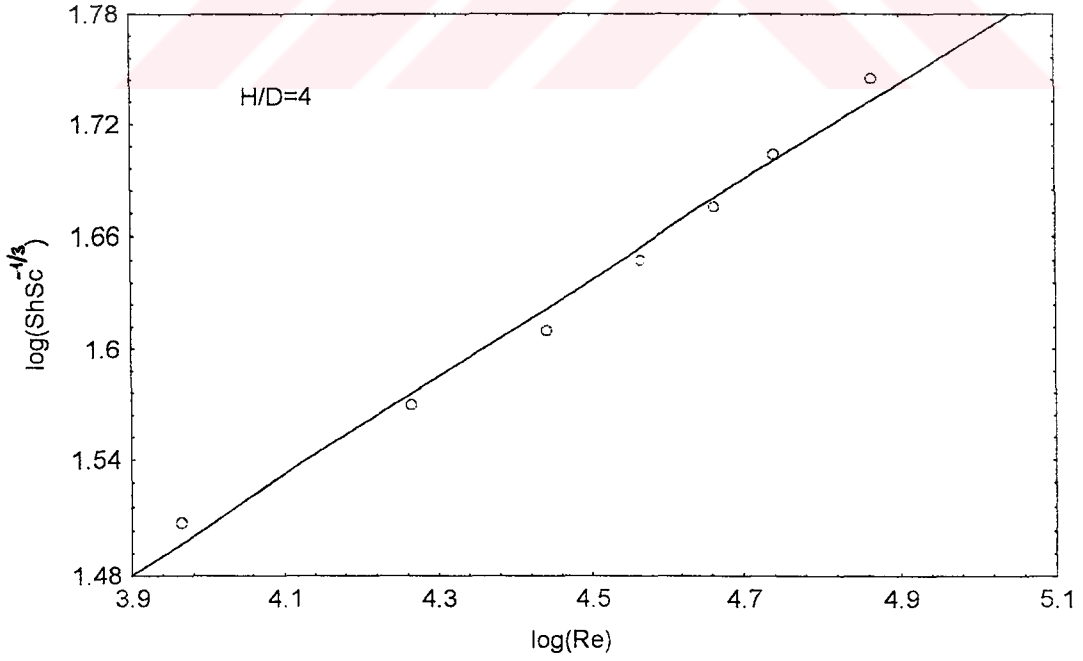
Şekil 8 ve 9 daki sınırlayıcı akımın radyal yöndeki değişimi  $H/D$ 'nin sırasıyla 2 ve 4 değerleri için verilmiştir. Bu değerler  $H/D$ 'nin en küçük değerleridir ve bu mesafede hedef yüzey jetin potansiyel öz bölgesi içinde yer almıştır. Çarpma jet ile hedef yüzey arasındaki etkileşimden dolayı kütle aktarım değişimi kompleks bir haldedir. Reynolds sayısının 45950, 55140 ve 73510 değerlerinde maximum ve minimum değerler gözlemlenmiştir.  $H/D$ 'nin küçük değerleri için ortaya çıkan bu değişimler çarpma jetler için karakteristik bir davranıştır (21).

Kütle aktarım katsayısı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

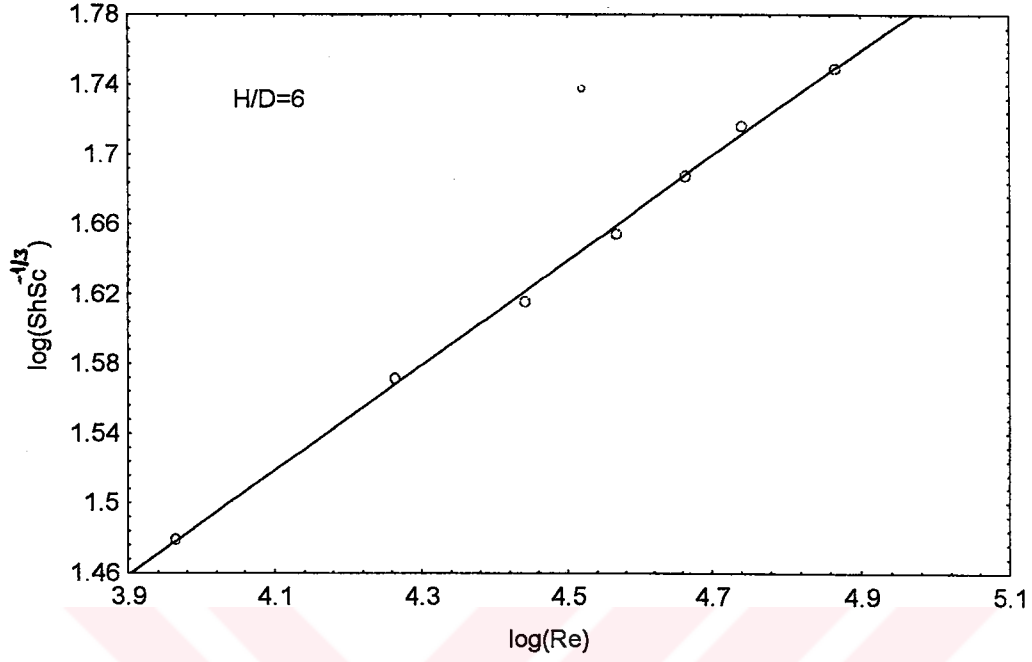
$$k = I_L / z A F C_{i\infty}$$



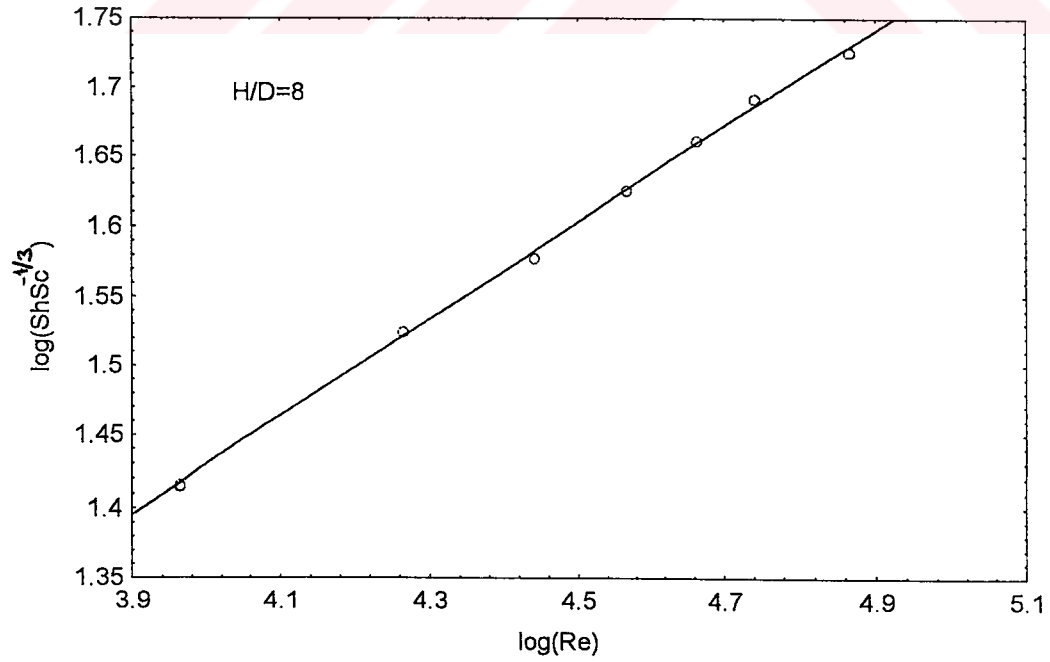
Şekil 14.H/D=2 için  $\log(\text{ShSc}^{-1/3})$  ile  $\log(\text{Re})$  'nin değişimi



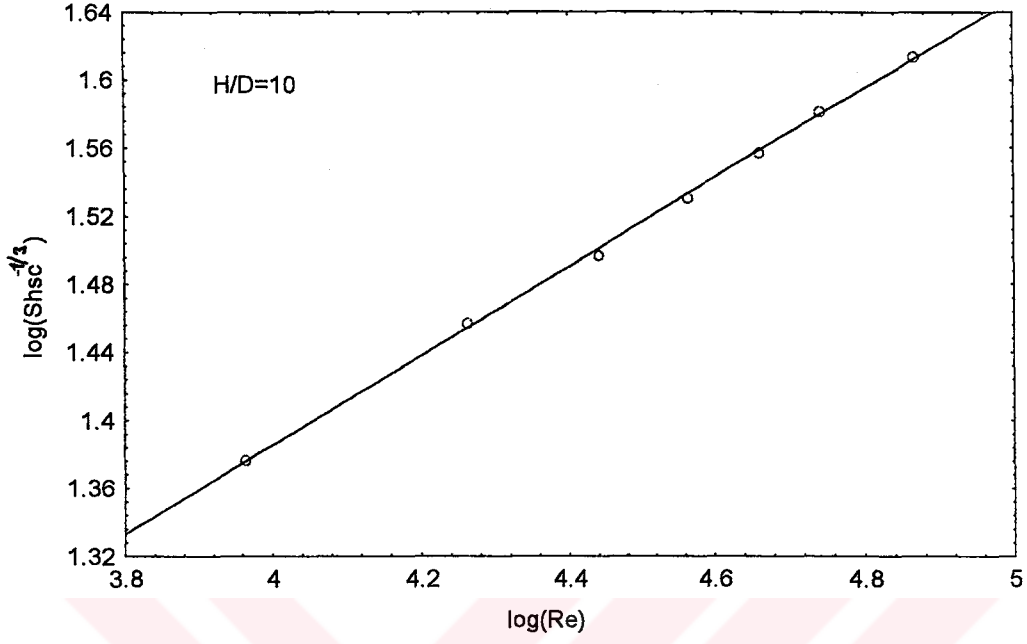
Şekil 15.H/D=4 için  $\log(\text{ShSc}^{-1/3})$  ile  $\log(\text{Re})$  'nin değişimi



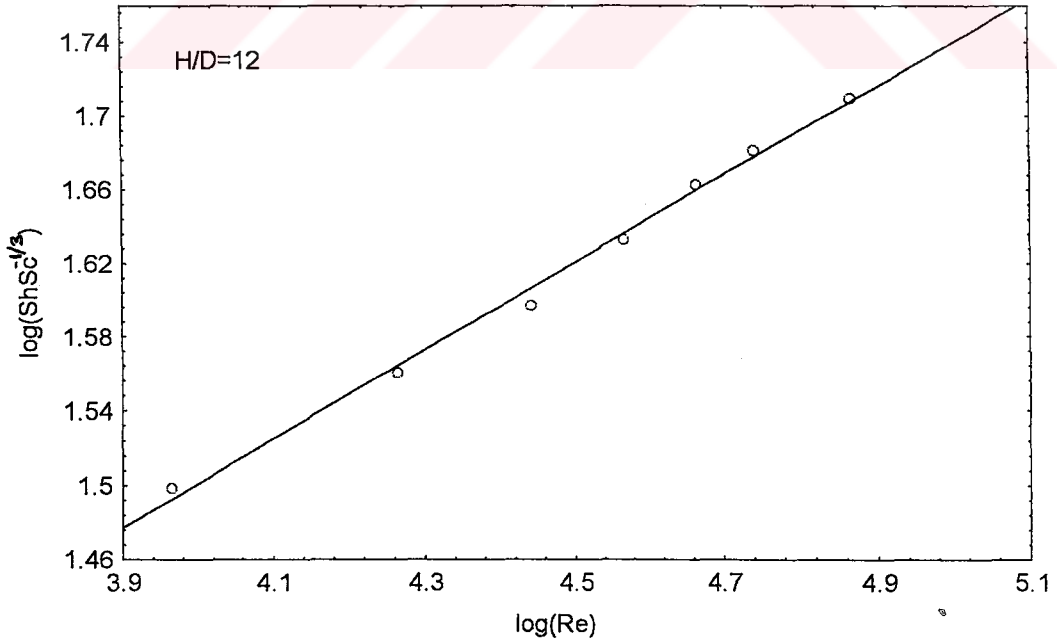
Şekil 16.H/D=6 için  $\log(\text{ShSc}^{-1/3})$  ile  $\log(\text{Re})$ 'nin değişimi



Şekil 17.H/D=8 için  $\log(\text{ShSc}^{-1/3})$  ile  $\log(\text{Re})$ 'nin değişimi



Şekil 18.H/D=10 için  $\log(\text{ShSc}^{-1/3})$  ile  $\log(\text{Re})$ 'nin değişimi



Şekil 19.H/D=12 için  $\log(\text{ShSc}^{-1/3})$  ile  $\log(\text{Re})$ 'nin değişimi

9190  $\leq Re \leq 73510$  ,  $2 \leq H/D \leq 12$  ve  $0 \leq R/D \leq 12$  değişken aralıklarında elde edilen sınırlayıcı akım değerleri ile hesaplanan kütle aktarım katsayısı kullanılarak Sherwood sayısı hesaplanmıştır.

$$Sh = kd / D_{AB} \quad (4.1)$$

Ortalama kütle aktarım katsayıları kullanılarak ,her bir H/D oranı için  $\log(ShSc^{-1/3})$  ile  $\log(Re)$  arasında çizilen grafikler Şekil 14-19 ile ve istatistiksel paket program kullanarak elde edilen korelasyonlar Tablo (3.1) ile gösterilmiştir.

**Tablo 3.1.Değişik H/D oranlarında kütle aktarım korelasyonları**

H/D	Korelasyon	s	r
2	$ShSc^{-1/3} = 2.544 Re^{0.272}$	0.002819	0.99949
4	$ShSc^{-1/3} = 2.880 Re^{0.262}$	0.010140	0.99347
6	$ShSc^{-1/3} = 1.935 Re^{0.301}$	0.004192	0.99899
8	$ShSc^{-1/3} = 1.111 Re^{0.346}$	0.004038	0.99949
10	$ShSc^{-1/3} = 2.175 Re^{0.262}$	0.002707	0.99949
12	$ShSc^{-1/3} = 3.524 Re^{0.239}$	0.005789	0.99749

$\log(ShSc^{-1/3})$  ile  $\log(Re)$  arasında çizilen grafikler tüm H/D oranı için benzer özellik göstermektedir.Şekil 14-19 grafiklerine bakıldığı zaman her bir H/D için  $\log(ShSc^{-1/3})$  ile  $\log(Re)$  arasında logaritmik bir ilişki gözlenir.Schmidt sayısı 1692 ve sabit bir değerdir.Reynolds sayısı ve Sherwood sayısı sırasıyla ;

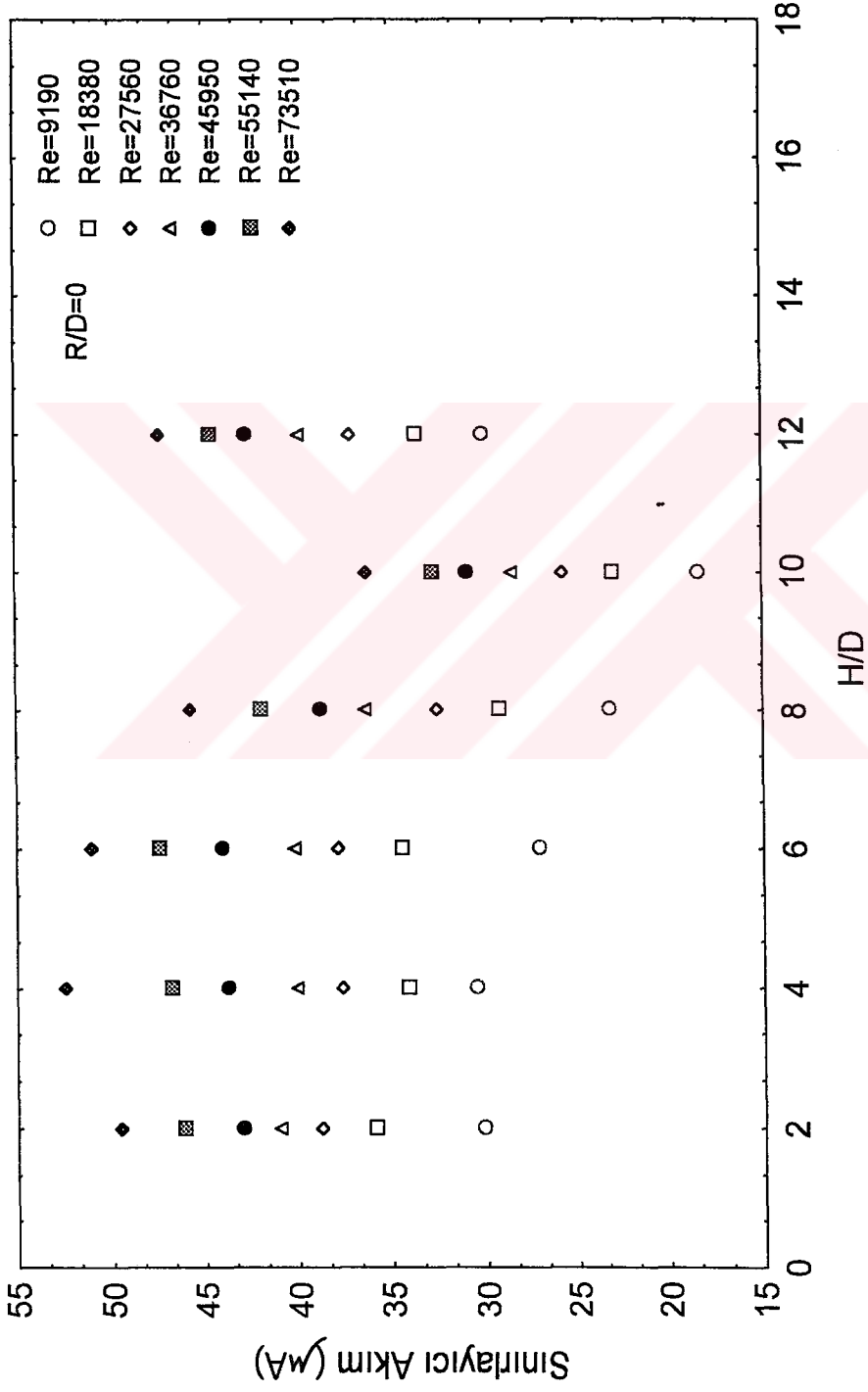
$$Re = DV\rho/\mu \quad , \quad Sh = kd/D_{AB}$$

şeklinde ifade edilirler.

Reynolds sayısında tek değişken akışkanın hızı, Sherwood sayısında kütle aktarım katsayısıdır. Akışkan hızı arttıkça , H/D değeri her ne olursa olsun, kütle aktarım katsayısında artmaktadır.Bu da ortamdaki türbülans etkilerin aktarım olayını artırdığının göstergesidir.

H/D'nin değişik oranları için elde edilen korelasyonlara göre; ortalama Sherwood sayısının Reynolds sayısı ile olan en güçlü ilişkisi H/D'nin 6 ile 8 olduğu değerlerdir. Bunun sebebi bu değerlerde hedef yüzeyin potansiyel öz dışına gelmesi ve hedef yüzey ile arasında olabilecek momentum alışverişi ve değişimlerden etkilenmemesidir(21).

Korelasyonlarda Sherwood sayısının Reynolds sayısı ile olan üstel ilişkisi 0.262-0.346 arasında olup H/D değerinden pek fazla etkilenmemektedir.

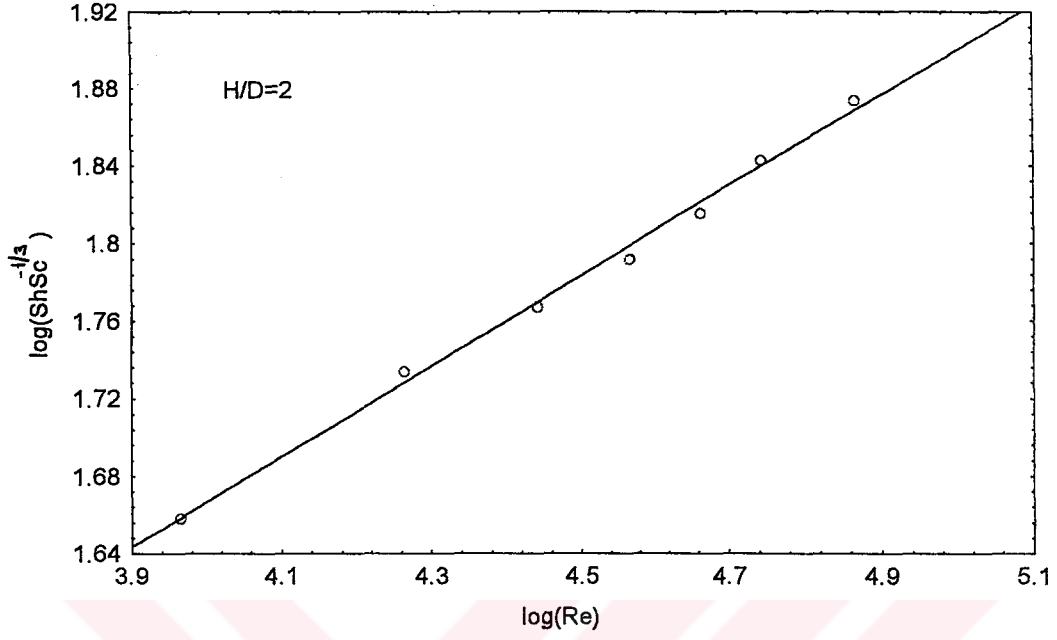


Şekil 20. Sınırlayıcı akımın değişik Reynolds sayılarında durgunluk noktasında (R/D=0) değişimi

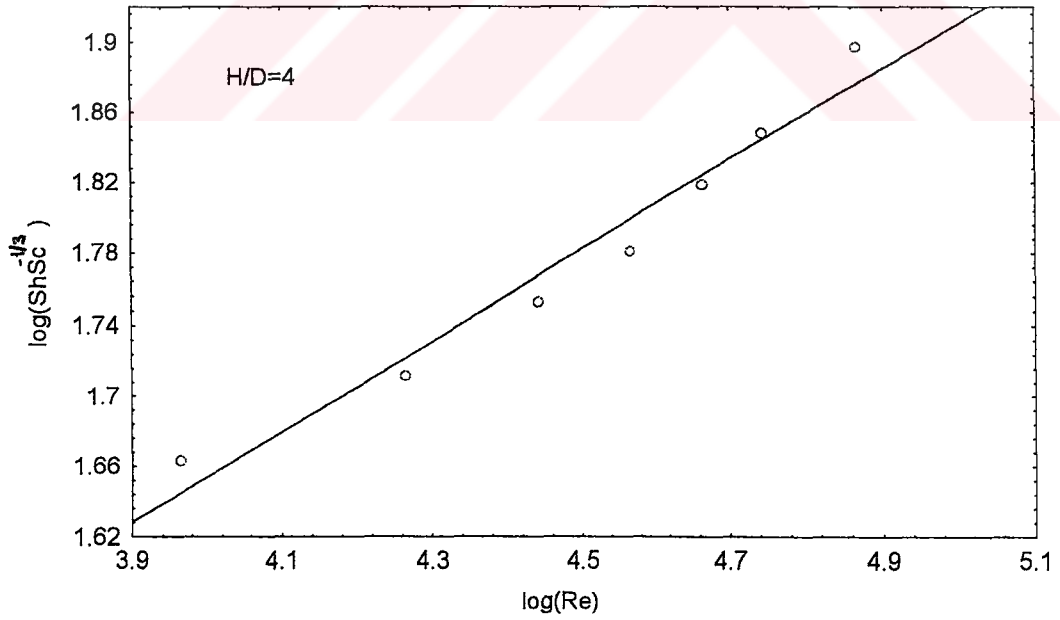


Sınırlayıcı akımın değişik Reynolds sayılarında durgunluk noktasındaki değişimi Şekil 20 ile verilmiştir.Şekil 20'ye göre H/D oranı her ne olursa olsun sınırlayıcı akımın Reynolds sayısı ile olan değişimi aynı olmuştur.Reynolds sayısı arttıkça durgunluk noktasındaki sınırlayıcı akım değeri ,dolayısıyla; kütle aktarım katsayısı artmıştır.Durgunluk noktası için bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürde(23) verilen sonuçlar ile uyum halindedir.Yalnızca H/D=12 noktasında bir sapma gözlenmiştir.

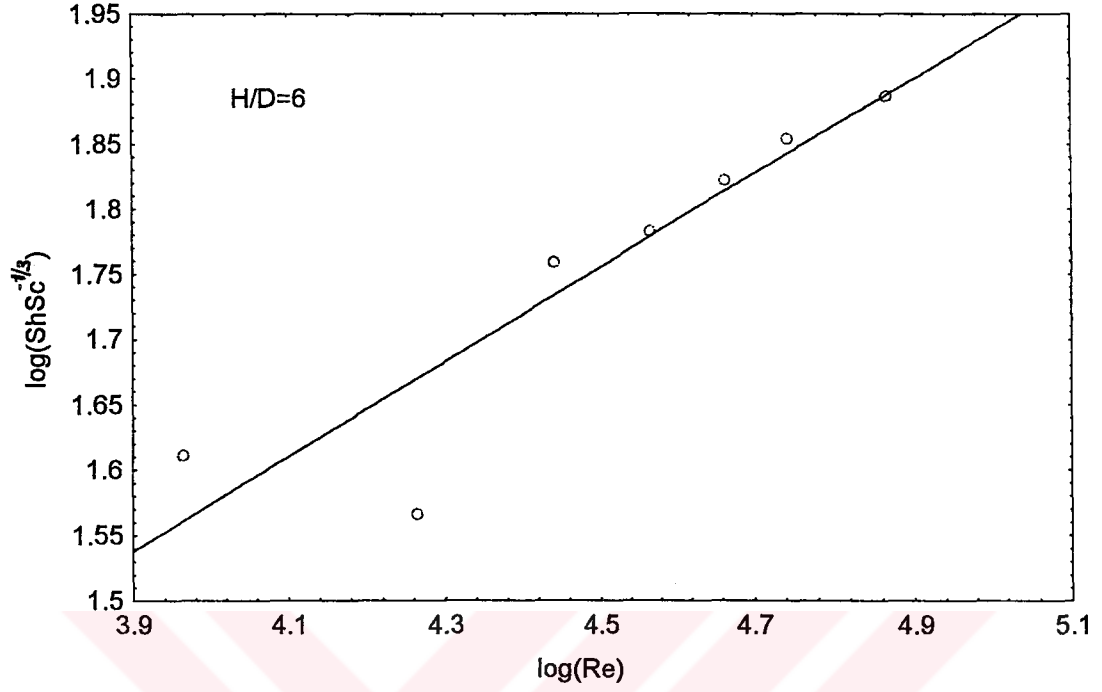




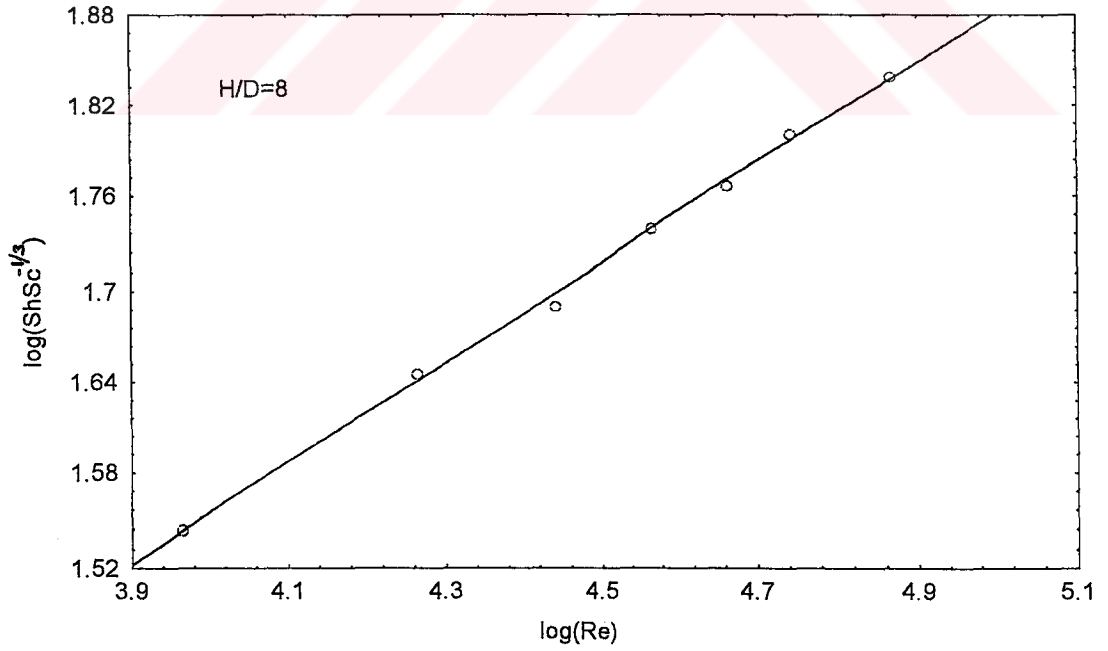
Şekil 21. Durgunluk noktasında  $H/D=2$  için  $\log(\text{ShSc})^{-1/3}$  ile  $\log(\text{Re})$ 'nin değişimi



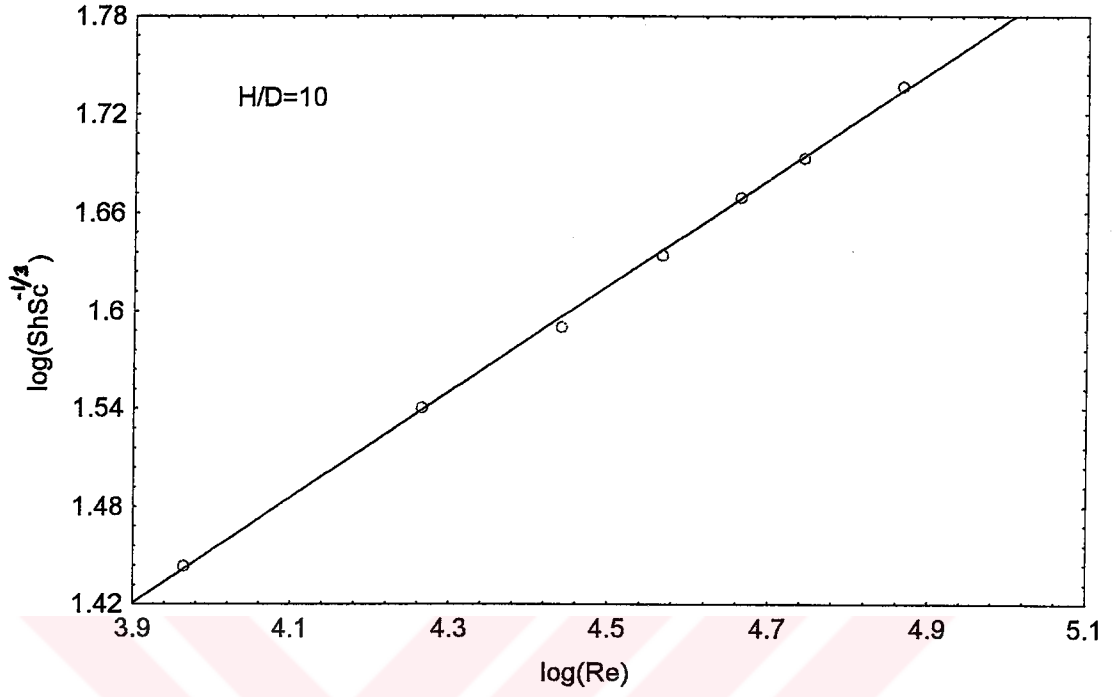
Şekil 22. Durgunluk noktasında  $H/D=4$  için  $\log(\text{ShSc})^{-1/3}$  ile  $\log(\text{Re})$ 'nin değişimi



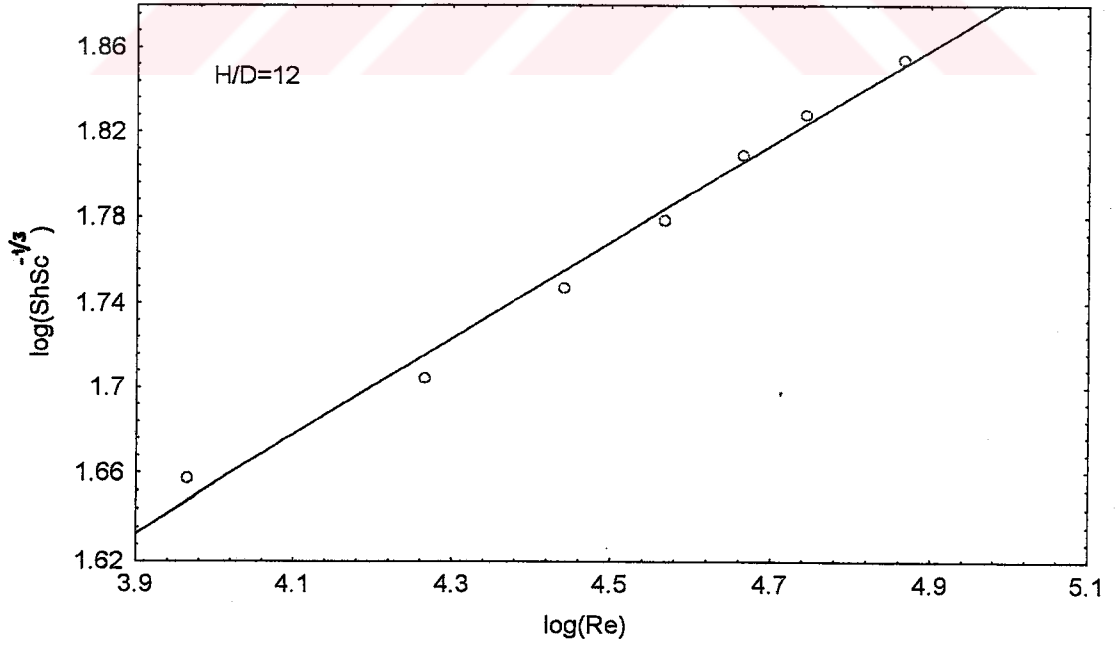
Şekil 23.Durgunluk noktasında H/D=6 için  $\log(\text{ShSc}^{-1/3})$  ile  $\log(\text{Re})$ 'nin değişimi



Şekil 24.Durgunluk noktasında H/D=8 için  $\log(\text{ShSc}^{-1/3})$  ile  $\log(\text{Re})$ 'nin değişimi



Şekil 25. Durgunluk noktasında  $H/D=10$  için  $\log(\text{ShSc}^{-1/3})$  ile  $\log(\text{Re})$ 'nin değişimi



Şekil 26. Durgunluk noktasında  $H/D=12$  için  $\log(\text{ShSc}^{-1/3})$  ile  $\log(\text{Re})$ 'nin değişimi

**Tablo3.2. Durgunluk noktasında kütle aktarım korelasyonları**

H/D	Korelasyon	s	r
2	$ShSc^{-1/3} = 5.4313 Re^{0.233}$	0.005463	0.99749
4	$ShSc^{-1/3} = 4.2471 Re^{0.256}$	0.017190	0.98080
6	$ShSc^{-1/3} = 1.3403 Re^{0.362}$	0.053040	0.91706
8	$ShSc^{-1/3} = 1.07844 Re^{0.326}$	0.004826	0.99899
10	$ShSc^{-1/3} = 1.4368 Re^{0.324}$	0.003419	0.99949
12	$ShSc^{-1/3} = 5.6377 Re^{0.226}$	0.008411	0.99247

Tablo 3.2’de verilen durgunluk noktasındaki kütle aktarım korelasyonlarına göre Sherwood sayısının Reynolds sayısı ile olan üstel ilişkisi 0.226-0.362 aralığında olmaktadır. Sherwood sayısının Reynolds sayısı ile olan en güçlü ilişkisi sırasıyla H/D’nin 6 ,8 ve 10 değerlerin de görülmüştür. Ayrıca durgunluk noktasın da Reynolds sayısının artması kütle aktarım katsayısının artmasına sebep olmuştur.

## SONUÇ

Elektrokimyasal sınırlayıcı akım tekniği kullanılarak düzgün bir yüzeye çarpan jet ile ortaya çıkan kütle aktarımı  $9190 \leq Re \leq 73510$ ,  $0 \leq Re \leq 12$  ve  $2 \leq H/D \leq 12$  parametre aralıklarının da incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre çarpma ve duvar jet bölgesi sınırları belirlenmiştir.  $H/D$ 'nin küçük değerlerin de elde edilen sonuçların sebebi, bu  $H/D$  oranlarında elde edilen bölgede çarpma yüzeyinin jetin potansiyel öz'ü içinde yer almış olması ve burada jet ile hedef yüzey arasındaki etkileşimlerin (özellikle momentum alışverişi) olayı etkilediği görülmüştür. Dolayısıyla aktarım olayının istenilen seviyede gerçekleşmesi için öncelikle hedef yüzeyin jet oluşumunda ortaya çıkan potansiyel öz dışına yerleştirilmesi gereklidir ki bu değer jet dağıtıcı çapının 6 - 8 katı aralığındadır. Ayrıca kullanılan akışkanın Reynolds sayısının yüksek tutulması yine aktarım olayını artıran diğer bir faktördür.

Bunlardan başka, jet dağıtıcı çapının değişimi, jetin gönderilme şekli (elliptic, düz, helisel) lüle ile hedef yüzey arasındaki açı, hedef yüzey üzerindeki elektrot konumu tamamıyla aktarım olayı üzerinde etkili olan parametrelerdendir.

Bu çalışmada yukarıdaki parametreler göz önünde bulundurulmamış fakat  $R/D$ ,  $H/D$  ve Reynolds sayısının aralığı oldukça geniş tutulmuştur.

Literatürde elde edilen korelasyonlarda ister ortalama Sherwood sayısı isterse durgunluk noktasındaki Sherwood sayısı olsun, Reynolds sayısının üssü laminar şartlar için yaklaşık 0.5, türbülans şartlar için ise yaklaşık 0.8 civarındadır. Bununla beraber literatürde beklenmedik sonuçlarda verilmiştir. Elison ve Webb Reynolds sayısının üssünü laminar şartlarda 0.8, türbülans şartlarda ise 0.5 olarak belirtmişler ve bunun sebebini jet dengesinin bozulmasından ileri gelen baskın etkilerin sonucu olduğunu belirtmişlerdir(25). Mevcut çalışmada Reynolds sayısının üssünün 0.262 - 0.346 arasında olması jet çıkışı ile çarpma yüzeyi arasındaki mesafenin ayarlanırken jetin giriş kısmında oluşan ani genişleme ve daralma bölgesinin akışın türbülans derecesinin değişimine ve

türbülans seviyedeki artışın Reynolds sayısının etkisini gölgelemesine bağlanabilir. Gardon ve Akfırat belirli bir akım hızında serbest fazda türbülans derecesinde %2.5 ile % 18 arasında oluşturulan bir artışın durgunluk noktasında ısı aktarımını %40 kadar artırdığını kaydetmişlerdir(1).



**KAYNAKLAR**

1. Gardon, R. , Akfirat, J.C. ,1965, The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics of impinging jets. *Int.J. Heat and mass transfer*, Vol.8, 1261-1272.
2. Douglas, F. , Gasiorek, M. and Swaffield, A. ,1984, *Fluid Mechanics* Pitman Publishing Limited, 5.ed., 125.
3. Incropera, F.P. and With, D.P., 1990 , *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 3 rd. ed., John Wiley and Sons, New York , Vol.7, p.431-439
4. Popiel, C.O., Baguslowski, L. ,1988 ,Effect of flow structure on the heat or mass transfer on a flat plate in impinging round jet. *C.201/88*, 663-685.
5. Gopola Krishna, P. , Vankatesworlu, P. ,1993, Ionic mass transfer measurements in the case of submerged multijets impinging on to a flat surface.*J. Chem. Tech. Biotechnical*, Vol. 56, 253-258.
6. Kumgai, M. and Endoh, K., 1982, Effects of kinematic viscosity and surface tension on gaz entrainment rate of an impinging liquid jet.*Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol.15, No:6, 427.
7. Bin, A.K. ,1985, Behavior of liquid surface impinged by turbulent jets. *AIChE Journal* Vol. 31, No: 8, 1397.
8. Foss, J.F. and Kleist, S.J., 1976, Mean flow characteristics for the oblique impingement of an axisymmetric jet. *AIAA Journal*, Vol. 14, 705.
9. Foss, J.F. 1979, Measurements in a large - angle oblique jet impingement flow.*AIAA Journal*, Vol. 17, No: 8.,
10. Lau, J. C., 1980, Mach number and temperature effects on jets. *AIAA Journal* , 609-610.
11. Glowack, P., 1988, Turbulence characteristics of impinging jets near the deflecting surface. *The Effect of Polymer Additives. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* Vol. 33, 25-38.
12. Mohan, D. and Ramesh , V., 1982, Submerged laminar jet impingement on a plane. *J. Fluid Mech.* , Vol. 114, 213-236.



13. Donaldsan, C.D. and Snedeker, R.S. , 1971, A study of free jet impingement ,Part 1. Mean properties of free and impinging jet. J. Fluid Mechanics, Vol. 45, 281-319.
14. Lamonti, P.J. and Hunt, B.L., 1980, The impingement of underexpanded axisymmetric jets on perpendicular of and inclined flat plates. J. Fluid Mec., Vol.100, No.3 , 471-511.
15. Demir, A. , 1990, A study of Air - jet texturing nozzles. The effects of nozzle configuration on the air flow. J. of Eng. for Ind., Vol. 112, 97.
16. Loth, E. and Foeth, G.M., 1989, Structure of underexpanded round air jets submerjed in water. J. Multiphase Flow, Vol. 15, No. 4, 589-603.
17. Feralan, A.E., Yamankaradeniz, R., Can, M. , 1989, Çarpan hava jetleri ile ince mürekkep filmlerinin kurutulması. J. of the Faculty of Eng. of Uludağ Üniv., Vol. 3, No. 1
18. Abrosimov, A.I., 1984, Internal peak of heat-transfer coefficient for a nate washed by a normal jet. Translated from teplafiziko Y., Temp. ,Vol. 22, No. 3, 512-516
19. Shadlesky, P.S., 1982, Stagnation point heat transfer for jet impingement to a plane surface. Technical notes, American Inst. of Aeronuatics and Astronuatics Inc. 1214-1215.
20. Incropera, F.P. and Witt, D.P., 1990, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3rd ed., John Wiley and Sons., N.York , Vol. 7, p.431-439.
21. Popiel, C., Meer, V.D. and Hoogendoom, C. j., 1980, Convective heat transfer on a plate in an impinging round hot gas jet of low reynolds number. J. heat and mass transfer., Vol. 23, 1055-1068.
22. Bouchez, J.P. and Goldstein, R.J., Impingement cooling from a circular jet in a cross flow. HMT, Vol. 18, No.6-8, 719-720.
23. Hyrack, P., 1983, Heat transfer from round impinging jets to a flat plate. J. heat and mass transfer., Vol. 25, No. 12, 1857-1865.
24. Baughn , J. W., Hechanova, A. E., Yan, X., 1991, An experimental study of entrainment effects on the heat transfer from a surface to a heated circular impinging jet. Int. journal heat transfer, Vol. 113, 1023.

25. Elison, B. and Webb, B. W. , 1994, Local heat transfer to impinging liquid jets in the initially laminar, transitional, and turbulent regimes. *J. heat and mass transfer* , Vol. 37, No. 8, 1207-1216.
26. Goldstein, R. J. and Bahbahani, A. I., 1982, Impingement of a circular jet with and without cross flow. *J. heat and mass transfer*, Vol. 25, No. 9, 1377-1382.
27. Lee, S.J., Lee, J. H. and Lee, D. H., 1994, Local heat transfer measurements from an elliptic jet impinging on a flat plate using liquid crystal. *J. heat and mass transfer*, Vol. 37, No. 6, 967-976.
28. Huang, L. and Genk, M. S., 1994, Heat transfer of an impinging jet on a flat surface. *J. heat and mass transfer* , Vol. 37, No. 13, 1915-1923.
29. Goldstein, R.J., Behbahani, A. I. and Heppelmann, K.K., 1986, Streamwise distribution of the recovery factor and local heat transfer coefficient to an impinging circular air jet *J. heat and mass transfer*, Vol. 29, No. 8, 1227-1235.
30. Boughn, J. W. and Shimizu, S., 1989, Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet. *ASME*, Vol. 111, 1096.
31. Donaldson, C.D., Snedeker, R. S. and Margolis, D. P., 1971, A study of free jet impingement. Part 2: Free jet turbulent structure and impingement heat transfer *J. fluid mechanics.*, Vol. 45, No.3, 477-512.
32. Chin, D.T. and Hsueh, K.L., 1986 , An analysis using the Chilton -Colburn analogy for mass transfer to a flat surface from an submerged impinging jet. *Electrochimica Acta* , Vol.31, No.5, 663-685.
33. Hanratty, T., 1976, The use of electrochemical techniques to study flow fields and mass transfer rates. *University of Illinois, AIChE J.*, Vol. 8, 244.
34. Berger, F.P. and Ziai, A., 1983, Optimization of experimental conditions for electrochemical mass transfer measurements. *Chemical Engineering Research* , Vol. 61. 377-381
35. Wragg, A.A. , 1977, Applications of the limiting diffusion current technique in chemical engineering. *The chemical engineering journal*. University of Exeter Faculty of Engineering , 39-44

36. Bourne, J. R., Dell, P., Dassenbach, O. and Post, T., 1985, Densities, viscosities and diffusivities in aqueous sodium hydroxide-potassium ferri and ferrosyanide solutions. *Journal of Chemical Engineering Data*, Vol.30, No:2, 160-163.

