

**YATAY KUYULARDA PERFORASYONLARDAN
KAYNAKLANAN BASINÇ KAYIPLARININ ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Petrol Müh. M. Umut YALNIZ

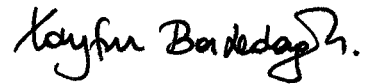
Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Kasım 1996

Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Kasım 1996

Tez Danışmanı : Doç. Dr. K. Hakan ALKAN

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Turhan YILDIZ

Doç. Dr. Tayfun BABADAĞLI



ÖNSÖZ

Yapmış olduğum bu yüksek lisans tez çalışmasının ileride yapılacak çalışmalara yardımcı olmasını dilerim.

Bu çalışmamda da olduğu gibi her zaman tavsiyeleriyle yardımcı olan tez danışmanım Doç. Dr. K. Hakan ALKAN'a, lisans yıllarımdan beri her konuda yardımını esirgemeyen Doç. Dr. Erdal ÖZKAN'a , tez süresince bana katlanan ve destek olan aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürler ederim.

3 Kasım 1996

M. Umut YALNIZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
BÖLÜM 3 DENEYSEL ÇALIŞMA	12
3.1 Donanım	12
3.2 Akış hattı	12
3.2.1 Ana Akış Hattı	13
3.2.2 Perforasyon Akış Hattı	13
3.3 Test Bölümü	14
3.4 Deney Prosedürü	15
BÖLÜM 4 ANALİTİK MODEL	21
BÖLÜM 5 DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	30
5.1 Sistemin Kalibrasyonu	30
5.2 Basınç Profili	31
5.2.1 Perforasyondan Akışın Olmadığı Durum	33
5.2.2 Perforasyondan Akışın Olduğu Durum	35
5.3 Görünür Sürtünme Faktörü	43
5.4 Görünür Sürtünme Faktörü Korelasyonu	51
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR	71

EKLER

73

ÖZGEÇMİŞ

107



SEMBOL LİSTESİ

Δp_p	: perforasyondan kaynaklanan basınç düşümü
u	: boru akış hızı
u_p	: perforasyon akış hızı
ρ	: yoğunluk
Δx	: mesafe, m, cm, mm
D, d_m	: boru çapı, m, cm, mm
d_p, d_i	: perforasyon çapı, m, cm, mm
f_w	: yüzey sürtünme faktörü
f_p	: perforasyon sürtünme faktörü
f_t	: görünür sürtünme faktörü
f_0	: yüzey görünür sürtünme faktörü
N_{Re}	: Reynods sayısı
q_i	: enjeksiyon (perforasyondan) debisi, m ³ /s, l/dk
q_m	: ana hat debisi, m ³ /s, l/dk
q_t	: toplam debi, l/dk
R	: boru yarıçapı

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1 Deney donanımı şematik gösterimi	16
Şekil 3.2 Donanım test bölümü	17
Şekil 3.3 Perforasyonların donanım üzerindeki yerleri	18
Şekil 4.1 Yuan modelinde kullanılan kontrol hacmi	24
Şekil 5.1 Donanımın perforasyonsuz bölümü sürtünme faktörü davranışı	32
Şekil 5.2 Test bölümündeki basınç profili	34
Şekil 5.3 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.02$)	36
Şekil 5.4 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.107$)	37
Şekil 5.5 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.217$)	38
Şekil 5.6 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.02$)	40
Şekil 5.7 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.107$)	41
Şekil 5.8 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.217$)	42
Şekil 5.9 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.01423$)	44
Şekil 5.10 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.09924$)	45
Şekil 5.11 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.01423$)	46
Şekil 5.12 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.09924$)	47
Şekil 5.13 Görünür sürtünme faktörü - Reynolds sayısı N_{Re} ilişkisi	49
Şekil 5.14 Bulunan yüzey sürtünme faktörü korelasyonunun Su ve Gudmundsson korelasyonu ile karşılaştırılması	50

Şekil 5.15	Görünür sürtünme faktörü Reynods sayısı N_{Re} ilişkisi-deney verileri ($d_i=0.004$ m)	52
Şekil 5.16	Görünür sürtünme faktörü Reynods sayısı N_{Re} ilişkisi-deney verileri ($d_i=0.008$ m)	53
Şekil 5.17	Perforasyon sürtünme faktörü f_p 'nin debi oranı q_i/q_t ile oranı ($d_i=0.004$ m)	55
Şekil 5.18	Perforasyon sürtünme faktörü f_p 'nin debi oranı q_i/q_t ile oranı ($d_i=0.008$ m)	56
Şekil 5.19	Perforasyon çapının perforasyon sürtünme faktörü üzerindeki etkisi	58
Şekil 5.20	Perforasyon sürtünme faktörü korelasyonu	59
Şekil 5.21	Perforasyon sürtünme faktörü korelasyonu	60
Şekil 5.22	Perforasyon sürtünme faktörü korelasyonu	61
Şekil 5.23	Korelasyonun deney verileri ile karşılaştırılması	64
Şekil 5.24	Korelasyonun deney verileri ile karşılaştırılması	65
Şekil 5.25	Korelasyonun deney verileri ile karşılaştırılması	66
Şekil 5.26	Perforasyon sürtünme faktörü korelasyonunun diğer korelasyonlar ile karşılaştırılması	67
Şekil 5.27	Yuan verileri ile bu çalışmanın korelasyonunun karşılaştırılması	68
Şekil B.1	Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.0616$)	89
Şekil B.2	Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.0616$)	90
Şekil B.3	Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.135$)	91
Şekil B.4	Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.135$)	92
Şekil B.5	Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.289$)	93
Şekil B.6	Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.289$)	94
Şekil B.7	Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.325$)	95

Şekil B.8 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.325$)	96
Şekil B.9 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.05873$)	97
Şekil B.10 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.05873$)	98
Şekil B.11 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.219$)	99
Şekil B.12 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.219$)	100
Şekil B.13 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.298$)	101
Şekil B.14 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.289$)	102
Şekil B.15 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.396$)	103
Şekil B.16 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.396$)	104
Şekil B.17 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.499$)	105
Şekil B.18 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.499$)	106

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1 Deney malzemeleri ve özellikleri

19



ÖZET

Yatay kuyuların petrol endüstrisindeki öneminin artmasıyla birlikte yatay kuyu uygulamaları üzerindeki araştırmalar da yoğunlaşmıştır. Yatay kuyularda akış davranışı ve basınç kayıplarının analizi, üretime olan etkisi nedeniyle araştırılan konuların başında gelmektedir. Bu Yüksek Lisans Tez Çalışmasında yatay kuyularda perforasyonlardan kuyu içine akışa bağlı basınç kayıpları deneysel olarak araştırılmış, deney sonuçları matematiksel olarak yorumlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan donanım uygun şekilde tasarlanmış olan plastik boru, pompalar, basınç ölçüm panosu ve su tankından oluşmaktadır. Bu donanım üzerine iki farklı çapta (4 mm ve 8 mm) perforasyon açılmış ve her bir perforasyondan değişik debilerde enjeksiyon yapılarak basınç ölçüm noktaları ile basınç ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Farklı enjeksiyon/ana hat debi oranlarında gerçekleştirilen bu çalışmanın sonucunda elde edilen deney verileri değerlendirilerek yeni bir sürtünme faktörü korelasyonu geliştirilmiştir. Yeni korelasyon ile hesaplanan perforasyon sürtünme faktörü değerleri bu çalışmada ve benzer çalışmalardaki deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçları yatay kuyularda perforasyonun etkisinin düşünülenden farklı olduğunu ve perforasyondan akışın kuyu akış davranışını bulundukları bölgede değiştirdiğini, bu değişimin kuyu toplam akış debisine bağlı olarak belli bir uzaklıkta (yaklaşık olarak $8d_m$) kaybolduğunu, sürtünme faktörünün perforasyon/ana hat akış debisi oranının ve perforasyon/boru çapı oranının fonksiyonu olduğu göstermiştir.

ANALYSIS OF PRESSURE LOSSES CAUSED BY PERFORATIONS ON HORIZONTAL WELLS

SUMMARY

Horizontal wells have become attractive in many applications over the last 20 years. Increasing demand for the use of horizontal wells have pushed the petroleum industry to work on the application problems of horizontal wells. One of the problems arising from the production of the well is the change of the flow behavior in the well. In a horizontal well depending upon the completion method, fluid may enter the well at different locations along the well. One of the locations where fluid can enter is the perforations. The influx along the wellbore through perforations effects the flow behavior in a horizontal well. This behavior change effects the production of the well. Causing important changes on the production of the well.

The objective of this study is to investigate the effect of influx from perforations on the flow behavior of horizontal wells. For this purpose a new experimental test facility is designed and constructed to simulate the well and the flow from perforation. Two different diameter perforations (4 mm and 8 mm) are used on these experiments.

Experimental Section

Figure S.1 shows the schematic description of the test facility. Experimental test facility is composed of two parts: Fluid handling system and test section.

Fluid handling system is composed of two major sections, main flow and the perforation (injection) flow. In the main flow section, flow in a horizontal well is simulated. Water flows through the test facility and is then circulated back to the water tank. Two different rate centrifugal pumps are used to maintain flow in high (>30 l/min.) and low (30 l/min. $<$) rates. Both pumps are connected by a by-pass line in order to vary flow rates. In the injection section, flow through perforations into the well is simulated by injecting fluid through perforations. A low rate centrifugal pump with a by-pass line is used to inject fluid through perforations.

Water is used as the test fluid. Injection and main flow rates are measured by weighing method. Test section is created to measure the pressure during both injection and no injection cases. Test section is 2.8 meters and located on the fully developed flow region of the test facility which is estimated to start 20 m away from the pipe inlet. As shown in Figure S.2 test section has 14 pressure ports which are composed of 4 mm tubing connected to 9 mm glass manometer tubes to measure the pressure visually in means of water column. Two different diameters (4 mm and 8 mm) perforations are also located in this section. First perforation (4 mm) is located

in between the measurement ports 2 and 3 and the second one is after the pressure port number 7. Figure S.3 shows the locations of perforations on the test section.

Results and Discussion

A total of 474 experiments were conducted for 4 mm and 8 mm perforations in various main flow and injection rates. Data were acquired for no fluid and fluid injection cases. Data taken from the pressure measurement ports 1 and 2 is used to find the roughness of the pipe. A good agreement is seen in the comparison with the Moody chart for smooth pipes using the Blasius formula.

Blasius formula is as follows

$$f = \frac{0.316}{N_{Re}^{0.25}} \quad (S.1)$$

In the above equation f is the friction factor and N_{Re} stands for the Reynolds number. Data taken during the “no injection” and “injection cases” from pressure measurement ports 2-3 and 7-9 are used to calculate the apparent wall friction factor and perforation friction factor for 4 mm and 8 mm perforation. Friction factor for no injection and injection cases are calculated by the Moody Equation from developed for pressure losses in pipes.

$$f_T = - \left(\frac{p_2 - p_1}{\Delta x} \right) / \frac{\rho \bar{u}^2}{4R} \quad (S.2)$$

In this equation p_1 and p_2 are inlet and outlet pressures respectively, Δx is the distance, ρ is the density of the fluids, u is the mean velocity of the pipe flow and R is the radius of the pipe.

Two correlations are developed to model the apparent wall friction factor of 4 mm and 8 mm perforations by using the no fluid injection case data. The correlations are as follows;

$$f_0 = 98.52 N_{Re}^{-0.926} ; \quad d_i = 4 \text{ mm} \quad (S.3)$$

$$f_0 = 57.22 N_{Re}^{-0.888} ; \quad d_i = 8 \text{ mm} \quad (\text{S.4})$$

In this study the total friction factor is considered to be the sum of the wall friction and the friction caused by the inflow through the perforation of the perforated area.

$$f = f_0 + f_p \quad (\text{S.5})$$

Therefore data taken from injection case are considered to be the total apparent friction factor. Wall friction factor is subtracted from the total friction factor to find the apparent friction factor for the perforations (f_p). Value's f_p is evaluated using different parameters and a new correlation is developed. On figure S.4 the new correlation is shown. As it can be noticed from the Figure the data shows three different trends for both 4 mm and 8 mm cases. The new correlation is as follows;

$$\text{For } 0.0932505 \sqrt{\frac{d_m}{d_i}} < \frac{q_i}{q_t} \leq 0.1838207 \sqrt{\frac{d_m}{d_i}}$$

$$f_p = \left(\frac{d_m}{d_i} \right)^2 \frac{d_m}{\Delta x} \left[0.0454444 - 1.14567 \times 10^{-4} \left(\frac{d_m}{d_i} \right) \left(\frac{q_i}{q_t} \right)^{-2} \right] \quad (\text{S.6})$$

$$\text{For } 0.0129099 \sqrt{\frac{d_m}{d_i}} \leq \frac{q_i}{q_t} \leq 0.0932505 \sqrt{\frac{d_m}{d_i}}$$

$$f_p = \left(\frac{d_m}{d_i} \right)^2 \frac{d_m}{\Delta x} \left[0.537285 \left(\frac{d_m}{d_i} \right)^{-0.592321} \left(\frac{q_i}{q_t} \right)^{1.184642} \right] \quad (\text{S.7})$$

$$\text{For } 0.0073195 \sqrt{\frac{d_m}{d_i}} \leq \frac{q_i}{q_t} < 0.0129099 \sqrt{\frac{d_m}{d_i}}$$

$$f_p = \left(\frac{d_m}{d_i} \right)^2 \frac{d_m}{\Delta x} \left[0.0198886 - 0.001927 \ln \left[\left(\frac{d_m}{d_i} \right) \right] \left(\frac{q_i}{q_t} \right)^{-2} \right] \quad (\text{S.8})$$

In these equations d_i and d_m are the perforation and the pipe diameters respectively, q_i is the injection and q_t is the total flow rate and Δx stands for the range.

As a result of this experimental and analytical study following conclusions are made:

The flow behavior through a perforated pipe is different from the flow behavior through a normal pipe. The flow behavior in the perforated section changes while apparent roughness change. It is concluded that the flow disturbance due to flow from perforation, comes its effect in 8 dm distance from the perforation.



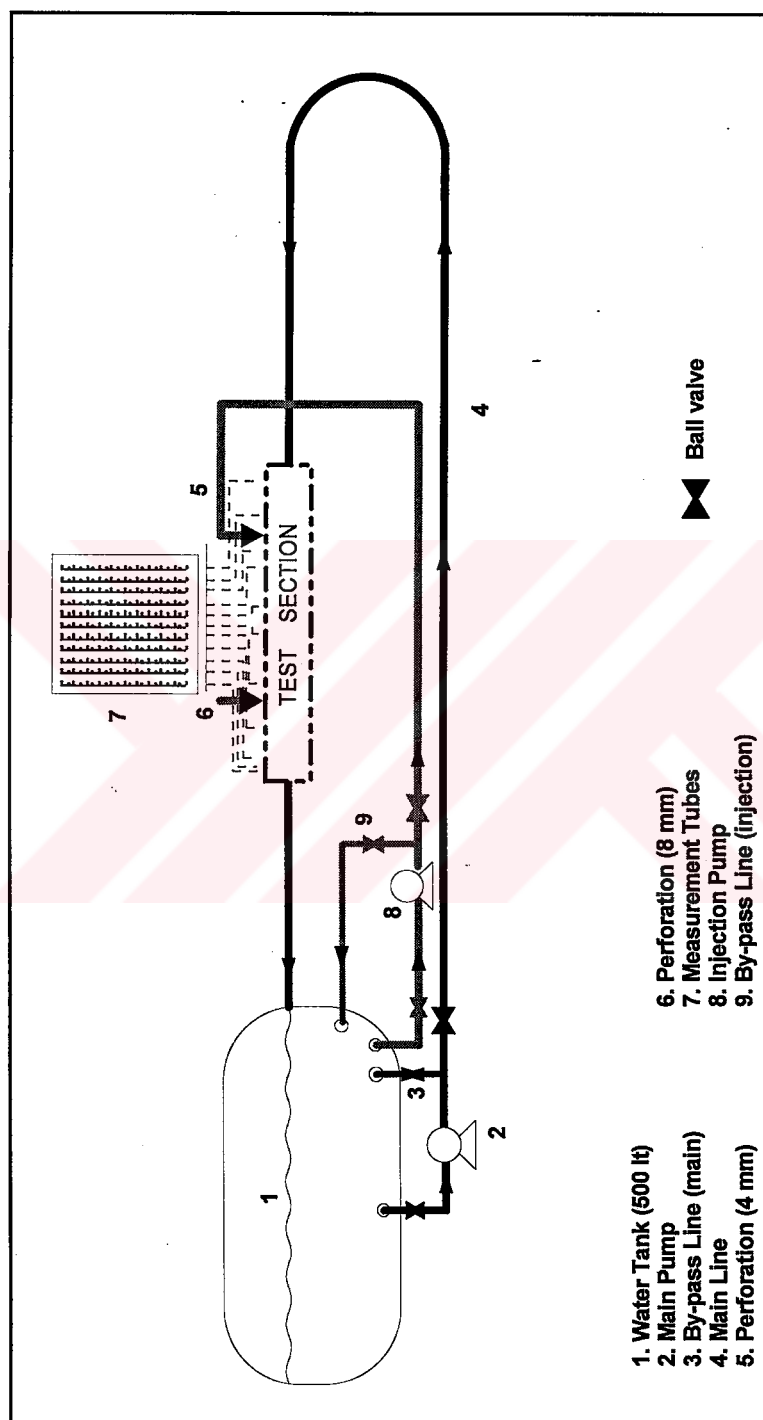


Figure S.1 Schematic description of test facility

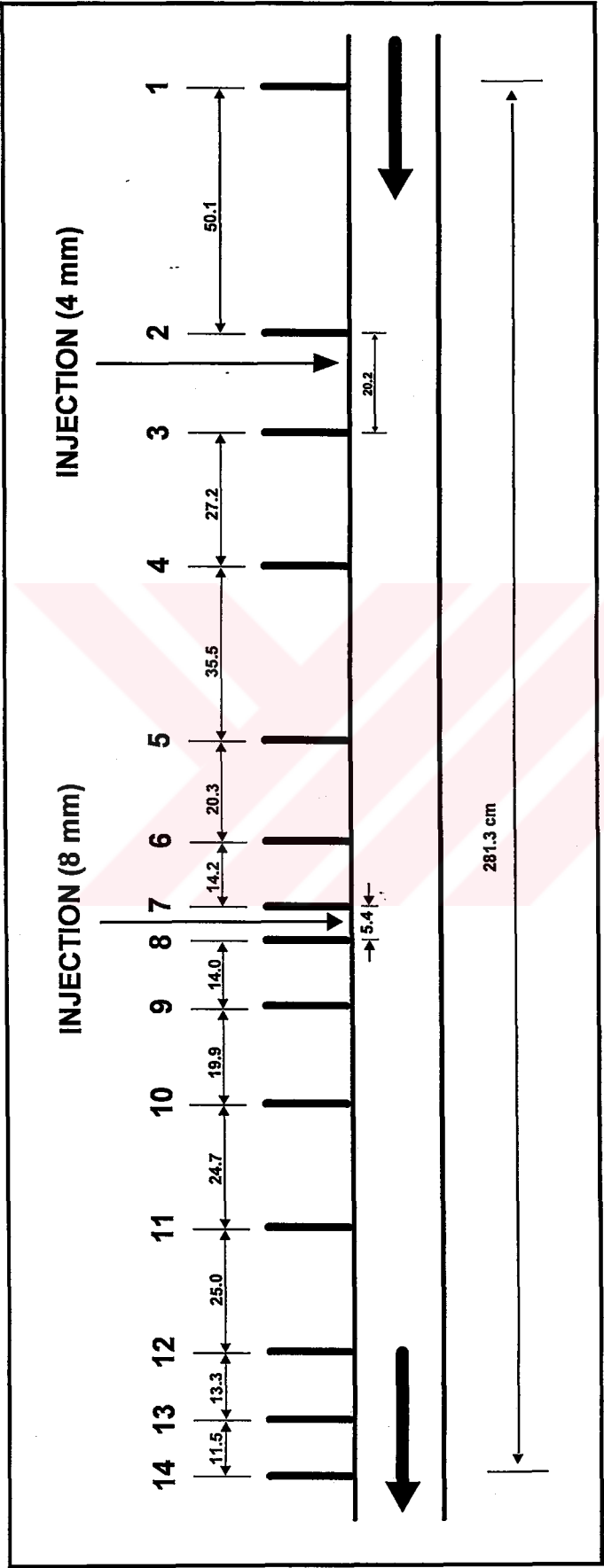


Figure S.2 Test section

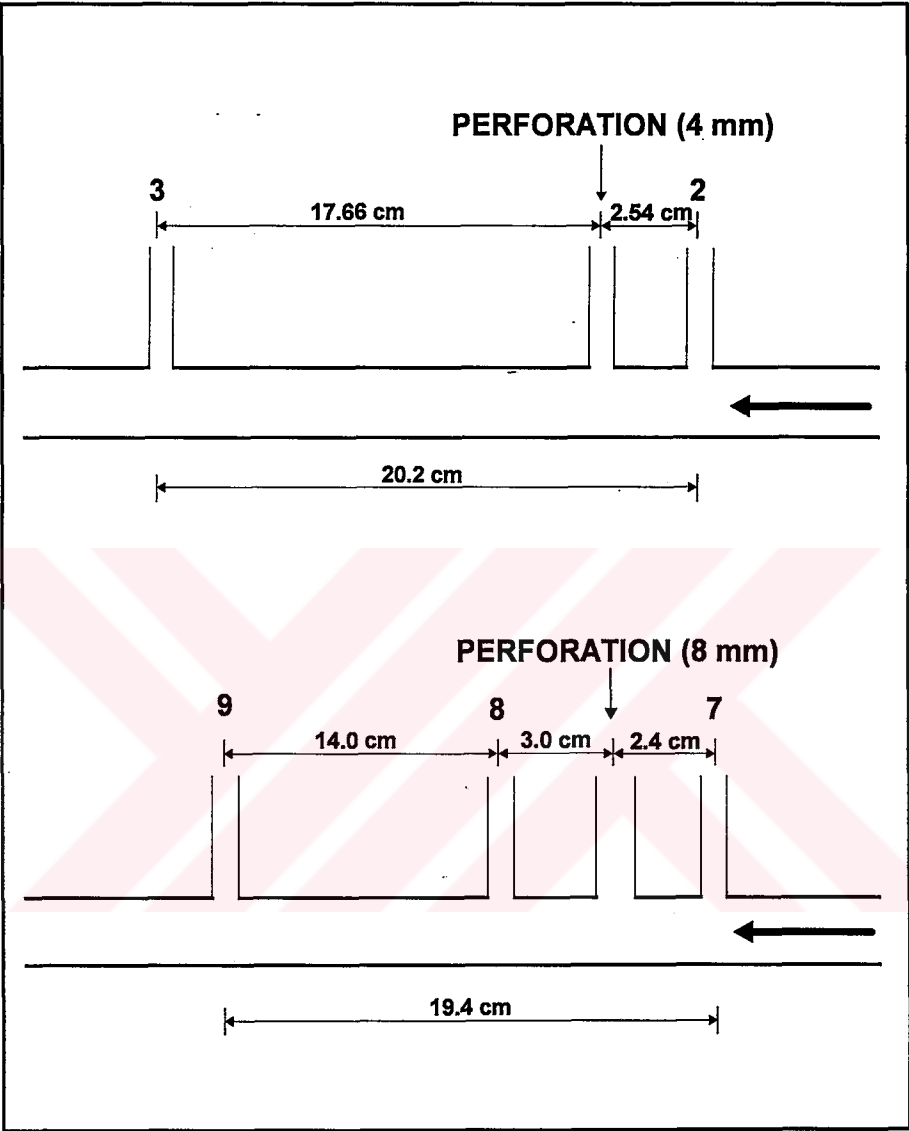


Figure S.3 Locations of the perforations

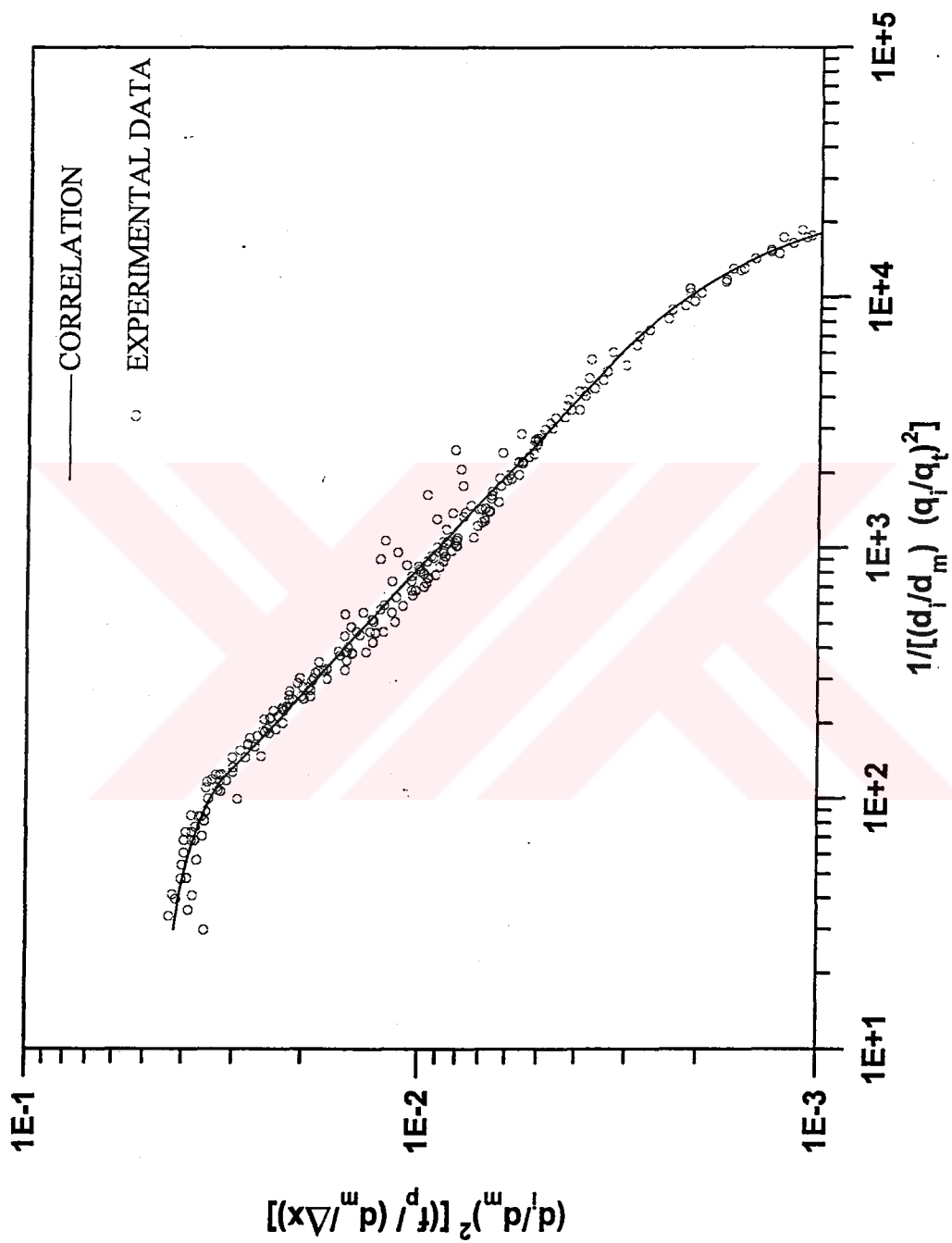


Figure S.4 Perforation friction factor correlation

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Petrol endüstrisinde yatay kuyuların kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Özellikle ince tabakalı ve/veya doğal çatlaklı rezervuarlarda, su ve gaz konileşmesinin sorun olduğu sahalarda, bir platformdan birçok kuyunun delindiği açık deniz çalışmalarında ve buhar enjeksiyonu gibi üretimi artırma uygulamalarında düşey kuyu yerine yatay kuyu delinmesi tercih edilmektedir. Çevre bağımlı çalışmalarda da yatay kuyuların potansiyel uygulama alanları vardır. Yatay kuyular ile konvansiyonel kuyulara oranla daha küçük basınç düşümü ile daha çok petrol üretmek diğer bir deyişle rezervuarın kuyu içi akış performansını artırmak olasıdır. Ancak teknoloji yenidir ve bu nedenle yatay kuyuların akış davranışı ve akışın rezervuar ile etkileşimi petrol mühendisliğinin en çok tartışılan ve araştırılan konulardan biridir.

Yatay kuyu boyunca akış normal boru akışına göre farklılık gösterir. Kullanılan kuyu tamamlama tekniğinede bağlı olarak, akışkan kuyu boyunca perforasyonlardan içeri girdiğinde perforasyonlar arasındaki uzaklık kararlı hız profilini elde etmek için yeterli olmayabilir ve bu durum tam gelişmiş akıştan farklı basınç davranışlarına yol açabilir. Bu durumda hem laminar hem de türbülanslı akışlarda kuyu boyunca yüksek basınç kayıpları oluşur.

Bu problemler mevcut borularda akış denklemleriyle çözülemez. Mevcut boru denklemlerinden önemli farklılık perforasyonlardan akışkan girişinin yol açtığı akış davranışı değişikliğidir ve pratik bir yaklaşımla bu durum sürtünme faktörü korelasyonlarının yatay kuyularda basınç kaybı hesaplamalarında kullanımını

engeller. Deneysel ve analitik çalışmalar da mevcut sürtünme faktörü korelasyonlarının yatay borularda basıncı kayıplarının hesaplanmasında kullanılmasının yanlış sonuçlar verebileceğini göstermiştir. Akış rejiminin türbülanslı bölgede olması yatay kuyu boyunca basınç dağılımının tahminini daha da güçleştirir.

Bu çalışmanın amacı yatay kuyularda basınç davranışının deneysel ve analitik analizidir. Yatay kuyuda akışı ve perforasyonlardan yatay kuyuya akışı laboratuvar koşullarında modelleyebilmek üzere bir donanım kurulmuş ve akışkan olarak suyun kullanıldığı deneylerde test hattında basınç davranışı gözlenmiştir. Deney verileri değerlendirilerek yatay kuyuya perforasyonlardan akışın etkisini içeren yeni bir sürtünme faktörü korelasyonu türetilmiş, yeni korelasyon hem bu çalışmanın deney sonuçları hem de benzeri çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Petrol endüstrisinde yatay kuyu hidroliği üzerinde ilk çalışmalar 1980'li yılların sonlarında başlamıştır [1]. İlk çalışmalarda, basınç kayıpları boru iç yüzeyindeki sürtünmeye bağlı olarak ele alınmış ve yatay kuyu içindeki basınç davranışı bu temel üzerinde incelenmiştir. Sonraki çalışmalarda yatay kuyu içindeki basınç davranışının üretime olan etkisi önem kazanmış ve basınç kayıplarının yüzey sürtünmesi dışındaki sebepleri de araştırılmaya başlanmış ve bu sebeplerden birinin de üretim sırasında perforasyonlardan akış olduğu belirlenmiştir.

Yapılan bu çalışmalardan sonuçları açısından önemli bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Pürüzsüz bir tüpün giriş bölgesindeki sürtünme faktörü laminer, sıkıştırılmaz akışkan için deneysel olarak Shapiro ve diğerleri tarafından incelenmiştir [2]. Bu çalışma sonunda tüpün girişindeki basınç düşümünün %39'nun yüzey sürtünmesinden, %61'nin ise momentum değişiminden kaynaklandığını savunulmuştur.

Yuan ve diğerleri, pürüzlü yüzeye sahip bir boruya perforasyonlardan düzenli enjeksiyon olduğunu varsayarak, düşük ve yüksek Reynolds sayılarında, iki boyutlu kararlı laminer akışı ele almış ve enjeksiyonun pürüzlü yüzeyde yüzey sürtünme katsayısını artırdığı sonucuna varmışlardır [3].

Kinney, pürüzlü boruda düzenli kütle transferi ile tam gelişmiş laminar akışın sürtünme özelliklerini araştırmıştır [4]. Sürtünme katsayısı için yüzeyde sürtünme ile birlikte eksenel yönde momentum akışından kaynaklanan etkileri içeren bir denklem vermiştir. Aşağıda verilen bu denklem $Re_w < 2$ koşulu için geçerlidir.

$$C_F Re = 16 \left(1 + \frac{Re_w}{24} - \frac{13}{2160} (Re_w)^2 \right) \quad (2.1)$$

burada

C_F = Fanning yüzey sürtünme faktörü

Re = eksenel yöndeki Reynolds sayısı

Re_w = yüzey Reynolds sayısıdır.

Reynolds sayısı izleyen eşitlikle tanımlanmıştır.

$$Re_w = \frac{V_w d}{\nu} \quad (2.1a)$$

burada uygun birimlerle

ν = kinematik viskozite,

V_w = yüzeydeki radyal hız ve

d = boru çapıdır.

Hornbeck ve diğerkleri enjeksiyon veya emme hattı olarak kullanılan pürüzlü bir boruda, laminar akış için sabit ve değışken enjeksiyon/emme hızlarında akışkan hareket denklemlerini sayısal olarak çözmüşlerdir [5]. Sonuç olarak her iki durumda giriş profilinin tam gelişmiş akışa aynı noktada vardığı belirtilmiştir.

Olson ve Eckert 0.85 m uzunluğunda, 0.035 m iç çapında test kesiti bulunan bir boruda boru çeperlerinden düzenli hava enjeksiyonu durumunda türbülanslı akışı incelemişlerdir [6]. Deneyler Reynolds sayıları 28000 ile 82000 arasında değışen ve enjeksiyon akış hızının ana hat akış hızına oranı 0.00246'dan 0.0584'e kadar olan değışikleri için gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak enjeksiyondan kaynaklanan sürtünme faktörünün, enjeksiyon/ana hat akış hız oranının belirli bir değışikenden sonra azaldığını belirtmişlerdir

Kato ve diğerkleri ise akışkan olarak su kullanarak pürüzsüz bir yüzeye sahip boruda yaptıkları deneysel çalışmada, enjeksiyon ile ana hat hız oranının 0.5'e ulaştığında enjeksiyonun yüzey kayma gerilmesini düşürdüğünü gözlemlemişlerdir [7].

Petrol endüstrisinde yatay kuyulardaki basınç düşümünü ve bunun üretime olan etkisini inceleyen ilk çalışma Dikken tarafından 1989 yılında yapılmıştır [1]. Çalışmada yatay kuyu boyunca rezervuardan kuyu içine olan akış, kuyu boyunca akış ve kuyu basınç dağılımı için 2. dereceden diferansiyel denklem elde edilmiştir. Denklem geliştirilirken kuyu içi akışın tek fazlı türbülanslı akış olduğu, kuyu boyunca rezervuardaki basınç değışiminin ve kuyu giriş ucundaki radyal akışın ihmal edildiğı, kuyu ve rezervuar özelliklerinin kuyu boyunca veya zamanla değışiminin göz önüne alınmadığı varsayımlarında bulunulmuştur. Denklem sonlu ve sonsuz kuyular için çözülmüş, yatay kuyu içi akışının geçiş bölgesinde veya türbülanslı akış olduğu ve türbülanslı akışın kuyu başlangıcından sonuna kadar belirgin bir basınç düşümüne yol açabileceğı belirtilmiştir. Tek fazlı ve türbülanslı kuyu akışını kararlı rezervuar akışı ile birleştiren bu analitik çalışmadan türetilen denklem aşağıdaki gibidir.

$$\left(\frac{d^2}{dx^2} \right) q_w(x) = J_S R_w q_w(x)^{2-\alpha} \quad (2.2)$$

burada

$q_w(x)$ = kuyu içindeki pozisyona bağlı kuyu akışı

J_S = spesifik üretim indeksi

α = sürtünme faktörü ile Reynolds sayısının ampirik korelasyonundan elde edilen sabit

R_w = kuyunun akış direnci

$$R_w = 0.316 \left(\frac{\pi \mu d}{4 \rho} \right)^\alpha \frac{8\alpha}{\pi^2 d^5} \quad (2.2a)$$

burada

μ = viskozite,

ρ = yoğunluk

d = boru iç çapıdır.

Asheim ve diğerleri 0.0308 m iç çaplı, 31.0 m uzunluğunda bir borudan oluşan deney donanımı üzerinde çalışmışlardır [8]. Donanımda test aralığı 1.3 m'dir ve deneyler 10 mm çaplı tek ve çift perforasyon ile 14000-84000 Reynolds sayısı aralığında yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına dayanarak yatay kuyular için yüzey sürtünmesini ve kuyuya perforasyonlardan olan akıştan kaynaklanan sürtünmeyi ifade eden bir

korelasyon geliştirmişlerdir. Tek ve çift perforasyon için teorik ile deneysel değerler uyum göstermiřlerdir. Geliştirilen korelasyon aşağıda ifade edilmiştir.

$$f = f^0 + f_p \quad (2.3)$$

burada,

f^0 = yüzey sürtünme faktörü,

f_p = içeri akıştan kaynaklanan sürtünme faktörü ve

burada,

$$f_p = 4D \left(\frac{q_i / \Delta x}{q_m} \right) + 2 \frac{D}{n} \left(\frac{q_i / \Delta x}{q_m} \right)^2 \quad (2.3a)$$

burada,

D = boru iç çapı (m),

n = perforasyon yoğunluğu (m^{-1}),

$q_i / \Delta x$ = birim uzunluk boyunca içeri akış ($m^3/s/m$) ve

q_m = ana akış debisidir (m^3/s).

Islam ve Chakma yatay kuyularda akışı deneysel ve matematiksel olarak modelleyebilmek için çalışmışlardır [9]. Deneyler petrol, su ve gaz karışımları ile çok fazlı ve perforasyon akışı olarak yapılmıştır. Sonuç olarak perforasyonlu borunun normal boru akış davranışını göstermediğini belirtmişlerdir.

Özkan ve diğerleri yatay kuyu uygulamalarında iletkenliğin etkisini incelemek için analitik bir model geliştirmişlerdir [10]. Bu modelde kuyu içinde ve rezervuardaki akış birlikte değerlendirilmekte ve kuyudaki akışın laminar ve türbülanslı olduğu durumlar dikkate alınmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları yatay kuyulardaki basınç düşümünün her zaman ihmal edilemeyeceğini, sonsuz iletken kuyu ve kuyu yüzeyindeki her noktadan eşit akışkan girişi durumunda bu varsayımların yanlış sonuçlara yol açabileceğini ortaya koymuştur.

Brekke ve Lien, ince tabakalı petrol zonlarından üretim yapan ve kuyunun perforasyonlu kısmındaki sürtünmeye bağlı basınç kayıpları nedeniyle üretimin sınırlanması problemi olan yatay kuyular için çeşitli tamamlama tekniklerinin kullanımı ile üretimin geliştirilebilirliğini araştırmışlardır [11]. Çalışmalarında kuyunun perforasyonlu kısmına ve kuyu boyunca uygulanabilecek 3 optimizasyon konusundan "Stinger" tamamlama tekniği ayrıntılı olarak araştırılmış ve matematiksel olarak sürtünmeden kaynaklanan kayıpların azalmasıyla kuyu üretiminin arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca Kuzey denizindeki iki yatay kuyuda uygulanan bu teknik ile üretimin geliştiğini ve kuyunun perforasyonlu kısmında olan sürtünme basınç kayıplarının azaldığını gözlemlemişlerdir.

Kloster, 6 5/8 inch çaplı, 17 ft uzunluğunda, 14 ft'lik ve foot başına 180 deliği (perforasyonu) olan donanımı ile deneyler yapmıştır [12]. Deneyler 60000-450000 arasında değişen Reynolds sayılarında perforasyonlardan enjeksiyonun olduğu ve olmadığı durumlar için yapılmıştır. Çalışmanın sonunda enjeksiyonsuz durum için sürtünme faktörü Reynolds sayısı ilişkisinin normal boru akışı davranışını göstermediğini ve sürtünme faktörünün normal borulardan %25 ile %70 fazla

olduğunu belirtmiştir. Düşük enjeksiyon debilerinde sürtünme faktörünün azaldığını da gözlemlemiştir.

Su ve Gudmundsson tarafından yapılan deneysel bir çalışmada perforasyonlar boru iç yüzeyinde yükseltiiler şeklinde modellenmiş ve sadece çıkıntılar göz önüne alınarak sürtünme faktörünü enjeksiyon akışının var olduğu durum gibi düşünerek hesaplanmışlardır [13]. Pürüzlülük fonksiyonunu bu çalışma sonucunda aşağıdaki denklem ile tanımlamışlardır.

$$\frac{\Delta u}{u^*} = 7.0 \frac{d_p}{D} \quad (2.4)$$

burada;

$$\frac{\Delta u}{u^*} = \text{pürüzlülük fonksiyonu (} u^* \text{ sürtünme hızı),}$$

$$d_p = \text{perforasyon çapı ve}$$

$$D = \text{boru iç çapıdır.}$$

Su ve Gudmundsson bu denklemi evrensel hız dağılımı kanunun içine koyarak pürüzlü borular için aşağıdaki ilişkiyi elde etmişlerdir.

$$\sqrt{\frac{8}{f_{MR}}} = 2.5 \ln \left(\frac{Re}{2} \sqrt{\frac{f_{MR}}{8}} \right) + A - \frac{\Delta u}{u^*} - 3.75 \quad (2.5)$$

burada

- f_{MR} = boru akışı için pürüzlü sürtünme faktörü (Moody)
 A = Evrensel hız dağılımı kanununda pürüzsüz yüzey için sabit
 Re = Reynolds sayısıdır.

Yuan, yatay kuyuda tek perforasyondan kaynaklanan basınç kayıplarını inceleyen deneysel bir çalışmada, 0.03175 m çaplı perforasyondan 0.0254 m çaplı ana hatta enjeksiyon deneyleri gerçekleştirmiştir [14]. Deneyler değişik enjeksiyon/ana hat debi oranlarında (0.2 - 0.01) yapılarak sonuçları modelleyen bir korelasyon türetilmiştir. Denklem (2.6)'da verilen bu korelasyonda görünür sürtünme faktörünün Reynolds sayısına, boru pürüzlülüğüne, enjeksiyon/ana hat toplam debi oranına ve akış hızı profiline bağlı olduğunu belirtilmektedir.

$$f_T = f_w + 4R \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{\Delta x} \right) + \frac{4R}{\Delta x} \frac{q_i}{(q_m + q_i)} \left(2\beta_1 - \frac{V_x}{\bar{u}_2} \beta_p - \beta_1 \frac{q_i}{q_m + q_i} \right) \quad (2.6)$$

burada,

- f_w = yüzey sürtünme faktörü,
 R = boru yarıçapı,
 β_1 = perforasyon akışı öncesi momentum düzeltme faktörü,
 β_2 = perforasyon akışı sonrası momentum düzeltme faktörü,
 Δx = perforasyonu içine alan kontrol hacmi uzunluğu,
 q_i = enjeksiyon debisi,
 q_m = ana hat debisi,

- V_x = perforasyonda enjeksiyonun eksenel yönündeki hız bileşenini
 $\bar{u}_2$ = akış sonrası hızı oranı ve
 β_p = perforasyon akışı momentum düzeltme faktörüdür.

Yukarıda özetlenen çalışmalardan Yuan ve Asheim ve diğerlerinin çalışmalarının sonuçları bu tez kapsamında irdelenen konular açısından özellikle önemlidir. Bu nedenle bu çalışmalar Bölüm 4'te ayrıntılı olarak tekrar ele alınmıştır.

Petrol mühendisliği ve diğer disiplinlerde yatay kuyu hidroliği ile ilgili yapılan çalışmalar yatay kuyu akış davranışının sıradan boru akış davranışı göstermediğini belirtmektedirler. Yatay kuyu akış davranışındaki farklılığın perforasyonlardan kaynaklandığı yapılan araştırmalardan kanıtlanmış ve perforasyonlardan akışı da içeren yeni sürtünme faktörü denklemleri çıkarılmıştır.

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Donanım

Çalışmada kullanılan deney donanımının şematik gösterimi Şekil 3.1’ de verilmiştir. Donanım çelik profiller üzerinde oluşturulmuş 2.54 cm iç çaplı şeffaf plastik hortum, pompalar, depolama tankı ve basınç ölçüm panosundan oluşmaktadır. Boru üzerindeki perforasyonlar 8 mm ve 4 mm çapında olup, her iki perforasyon için aynı deney sistemi kullanılmış ve basınç ölçümleri amaca uygun olarak tasarlanmış ölçüm panosundan yapılmıştır. Donanım iki ana bölümden oluşmaktadır, birinci bölüm ana hat akışını ve perforasyon (enjeksiyon) akışını sağlayan akış hattı, ikinci bölüm ise bu akış hattı üzerinde basınç ölçümlerinin gerçekleştirildiği ve perforasyonların da yer aldığı test bölümüdür.

3.2 Akış Hattı

Akış hattı iki bölümden oluşmaktadır, birinci bölüm yatay kuyu içinde akışın modellendiği ana akış hattı, ikinci bölüm ise yatay kuyu içine olan akışın modellendiği perforasyon akış hattıdır. Her iki bölüm yatay kuyuya perforasyondan olan akışın modellendiği donanımı oluşturur.

3.2.1 Ana Akış Hattı

Yatay kuyu içinde akışı modellemek üzere, su bir depodan alınıp, pompa yardımıyla bir akış hattında dolaştırılmıştır. Ana akış hattı olarak adlandırılan bu boru hattının uzunluğu boru içine giren akışkanın kararlı akış profiline ulaşabileceği maksimum uzunluğa test bölümü uzunluğu eklenerek bulunmuştur. Bu hesaplama yapılırken literatürde yapılan açıklamaların yanısıra Newton türü akışkanlar için tanımlanan “giriş uzunluğu” kavramında dikkate alınmıştır [14, 15-17].

Ana hatta akış iki ayrı pompa ile sağlanmıştır. Yüksek debiler için (>30 l/dk) santrifüj pompa, düşük debiler için hidroforlu santrifüj pompa kullanılmıştır. Hidroforlu santrifüj pompanın kullanılmasının bir diğer sebebi de düzenli akış sağlamaktır. Her iki pompaya bağlanan küresel vanalarla oluşturulmuş by-pass hattı debi ayarlamaları için kullanılmış ve pompaların gereğinden fazla zorlanması da engellenmiştir. Çalışmanın ilk aşamalarında debi ölçümleri pompa çıkış ucuna bağlanmış mekanik debimetre ile yapılmıştır. Mekanik debimetrenin duyarlılığının $\pm \%10$ olmasına bağlı olarak yeterli verim alınamaması nedeni ile bu debimetre devreden çıkarılmıştır. Ana hat debisinin ölçümü terazi ile tartma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.2.2 Perforasyon Akış Hattı

Rezervuardan yatay kuyuya enjeksiyon akışı olarak da tanımlanan akışı modellemek üzere perforasyon akış hattı tasarlanmıştır. Yatay kuyu içine akış boruların üzerinde belirli çaplarda açılmış deliklerden (perforasyon) olmaktadır. Bu olay çalışmada ana akış hattının test bölümü üzerinde belirli çaplarda açılmış perforasyonlardan pompa yardımı ile su enjeksiyonu şeklinde gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyon santrifüj pompa ile değişik debilerde yapılmıştır. Bu pompanın çıkışına da akış debisinin küresel vanalar ile kontrol edildiği by-pass hattı konulmuştur. Debi ölçümleri için terazi ile tartma yöntemi kullanılmıştır.

3.3 Test Bölümü

Test bölümünün boru akış hattının hangi kesiminde yer alacağını belirlenmesinde ana hat akışının tam gelişmiş kararlı akış profiline ulaşması kistas olarak alınmıştır. Bu amaçla Bölüm 3.2.1’de özetlenen çalışma sonucunda hesaplanan 21.0 m’lik giriş uzunluğundan sonraki 2.8 m’lik bölüm test akış hattı olarak belirlenmiştir.

Deneylerde amaç perforasyondan akışkan enjeksiyonun olduğu ve olmadığı durumlarda boru içindeki basınç değişimlerini ölçmektir. Basınç ölçümlerini gerçekleştirebilmek için hortumun üzerine değişik aralıklarla delikler açılarak 4 mm iç çaplı metal çubuklar bağlanmıştır. Bu deliklerin açılması ve çubukların takılması sırasında ek pürüzlülüğü önlemek için her deliğe standart olan hassas işlemler uygulanmıştır. Basınç değerlerini belirlemek için ölçüm panosundaki cam tüplerle çubuklar arasında hortumlarla bağlantı yapılmış ve basınç cam tüpler içinde yükselen su sütunu ile gözlemsel olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm bölümü Şekil 3.2’ de ve perforasyonların donanım üzerindeki yerleri Şekil 3.3’te gösterilmiştir.

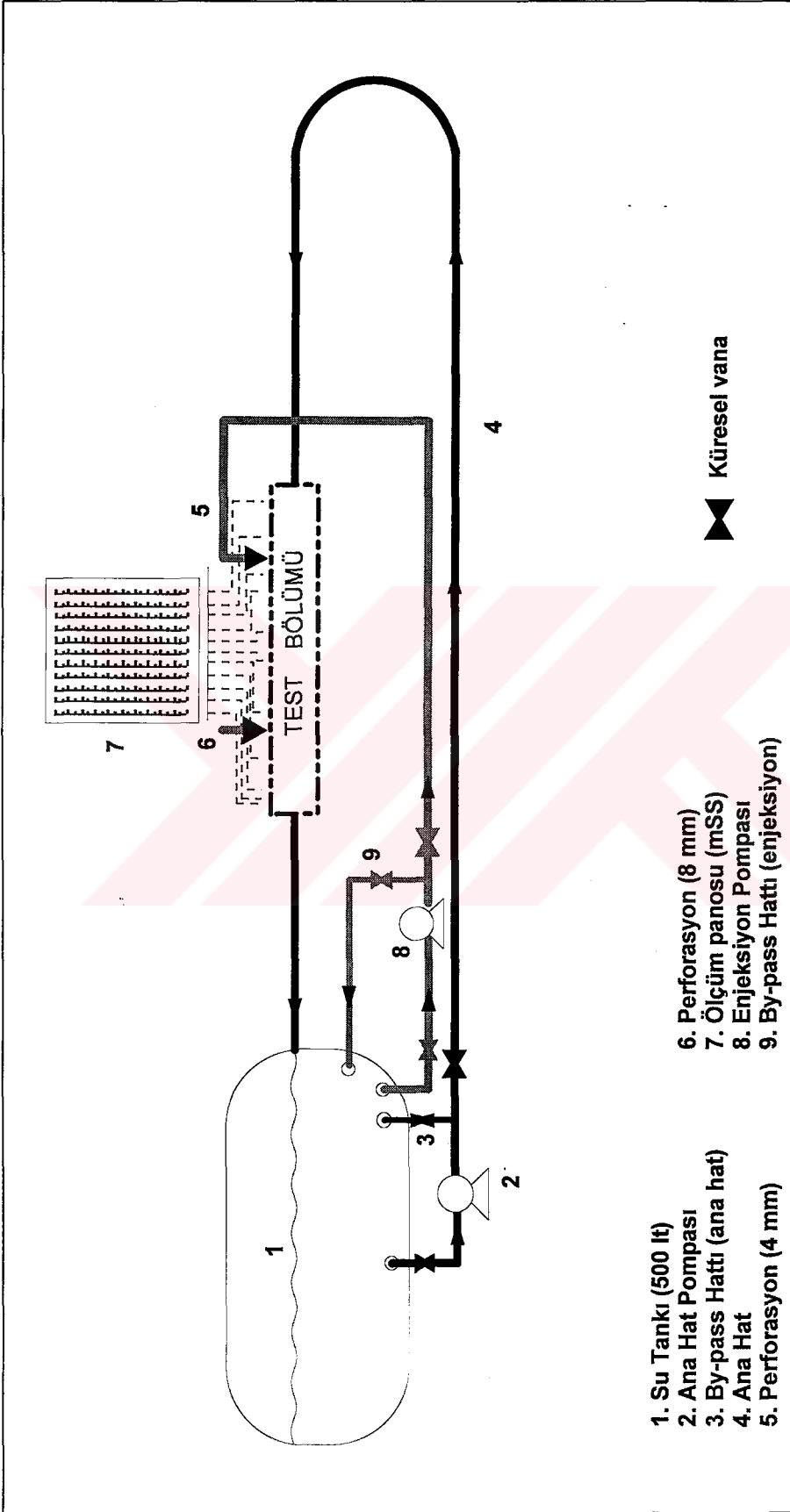
Deneyde basınç ölçümleri için su dışında bir sıvı kullanılmamış, su seviyesi ölçümleri ile hat boyunca basınç farkları değerlendirilmiştir.

3.4 Deney Prosedürü

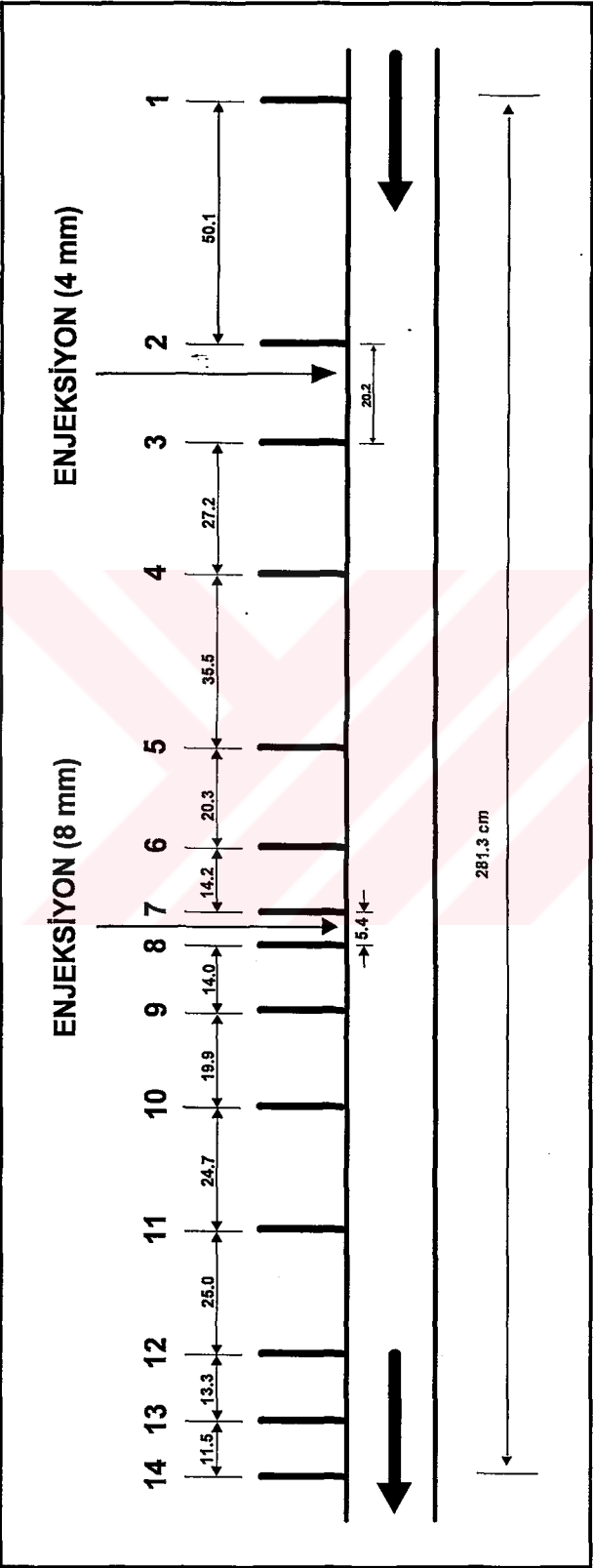
Her deney seti için enjeksiyon debisi deney başlamadan önce belirlenmiş ve farklı ana hat debileri için basınçlar ölçülerek kaydedilmiştir. Deney prosedürü şu şekilde adımlanmıştır.

1. Ana hat pompasının açılarak ana hat akışının sağlanması
2. Enjeksiyon vanasının kapatılması.
3. Hat boyunca hava kontrolünün yapılması ve hatta hava bulunması durumunda havanın alınması.
4. Terazi ile tartma yöntemi ile ana hat debisinin belirlenmesi.
5. Ölçüm panosundan basınç ölçümlerinin yapılması.
6. Enjeksiyon vanasının açılması.
7. Enjeksiyon pompasının açılarak perforasyondan akışının sağlanması.
8. Hat boyunca hava kontrolünün yapılması ve hatta hava bulunması durumunda havanın alınması.
9. Ölçüm panosundan basınç ölçümlerinin yapılması.
10. Enjeksiyon pompasının kapatılması.
11. Ana hat debisinin vana yardımıyla değiştirilmesi.
12. İzleyen deneylere 2. adımdan devam edilmesi.

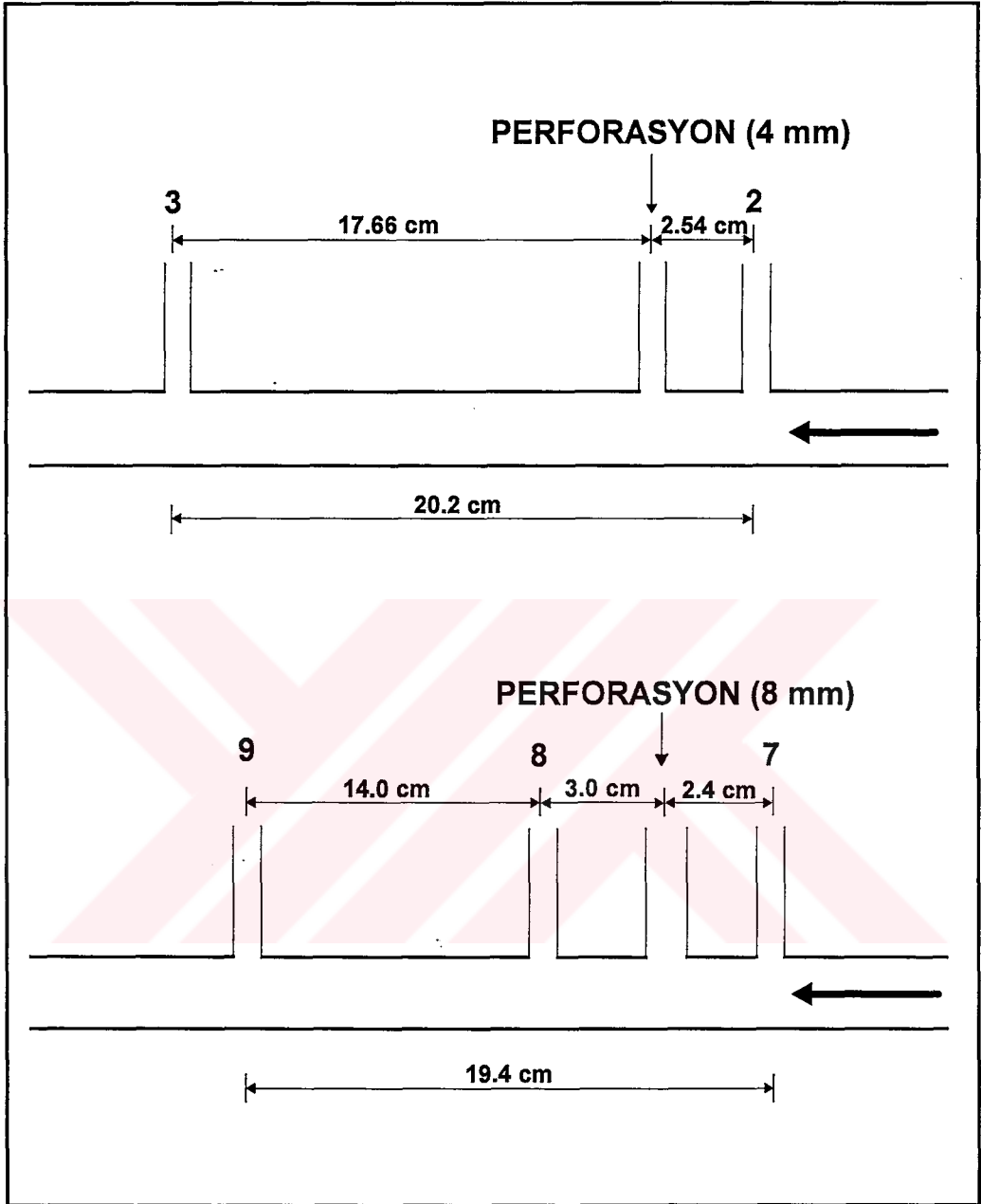
Enjeksiyon olmadığı durumlarda 6 -10. adımlar atlanmaktadır.



Şekil 3.1 Deney donanımı şematik gösterimi



Şekil 3.2 Donanım test bölümü



Şekil 3.3 Perforasyonların donanım üzerindeki yerleri

Tablo 3.1 Deney Malzemeleri ve Özellikleri

Pompalar

Ana Hat

Santrifüj Pompa (Yüksek Debi)

Maksimum debi	: 100 l/dk
Minimum debi	: 20 l/dk
Maksimum yükseklik	: 31.5 m
Devir	: 2800 dk ⁻¹
Güç	: 1.0 HP
Giriş	: 220 V
Çıkış ucu çapı	: 2.54 cm
Giriş ucu çapı	: 5.08 cm

Hidroforlu Santrifüj Pompa (Düşük Debi)

Maksimum debi	: 40 l/dk
Minimum debi	: 5 l/dk
Maksimum yükseklik	: 40 m
Devir	: 2900 dk ⁻¹
Güç	: 0.5 hp
Giriş	: 220 V
Çıkış ucu çapı	: 2.54 cm
Giriş ucu çapı	: 2.54 cm

Hidrofor

Maks. su kapasitesi	: 24 l
Maks. basınç	: 8 bar
Sıcaklık	: 50 °C

Enjeksiyon Hattı

Santrifüj Pompa (Düşük Debi)

Maksimum debi	: 40 l/dk
Minimum debi	: 5 l/dk
Maksimum yükseklik	: 40 m
Devir	: 2900 dk ⁻¹
Güç	: 0.5 hp
Giriş	: 220 V
Çıkış ucu çapı	: 2.54 cm
Giriş ucu çapı	: 2.54 cm

Tablo 3.1 *devam*

<u>Tank</u>			
Su Tankı		CETP tank	
		Maksimum kapasite : 500 l	
<u>Cam Tüp Manometre</u>			
		Giriş ucu çapı	: 6 mm
		İç çap	: 9.5 mm
		Dış çap	: 12 mm
		Uzunluk	: 1.2 m
<u>Debimetreler</u>			
Enjeksiyon Debimetresi		Ölçüm aralığı	: 0.8 - 2.4 l/dk
Ana Hat Debimetresi		Ölçüm aralığı	: 10 - 30 l/dk
<u>Vanalar</u>			
Ana hat			
2.54 cm çaplı küresel vana (Hatta giriş ucu)			
2.54 cm çaplı küresel vana (By-pass ucu)			
Enjeksiyon hattı			
1.27 cm çaplı küresel vana (Hatta giriş ucu)			
2.54 cm çaplı küresel vana (By-pass ucu)			

BÖLÜM 4

ANALİTİK MODEL

Bu bölümde boru yüzeyinden boru akışına dik akıştan (perforasyon akışı) meydana gelen basınç kayıplarını hesaplamak üzere geliştirilen analitik modeller tartışılmıştır. Bu konuyla ilgili olarak literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur [8, 14]. İncelenen problemin çok karmaşık olması nedeni ile bütün modellerde varsayımlar yapılarak basitleştirme yoluna gidilmiştir.

Bu bölümde amaç var olan modellere ek olarak yeni ve daha gelişmiş modeller geliştirmek değildir. Esas olarak analitik modeller deneysel çalışma sonuçlarının korelasyonunda kullanılacak parametre ve parametre gruplarının belirlenmesine yardımcı olmak amacı ile ele alınmaktadır. Bu amaç çerçevesinde daha önce Bölüm 2’de bahsedilen analitik modellerden sadece ikisi ele alınacaktır. Birbirinden yapısal farklılıklar gösteren her iki analitik model de aynı korelasyon gruplarının varlığına işaret etmektedir.

Asheim ve diğerleri yatay boru üzerinde perforasyondan akış nedeni ile ana hat akışına oluşan direnci modellemişlerdir [8]. Perforasyondan akışın olduğu boru içindeki momentum değişimi dikkate alınarak basınç düşümünü veren aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\Delta p_p = \rho v^2 \left[2 \frac{v_p}{v} \left(\frac{d_p}{D} \right)^2 + \left(\frac{v_p}{v} \right)^2 \left(\frac{d_p}{D} \right)^4 \right] \quad (4.1)$$

Bu denklemde u ve u_p sırasıyla boru içinde ve perforasyondan olan akış hızlarını, Δp_p tek bir perforasyon için basınç kaybını, d_p perforasyon çapını, D ise boru iç çapını göstermektedir.

Denklem (4.1) tek bir perforasyondan enjeksiyonu öngörür. Sürekli perforasyon dağılımı dikkate alındığında Asheim ve diğerleri aşağıdaki basınç gradyanı ilişkisinin kullanılabileceğini ileri sürmüştür.

$$\left. \frac{dp}{dx} \right|_p = \rho u^2 \left[2 \left(\frac{q_i / \Delta x}{q_m} \right) + \frac{1}{n} \left(\frac{q_i / \Delta x}{q_m} \right)^2 \right] \quad (4.2)$$

Bu denklemde soldaki terim basınç gradyanını, $q_i / \Delta x$ ve q_m sırasıyla birim uzunluk boyunca içeri akış ve boru ana akış debilerini, n ise perforasyon yoğunluğunu göstermektedir.

Denklem (4.2)'de perforasyon boyunca momentum değişimi dikkate alınarak elde edilen ifade perforasyon akışı için sürtünme faktörü ifadesi elde etmekte kullanılabilir. Buna göre sürtünme faktörü f_p ile gösterilmiş olup aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$f_p = 4D \frac{q_i / \Delta x}{q_m} + 2 \frac{D}{n} \left(\frac{q_i / \Delta x}{q_m} \right)^2 \quad (4.3)$$

Akışın meydana geldiği bölgede toplam sürtünme faktörü ise yüzey sürtünme faktörü (f_w), ile perforasyon sürtünme faktörü (f_p)'nin toplamı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

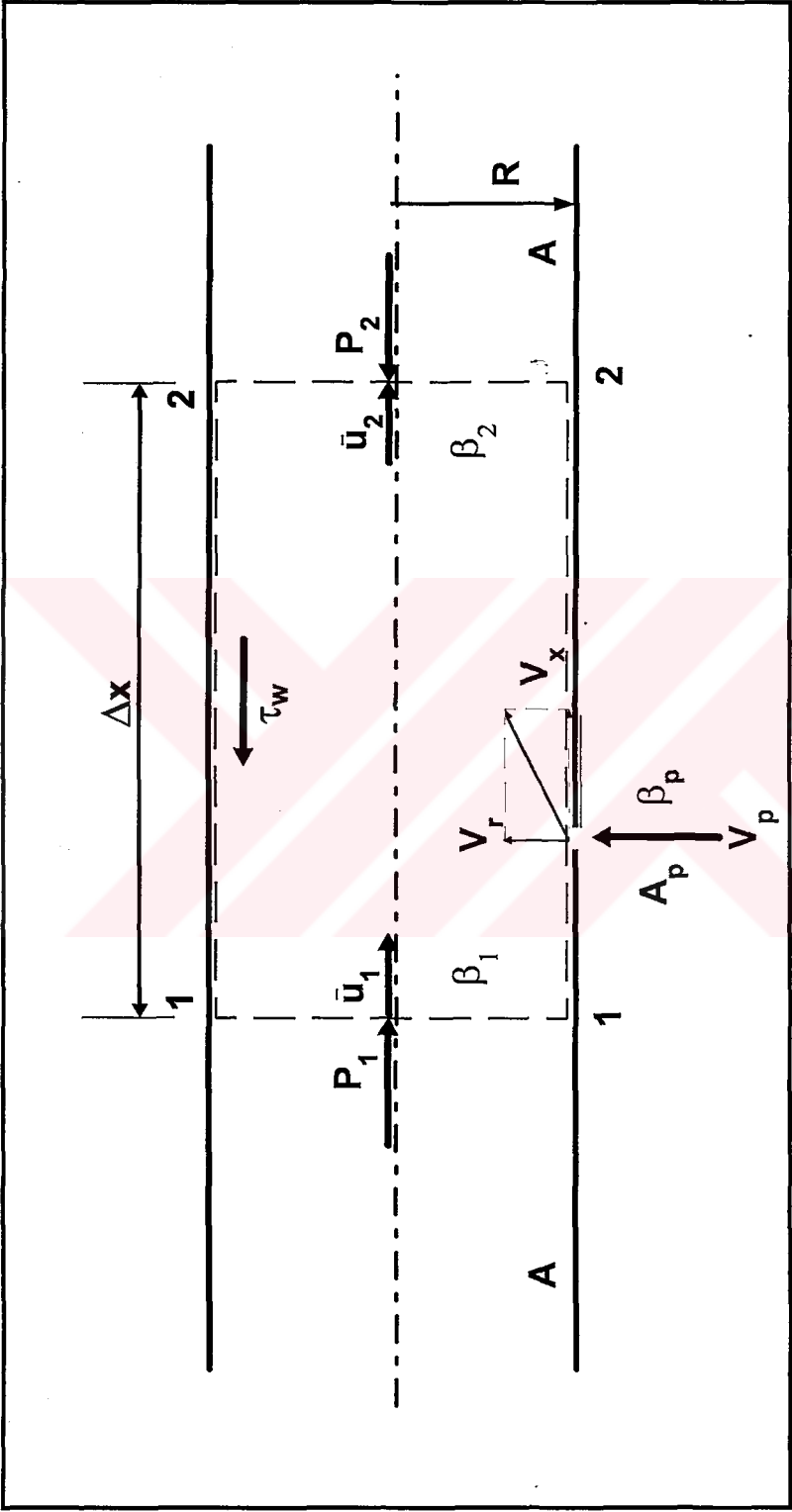
$$f = f_w + f_p \quad (4.4)$$

Asheim ve diğerleri tarafından Denklem (4.2), (4.3) ve (4.4)'te ortaya konan analitik ifadeler 14000 ile 84000 Reynolds sayısı aralığında deneysel yöntemlerle test edilmiş ve $u_p < 3u$ koşulunda iyi sonuçlar verdiği ileri sürülmüştür.

Bu konuda diğer bir çalışma da Yuan tarafından gerçekleştirilmiştir [14]. Yuan modelinde Şekil 4.1'de görülen ve bir perforasyon içeren kontrol hacmi dikkate alınarak eksenel yöndeki momentum korunumu ilkesi uygulanmış ve momentum dengesi aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$p_1 A - p_2 A - \tau_w 2\pi R \Delta x = \rho A \beta_2 \bar{u}_2^2 - \rho A \beta_1 \bar{u}_1^2 - \rho V_x V_p \beta_p A_p \quad (4.5)$$

Burada p_1 , p_2 giriş ve çıkış uçlarındaki basınçları, A boru kesit alanını, τ_w yüzey kayma gerilmesini, R boru yarıçapını, Δx kontrol hacmi uzunluğunu, β_1 ve β_2 giriş ve çıkış uçlarındaki momentum düzeltme faktörlerini, $\bar{u}_1$ ve $\bar{u}_2$ giriş ve çıkış uçlarındaki ortalama akışkan hızlarını, V_x ve V_p sırasıyla perforasyondan giren



Şekil 4.1 Yuan modelinde kullanılan kontrol hacmi

akışkanın boru içinde aksel ve radyal yöndeki hız bileşenlerini (süreklilik koşulu nedeniyle perforasyonda giren akışkanın hızı akışkanın boru içindeki radyal hız bileşenine eşit kabul edilmiştir, $V_p=V_r$), β_p perforasyondan akış için momentum düzeltme faktörünü ve A_p perforasyon kesit alanını göstermektedir.

Yukarıda verilen ifade toplam görünür sürtünme faktörünü verecek şekilde yeniden düzenlenebilir. Görünür sürtünme faktörü basınç gradyanının fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$f_T = - \left(\frac{p_2 - p_1}{\Delta x} \right) / \frac{\rho \bar{u}^2}{4R} \quad (4.6)$$

Yüzey sürtünme faktörü f_w için ise aşağıdaki ifade kullanılabilir.

$$f_w = \frac{8\tau_w}{\rho \bar{u}^2} \quad (4.7)$$

Burada, τ_w yüzey kayma gerilmesini, ρ akışkan yoğunluğunu ve $\bar{u}^2$ ortalama ana akış hızını ifade etmektedir.

Süreklilik denklemi kullanılarak, giriş hızı $\bar{u}_1$, çıkış hızı $\bar{u}_2$ cinsinden

$$\bar{u}_1 = \bar{u}_2 - V_p \frac{A_p}{A} \quad (4.8)$$

şeklinde yazılacak olursa Denklem (4.6 - 4.8) kullanılarak Denklem (4.5) aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilir.

$$f_t = f_w + 4R \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{\Delta x} \right) + \frac{4R}{\Delta x} \frac{q_i}{(q_m + q_i)} \left(2\beta_1 - \frac{V_x}{\bar{u}_2} \beta_p - \beta_1 \frac{q_i}{q_m + q_i} \right) \quad (4.9)$$

Burada q_i enjeksiyon debisini ve q_m ana hat debisini göstermektedir.

Bu Denklem Yuan modelinin temel denklemidir. Denklem (4.9)'un sağ tarafındaki ilk terim yüzey sürtünme faktörünü, ikinci terim x yönündeki hız profili değişimlerini ve son terim ise enjeksiyondan kaynaklanan akışkan ivmesini ifade etmektedir. Yuan Denklem (4.9)'u aşağıdaki gibi düzenlemiştir.

$$f_t = f_w + C \frac{4R}{\Delta x} \frac{q_i}{(q_m + q_i)} \quad (4.10)$$

burada

$$C = 2\beta_1 - \frac{V_x}{\bar{u}_2} \beta_p - \beta_1 \frac{q_i}{(q_m + q_i)} + \frac{(\beta_2 - \beta_1)}{\left(\frac{q_i}{q_m + q_i} \right)}. \quad (4.11)$$

olarak verilmektedir.

Yuan deneysel çalışmalara dayanarak f_w ve C katsayısı için korelasyonlar geliştirmiştir. Buna göre yüzey sürtünme faktörü f_w için aşağıdaki korelasyon elde edilmiştir.

$$f_w = 80.45 \left(N_{Re} \right)^{-0.846} \quad (4.12)$$

C katsayısı için ise iki ayrı korelasyon geliştirmiştir. Düşük enjeksiyon/ana hat debi oranları için ($q_i/q_m \leq 0.06$), momentum düzeltme faktörleri 1 kabul edilerek deneme yanılma yoluyla $C=1.8$ olarak bulunmuştur. Daha yüksek oranlar için ($q_i/q_m > 0.06$) C aşağıdaki korelasyon ile tanımlanmıştır.

$$C = 3.6 - 0.207 \left(\frac{q_i}{q_m} \right)^{-0.76} \quad (4.13)$$

Bu korelasyonların elde edilmesi sırasında Reynolds sayısının 5000-60000 ve enjeksiyon/ana hat debi oranının 0.01-0.2 arasındaki değerleri için elde edilmiştir.

Gerek Asheim ve diğerleri gerekse Yuan tarafından geliştirilen görünür sürtünme faktörü ilişkileri genel olarak bir yüzey sürtünme faktörü f_w ile akışkan girişinden kaynaklanan ek bir sürtünme faktörü f_p 'nin toplamı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$f_t = f_w + f_p \quad (4.14)$$

Her iki çalışmada da akışkan girişinden dolayı ek sürtünme faktörü f_p 'nin q_i/q_t oranı ile korele edilebileceğini ortaya koyar ($q_t = q_i + q_m$, toplam debidir). Her iki çalışmada verilen denklemlerde açık olarak görülmesi de d_i/d_m oranının da bir korelasyon parametresi olarak yer alması beklenebilir (d_i perforasyon çapını ve d_m ana boru çapını ifade etmektedir.).

Bu aşamada daha sonra tekrar tartışılmak üzere iki konuya dikkat çekmek yararlı olacaktır. Birincisi yukarıda bahsedilen her iki çalışmada yer alan yüzey sürtünme faktörü teriminin yorumudur. Asheim ve diğerleri yüzey sürtünme faktörü f_w terimini perforasyonsuz boru için sürtünme faktörüne eşit kabul etmiştir. Buna karşılık Yuan'ın geliştirdiği Denklem (4.9)'da f_w perforasyondan akış olduğu durumdaki yüzey sürtünme faktörünü temsil etmektedir, ancak f_w için geliştirilen korelasyon enjeksiyon debisinin zayıf bir fonksiyonudur (f_w 'nin enjeksiyon debisine bağımlılığı toplam akış debisine bağımlılığı nedeniyledir; bu şekli ile akışın ana doğrultusuna dik yöndeki akışkan girişinin neden olacağı etkiyi içermesi beklenmez), perforasyon çapından ise bağımsızdır. Daha sonra da gösterildiği gibi gerek yukarıdaki çalışmalarda gerekse bu çalışmada elde edilen sonuçlar

karşılaştırıldığında f_w 'nin daha yakından incelenmesi gereken bir parametre olduğu ortaya çıkmaktadır. İkincisi Denklem (4.14)'deki f_p teriminin q_i/q_m 'nin fonksiyonu olarak göstermesi beklenen davranıştır. Gerek Asheim ve diğerleri gerekse Yuan tarafından geliştirilen korelasyonlar q_i/q_m oranı arttıkça f_p 'nin q_i/q_m ile orantılı olarak arttığını göstermektedir. Halbuki Denklem (4.9)'un dikkatli irdelenmesi halinde q_i/q_m büyüdükçe denklemin sağdaki üçüncü teriminin bir sabite yaklaşması gerektiği görülebilir. Bu durumda q_i/q_m 'nin büyük değerlerinde f_p 'nin değeri de bir sabite yaklaşmalıdır. Yine aynı denklemden q_i/q_m oranı küçüldüğünde f_p 'nin hızla sıfıra yönelmesi beklenmelidir (Denklem (4.9)'un sağındaki ikinci terim q_i/q_m 'nin küçük değerlerinde ihmal edilebilir, üçüncü terim ise $(q_i/q_m)^2$ ile orantılı olarak sıfıra yaklaşır). Bu gözlemler ilerki bölümlerde bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve geliştirilen korelasyon ile Asheim ve diğerleri ve Yuan tarafından geliştirilen korelasyonlar arasında q_i/q_m 'nin düşük ve yüksek oranlarında gözlenen farklılıkları açıklamakta kullanılmak üzere burada vurgulanmıştır.

BÖLÜM 5

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada toplam 474 deney gerçekleştirilmiştir. Her bir deney sırasında ana hattaki akış debisi enjeksiyon debisi ve ölçüm noktalarındaki basınçlar kaydedilmiştir. Deneyler sırasında su tankındaki su sıcaklığı, yoğunluğu ve akmazlığı da uygun aralıklarla ölçülmüştür. Ana hattaki akış debileri 5.6 l/dk ile 58.0 l/dk aralığında, enjeksiyon debileri ise 1.035-5.106 l/dk arasında değiştirilmiştir. Deneysel çalışma esas olarak iki evreye ayrılabilir. İlk evrede kullanılan donanımın test ve kalibrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiş ve perforasyondan akışın olmadığı durum için ölçümler yapılmıştır. İkinci evrede ise bu çalışmada geliştirilmesi amaçlanan görünür sürtünme faktörü korelasyonu için ölçümler yapılmıştır. Görünür sürtünme faktörleri deneyler sırasında ölçülen basınç ve akışkan özellikleri kullanılarak Denklem (4.6) yardımıyla hesaplanmıştır.

5.1 Sistemin Kalibrasyonu

Deneysel çalışmanın ilk aşamasında yapılan çalışmaların amacı deney donanımını test ve kalibre etmek ve yapılacak ölçümlerde kullanılacak standart yöntemi belirlemektir. İlk deneylerde basınç ölçümlerinin özellikle düşük ve yüksek debilerde yeterince hassas olmadığı gözlemlenmiş ve bu sorunun kullanılan pompaların kapasiteleri ile ilgili olduğu belirlenmiştir. Genel olarak geniş bir debi aralığına sahip pompalar özellikle aralığın alt ve üst uçlarında istenen performansı sağlayamamıştır. Bu soruna çözüm olarak yüksek ve düşük debilerde kullanılmak üzere küçük debi aralıklı pompalar kullanılmaya başlanmıştır.

Debi ve basınç okumalarının duyarlılığını artırdıktan sonra akış hattını oluşturan hortumun pürüzlülüğünü belirlemek üzere bir dizi deney yapılmıştır. Bu deneyler sırasında farklı debi değerleri için Şekil 3.2’de gösterilen 1 ve 2 numaralı ölçüm noktalarındaki basınç değerleri kaydedilmiştir. Şekil 5.1’de bu deneyler sonucu, Denklem (4.6) kullanılarak, hesaplanmış olan sürtünme faktörleri Reynolds sayısı, N_{Re} ’nin fonksiyonu olarak göstermektedir. Şekildeki doğru pürüzlülüğü sıfır olan bir boru içindeki akış için Blasius tarafından geliştirilmiş olan ve aşağıda ifade edilen korelasyonu göstermektedir.

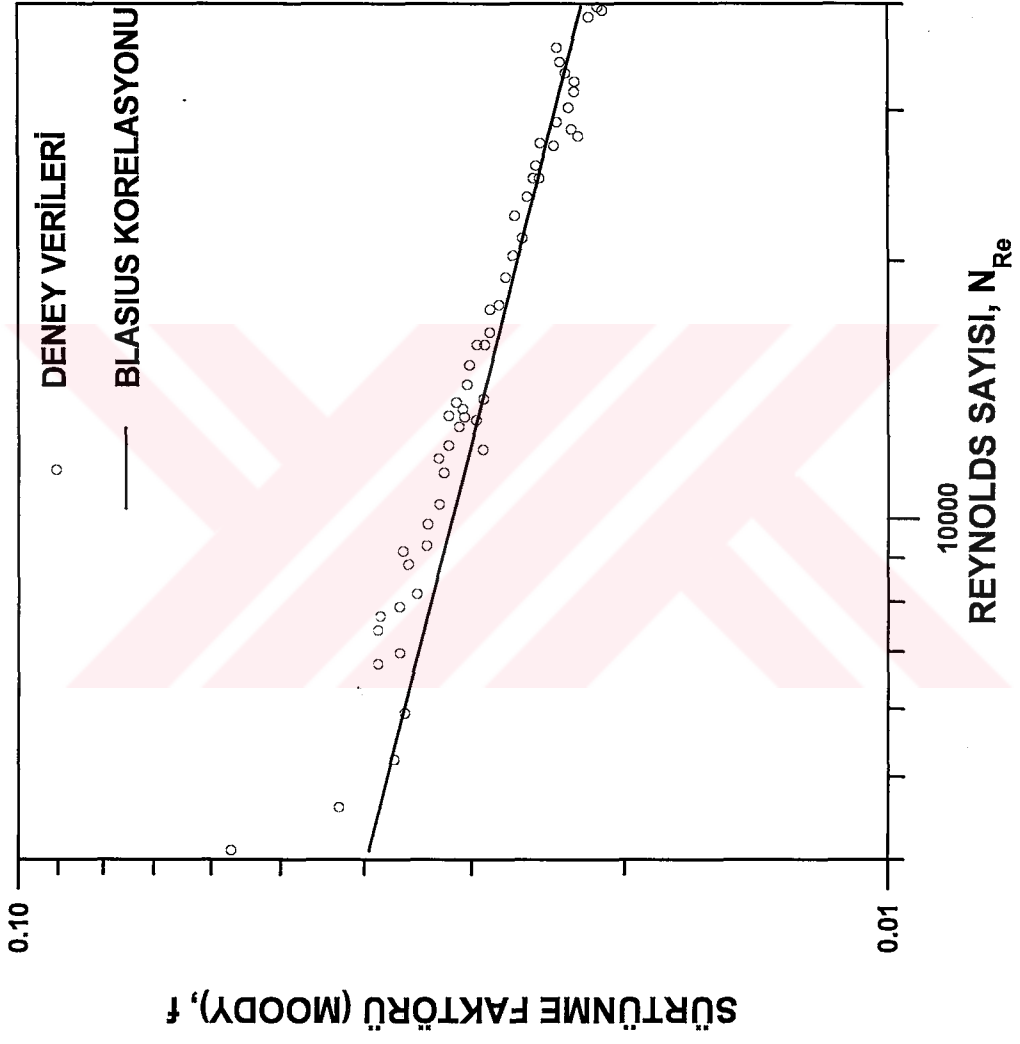
$$f = \frac{0.316}{(N_{Re})^{0.25}} \quad (5.1)$$

Şekilden görüleceği gibi deneylerde belirlenen sürtünme faktörü değerleri Blasius korelasyonunun belirlediği değerlerle uyumludur. Bu durum plastik bir boru için bekleneceği gibi pürüzlülüğün sıfır kabul edilebileceğini göstermektedir.

Bu çalışmalar sonucunda sistemin ölçümlere hazır olduğu belirlenmiş ve öncelikle akış hattındaki basınç profilinin incelenmesi ile esas deneysel çalışmalar başlatılmıştır.

5.2 Basınç Profili

Perforasyondan enjeksiyon sonucunda akış davranışında meydana gelen değişiklikler basınçta meydana gelen değişiklikler cinsinden gözlemlenebilir. Bu gözlemin daha sağlıklı yapılabilmesi için öncelikle enjeksiyon olmadığı durumdaki

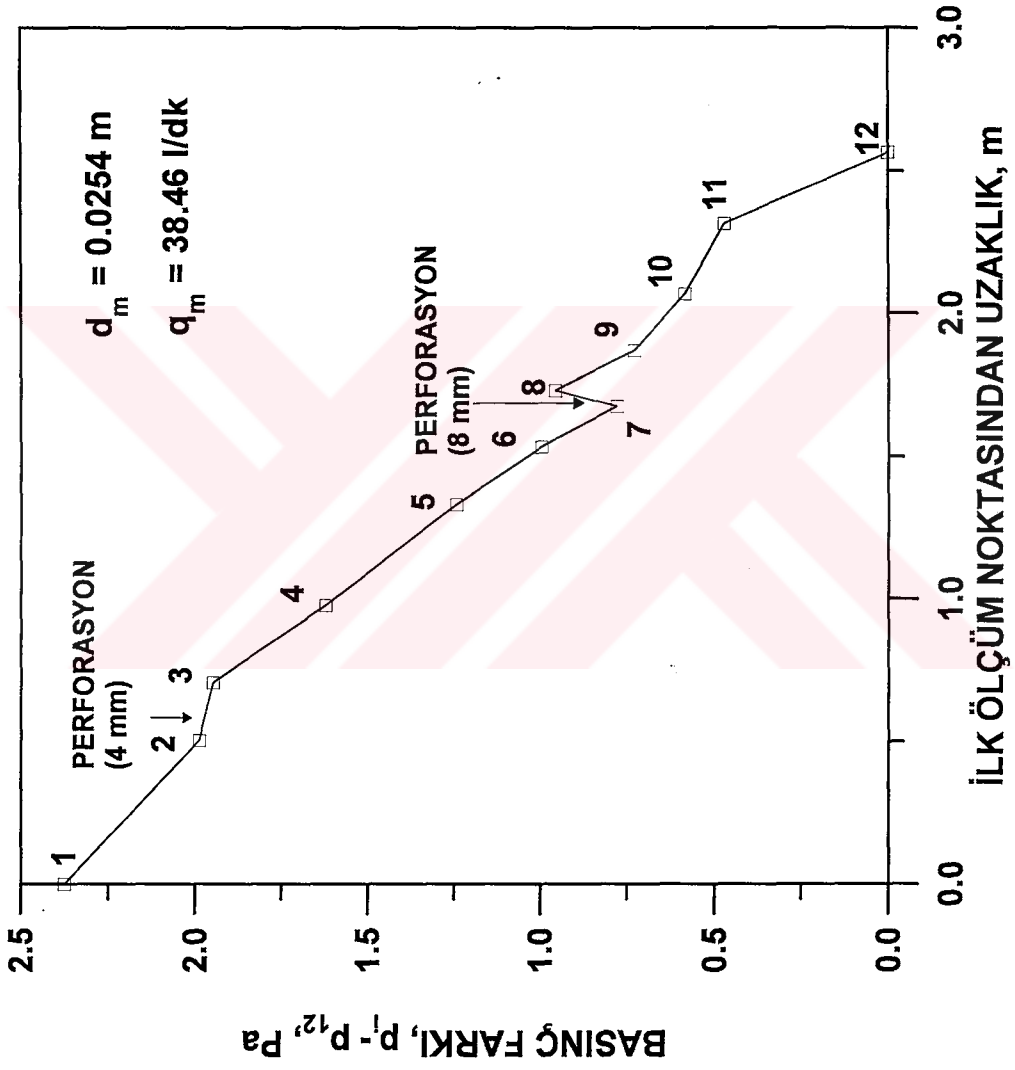


Şekil 5.1 Donanımın perforasyonsuz bölümü sürtünme faktörü davranışı

basınç profili incelenerek karakteristikleri belirlenmiştir. Daha sonra perforasyondan enjeksiyonun basınç profilinde meydana getirdiği değişikliği gözlemlemek için enjeksiyonlu ve enjeksiyonsuz ölçümler gerçekleştirilmiştir.

5.2.1 Perforasyondan Akışın Olmadığı Durum

Bu bölümde amaç basınç okumaları ve perforasyondan enjeksiyon için ana akış borusuna yapılan bağlantıların basınç profili üzerindeki etkisini belirlemektir. Şekil 5.2 ana hat akış debisinin $q_m = 38.46$ l/dk için gözlemlenen basınç profilini göstermektedir. Burada basınçlar 12 numaralı okuma noktasındaki basınçtan fark olarak gösterilmiştir. Görüldüğü gibi bağlantı yapılırken meydana gelen ek pürüzlülük, ölçüm noktalarında oluşan çukurluk ve bu noktalarda akışkan boru yüzeyi temasının akışkan-akışkan boru yüzeyi temasına dönüşmesi, boru boyunca sabit bir eğime sahip olması gereken basınç profilinin kırıklı bir şekle dönüşmesine neden olmaktadır. Bağlantı noktaları sıklaştıkça bu bağlantılardan dolayı akıştan meydana gelen düzensizliklerin ortadan kalkması için yeterli uzaklık olmadığından basınç profilindeki bozulma daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum özellikle 2-3 ve 7-8 aralıkları çevresinde daha belirgin hale gelmektedir. Bu aralıklarda enjeksiyon bağlantıları yer aldığından enjeksiyonun akış üzerinde meydana getirdiği değişimi gözleyebilmek için bu aralıklar çevresinde daha sık basınç okuma bağlantıları mevcuttur. Enjeksiyon bağlantısının çapı 2-3 aralığındaki basınç okumaları için kullanılan bağlantıların çaplarıyla aynıdır. Buna karşılık 7-8 aralığındaki enjeksiyon bağlantısının çapı diğer bağlantıların çapının iki katıdır. Bekleneceği gibi bağlantı çapı büyüdükçe basınç profili üzerindeki etkisi de artmaktadır. Burada özellikle 7-8 aralığında gözlenen basınç davranışı konusunda bir yorum yapmak gerekmektedir. Şekil 5.2 8 numaralı ölçüm noktasındaki basıncın 7 numaralı ölçüm noktasındakinden büyük olduğunu göstermektedir. Akışın 7 numaradan 8 numaraya doğru olduğu bilindiğine göre 8 numaralı ölçüm noktasındaki basıncın 7 numaradakinden düşük olması gerekir. Buradaki aykırı davranışın nedeni basınçların ölçümünün borunun üst orta noktasından yapılmasından



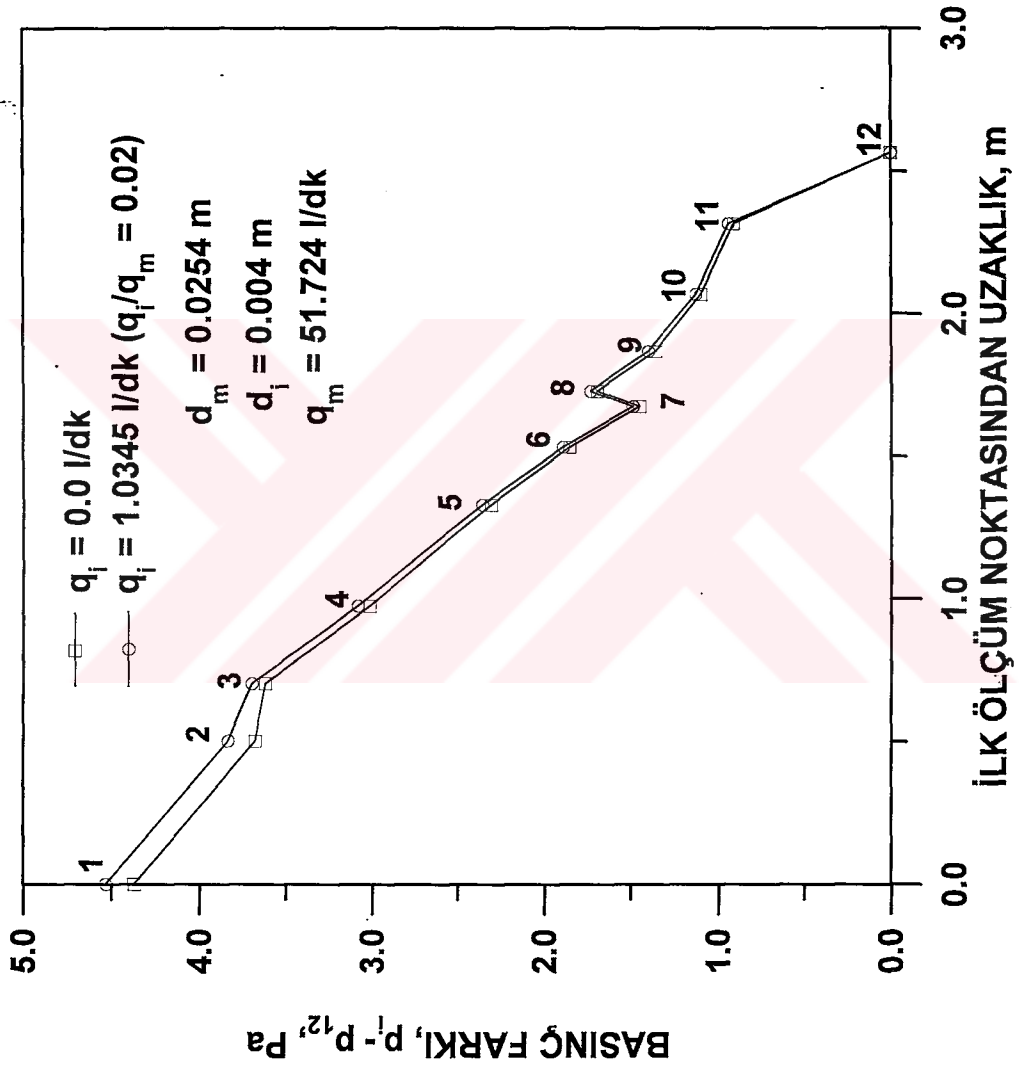
Şekil 5.2 Test bölümündeki basınç profili

kaynaklanmaktadır. Gerçekte akışkanın büyük kısmı borunun alt tarafında 7-8 yönünde akmakla birlikte basınç okuma ve enjeksiyon bağlantılarının neden olduğu türbülans borunun üst tarafındaki küçük bir aralıkda 8'den 7'ye doğru bir akış oluşmasına neden olmaktadır (burada 8 numaralı okuma noktası 7-8 aralığındaki 8 mm'lik enjeksiyon deliğinden 3 cm uzaktadır ve enjeksiyon deliğinin neden olduğu yoğun türbülans bölgesine düşmektedir). Benzeri bir olay 2-3 aralığında da meydana gelmekle birlikte enjeksiyon deliğinin çapı daha küçük (4 mm) ve 3 numaralı ölçüm noktası enjeksiyon deliğinden daha uzak (17.66 cm) olduğundan negatif basınç gradyanı gözlenmemektedir.

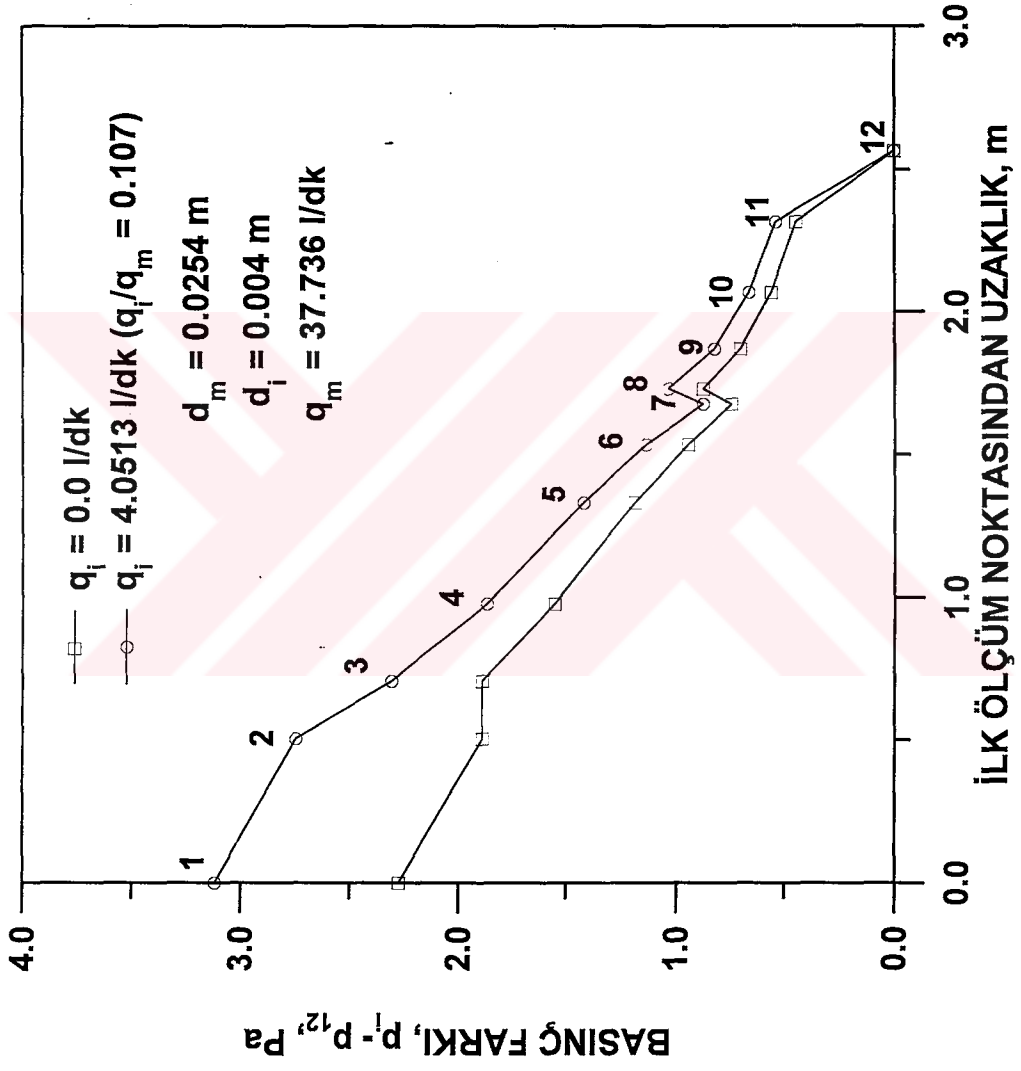
Şekil 5.2'de gözlenen basınç profili doğal olarak akış debisinde fonksiyonudur. Bu nedenle enjeksiyondan akışın etkisini incelemek için yapılan ölçümlerde öncelikle verilen bir akış debisi için enjeksiyon akışı yokken basınç profili çıkarılmış ve enjeksiyondan akış olan durum bu profil esas alınarak değerlendirilmiştir.

5.2.2 Perforasyondan Akışın Olduğu Durum

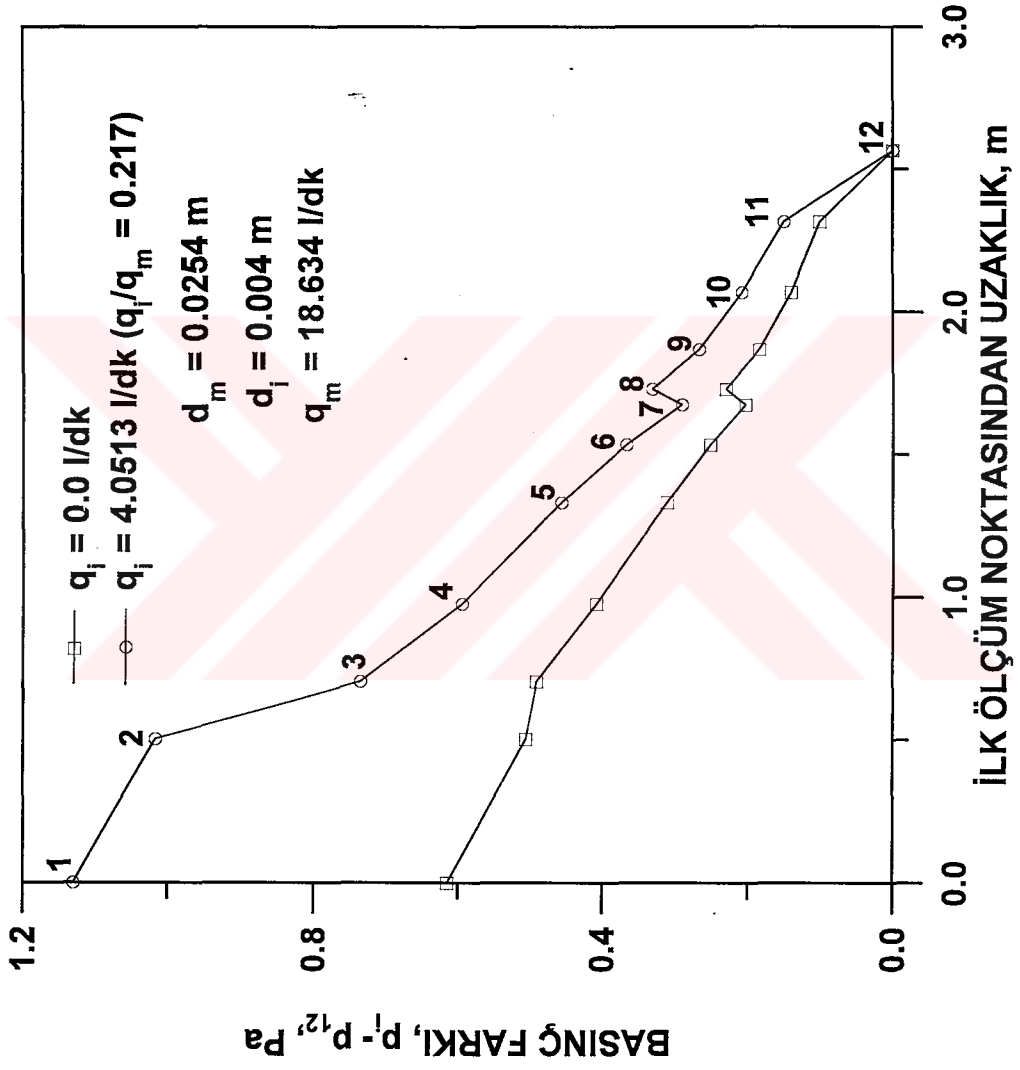
Yukarıda da değinildiği gibi perforasyondan akışın, akış davranışında meydana getirdiği değişikliğin analizini yapabilmek için perforasyondan enjeksiyonun olduğu ve olmadığı durumlardaki basınç profillerinin karşılaştırılması gerekir. Şekil 5.3, 5.4 ve 5.5'de 4 mm'lik perforasyondan sırası ile $q_i/q_m = 0.02, 0.107$ ve 0.217 oranlarında enjeksiyon yapıldığı durumlardaki basınç profilleri enjeksiyonun olmadığı durumdakilerle karşılaştırılmıştır. Görüleceği gibi q_i/q_m oranı arttıkça basınç profilindeki değişim de artmaktadır. Bunun nedenlerinden birincisi enjeksiyonun boruda akan toplam debiyi artırması diğeri ise debinin artmasına neden olan akışkanın ana akış yönüne dik (perforasyondan) olarak boruya girmesidir. Ancak q_i debisi q_m debisine akış profilinde değişikliğe neden olmadan eklense de basınç profili değişeceğine göre enjeksiyondan girişin akış davranışında neden olduğu değişimi sadece basınç profilindeki değişimlere bakarak ayırt edebilmek mümkün değildir. Bu nedenle, enjeksiyondan girişin akış davranışında meydana



Şekil 5.3 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.02$)

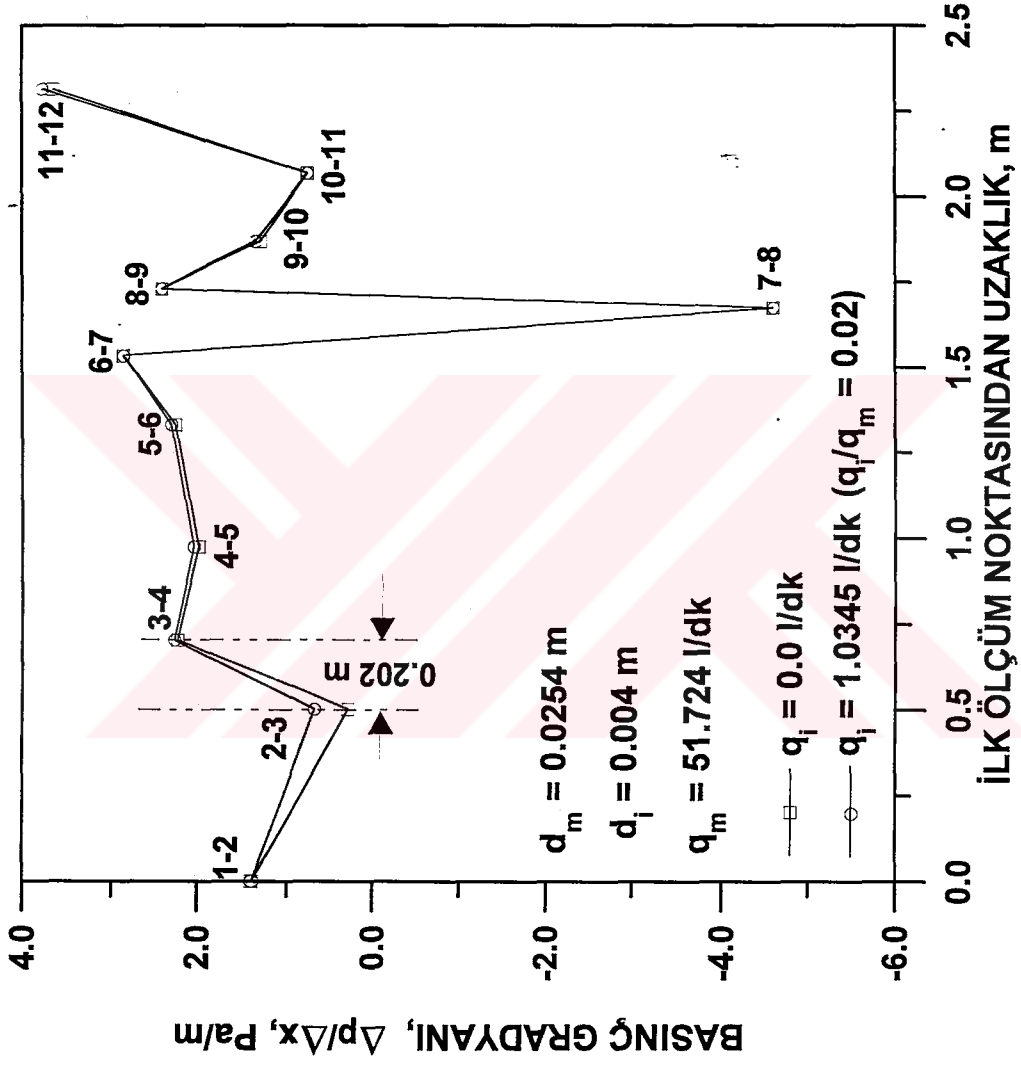


Şekil 5.4 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.107$)

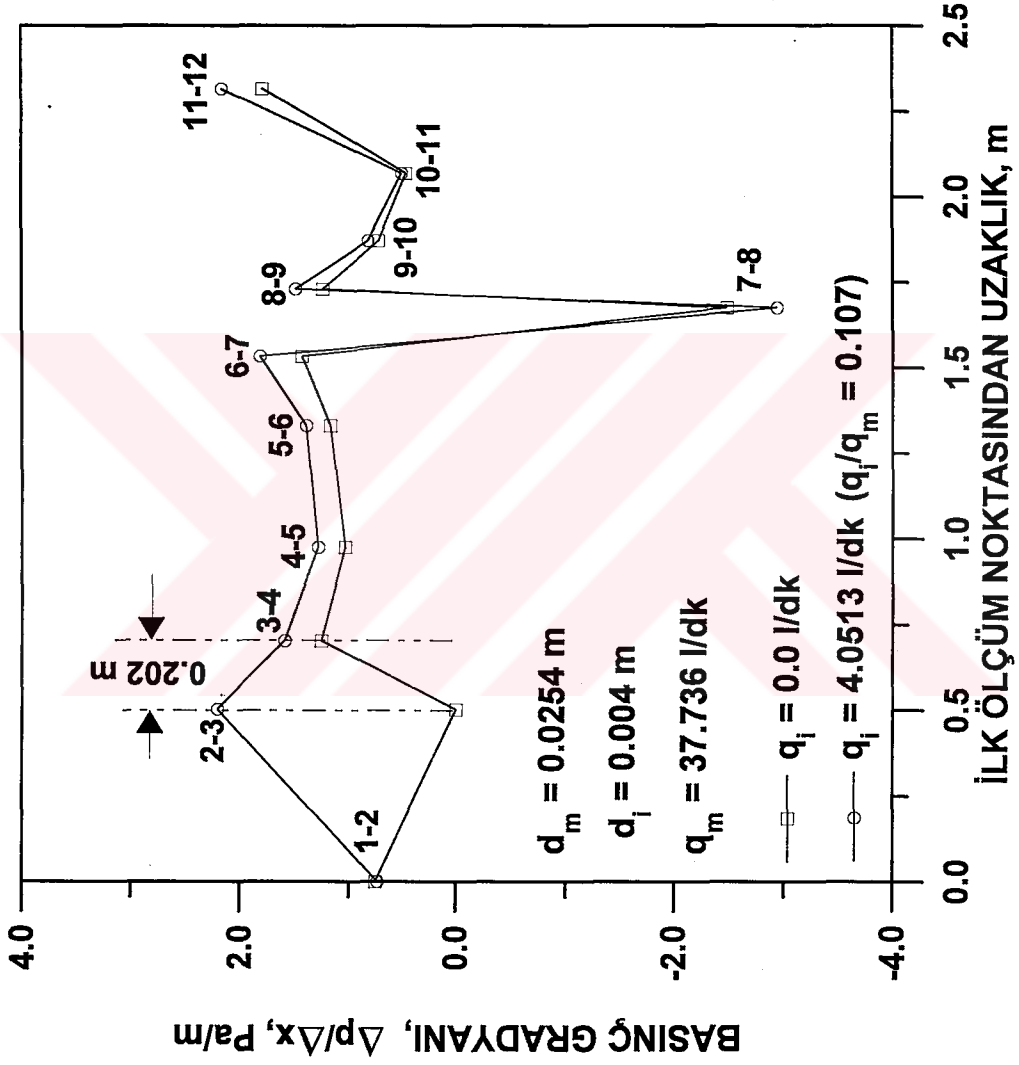


Şekil 5.5 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.217$)

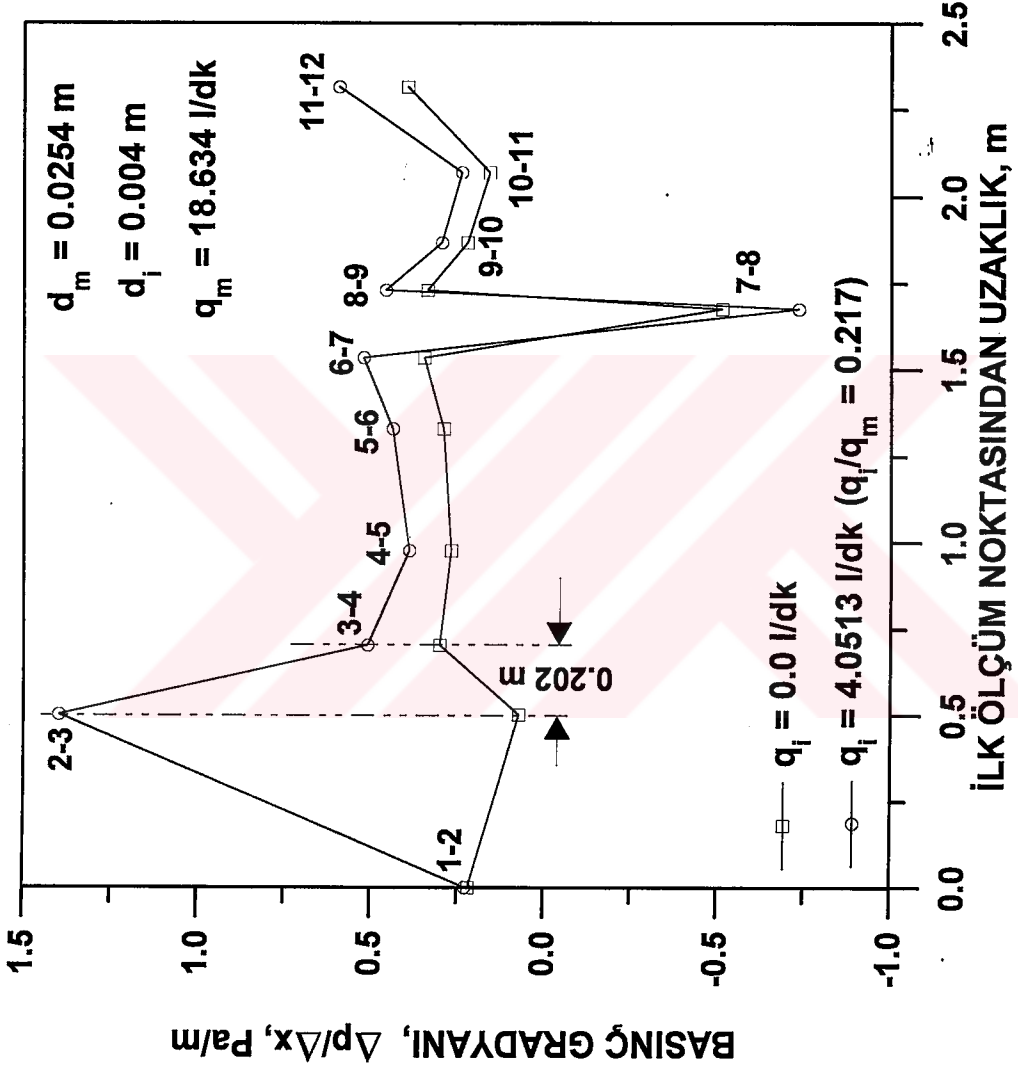
getirdiği etkiyi ayırt edebilmek için Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8'de Şekil 5.3, 5.4 ve 5.5'deki durumlar için basınç gradyanının profilleri gösterilmiştir. Bu şekillerdeki veri noktaları üzerindeki sayılar basınç gradyanının hesaplandığı aralığı belirtmektedir. (Basınç gradyanları akış yönünde ileriye doğru hesaplanmıştır. Örneğin 3. ve 4. basınç okuma noktaları arasında hesaplanan gradyan şekilde 3-4 olarak gösterilmiştir.) Eksenel yönde tam gelişmiş akışın varolması halinde basınç gradyanı uzaklıkla değişmeyeceğinden debideki artışlar basınç gradyanının değerini değiştirmekle birlikte basınç gradyanı profilinin eğimini etkilemez. Normal olarak boru özelliklerin eşdağılım gösterdiği durumda basınç gradyanı profilinin eğimi sıfırdır. Ancak Şekil 5.1'de de açıklandığı gibi bu çalışmada kullanılan borunun özellikleri enjeksiyon ve basınç ölçüm noktalarının etkileri nedeniyle eşdağılım göstermemektedir. Bu nedenle de basınç gradyanı profilinin eğimi sıfırdan farklı ve yere bağlıdır. Buna göre enjeksiyondan girişin akış davranışı üzerinde etkili olduğu bölgede basınç gradyanı profilinin eğiminin enjeksiyonsuz durumdaki profilin eğiminden farklılık göstermesi gerekir. Enjeksiyonlu ve enjeksiyonsuz akış durumları için basınç gradyanı profillerinin eğimlerinin aynı olduğu bölgelerde enjeksiyondan akışın etkisinin ortadan kalktığı ve tam gelişmiş akışın oluştuğu kabul edilebilir. Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8'de enjeksiyondan akışın basınç gradyanının profili üzerindeki yani akış davranışı üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. Bu etkinin ortadan kalkması için gerekli uzaklık q_i/q_m oranı arttıkça artmaktadır. Ancak pratik uygulamalar için enjeksiyondan girişin akış davranışında neden olduğu değişikliğin q_i/q_m oranının yaklaşık olarak 0.1'den küçük değerlerinde (Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8) 0.202 m'de yani yaklaşık olarak boru çapının 8 katı uzaklıkta kaybolduğu ve tekrar tam gelişmiş akışın oluştuğu kabul edilebilir. Bu sonuç Yuan'ın gözlemleriyle uyumludur. q_i/q_m 'nin 0.1'den büyük değerlerinde Şekil 5.8'de tam gelişmiş akışın oluşması için gerekli uzaklık artmakla birlikte gerek burada gerekse Ek-B'de verilen çok sayıda basınç ve basınç profili grafiğinin incelenmesinden uygulamada karşılaşılabilecek bütün q_i/q_m oranları için $8d_m$ uzaklığının kullanılmasının önemli bir hataya yol açmayacağı sonucu çıkarılabilir.



Şekil 5.6 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.02$)



Şekil 5.7 Basıncı gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.107$)



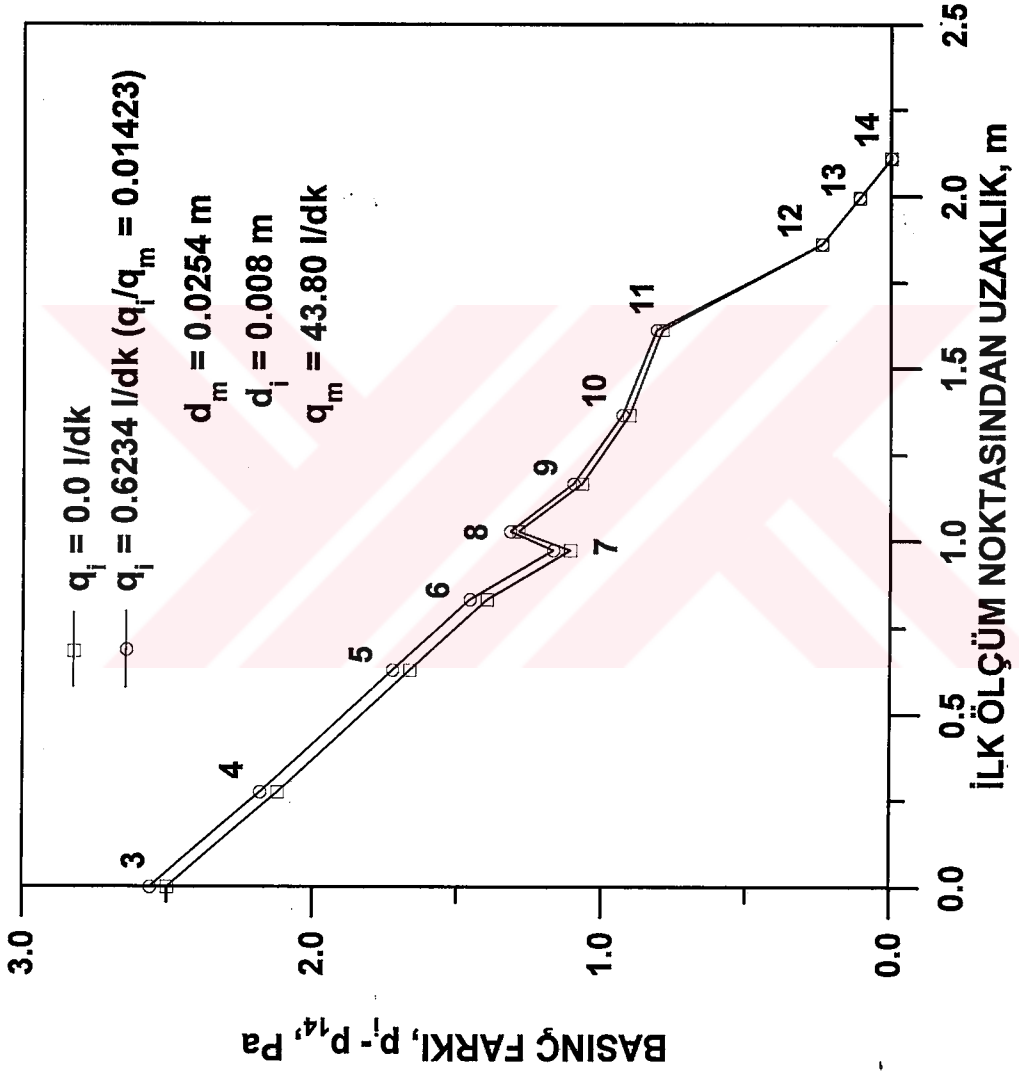
Şekil 5.8 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.217$)

Perforasyon çapının veya fiziksel tanıma daha uygun bir ifadeyle perforasyon çapının ana akış borusu çapına oranının (d_i/d_m) yukarıda varılan sonuçlar üzerinde etkisi olup olmadığını araştırmak üzere Şekil 5.9 ve 5.10’da perforasyon çapının 8 mm ve q_i/q_m oranının sırasıyla 0.01423 ve 0.09924 olması halinde elde edilen basınç profilleri gösterilmiştir. Şekil 5.11 ve 5.12’deki basınç profilleri için basınç gradyanı profilleri ise sırasıyla Şekil 5.11 ve 5.12’de verilmiştir. Bu şekillerde perforasyon 7 numaralı basınç okuma noktasının hemen ilerisinde (akış yönünde) yer almaktadır. Bu şekillerin incelenmesi daha önce 4 mm’lik perforasyon çapı için çıkarılan sonuçların geçerliliğini göstermektedir. Özellikle enjeksiyon noktasından sonra tam gelişmiş akışın oluşma uzaklığı olarak daha önce bulunan $8d_m$ ’nin perforasyon çapından bağımsız olduğu görülmektedir. Bu şekillerden yapılabilecek ilginç bir gözlem de 8 mm’lik perforasyonun yakın çevresinde ölçülen negatif basınç gradyanının enjeksiyon debisi arttıkça pozitif’e doğru değişmesidir. (Bu sonuçları desteklemek üzere 8 mm’lik perforasyon çapı için diğer basınç ve basınç gradyanı grafikleri Ek-B’de verilmiştir.)

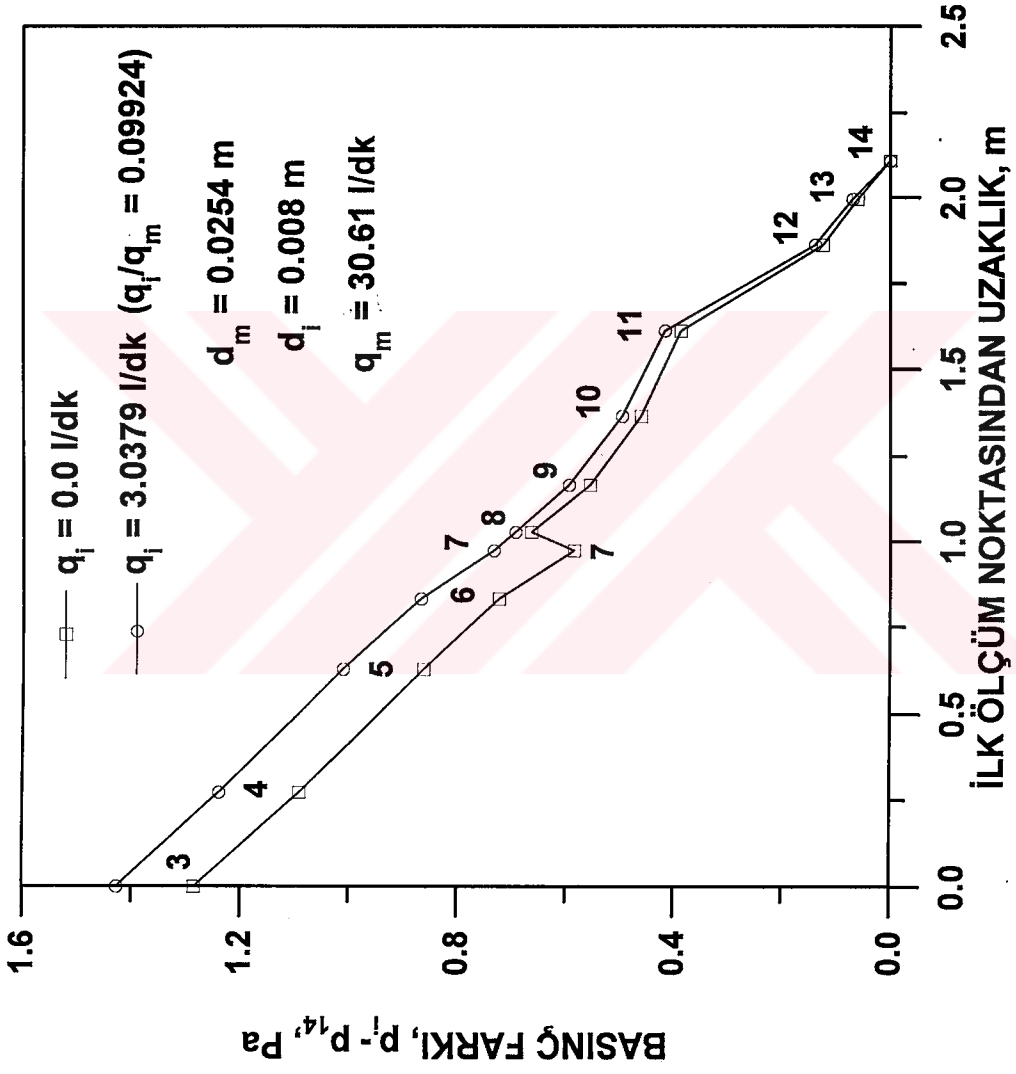
Bu bölümde elde edilen sonuçlar ışığında bundan sonraki bölümde enjeksiyondan itibaren yaklaşık $8d_m$ ’lik uzaklık içinde meydana gelen akış davranışı incelenmiş bunun dışındaki bölgelerde borularda akış için klasik teörinin geçerli olduğu kabul edilmiştir.

5.3 Görünür Sürtünme Faktörü

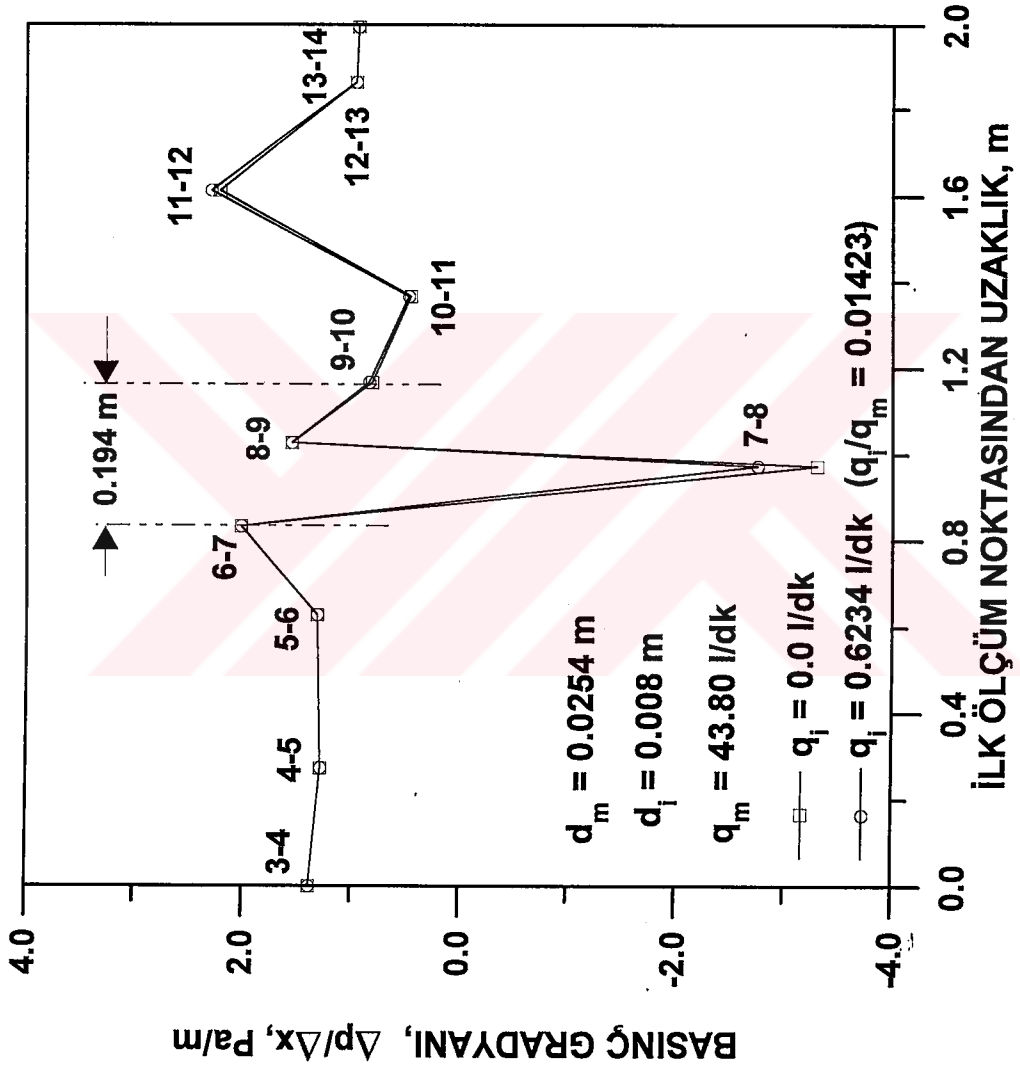
Bu bölüme kadar perforasyondan akışın borulardaki akış davranışı üzerindeki etkileri daha çok niteliksel olarak değerlendirilmiştir. Bu bölümde perforasyondan akışın niceliksel etkisi görünür sürtünme faktörü üzerindeki etkisi cinsinden incelenmiştir. Görünür sürtünme faktörleri ölçülen basınç ve debi değerleri Denklem (4.6) kullanılarak hesaplanmıştır. Daha önceki bölümlerde de yapıldığı gibi aşağıda öncelikle perforasyondan akışın olmadığı durumdaki görünür sürtünme faktörleri ele alınmıştır.



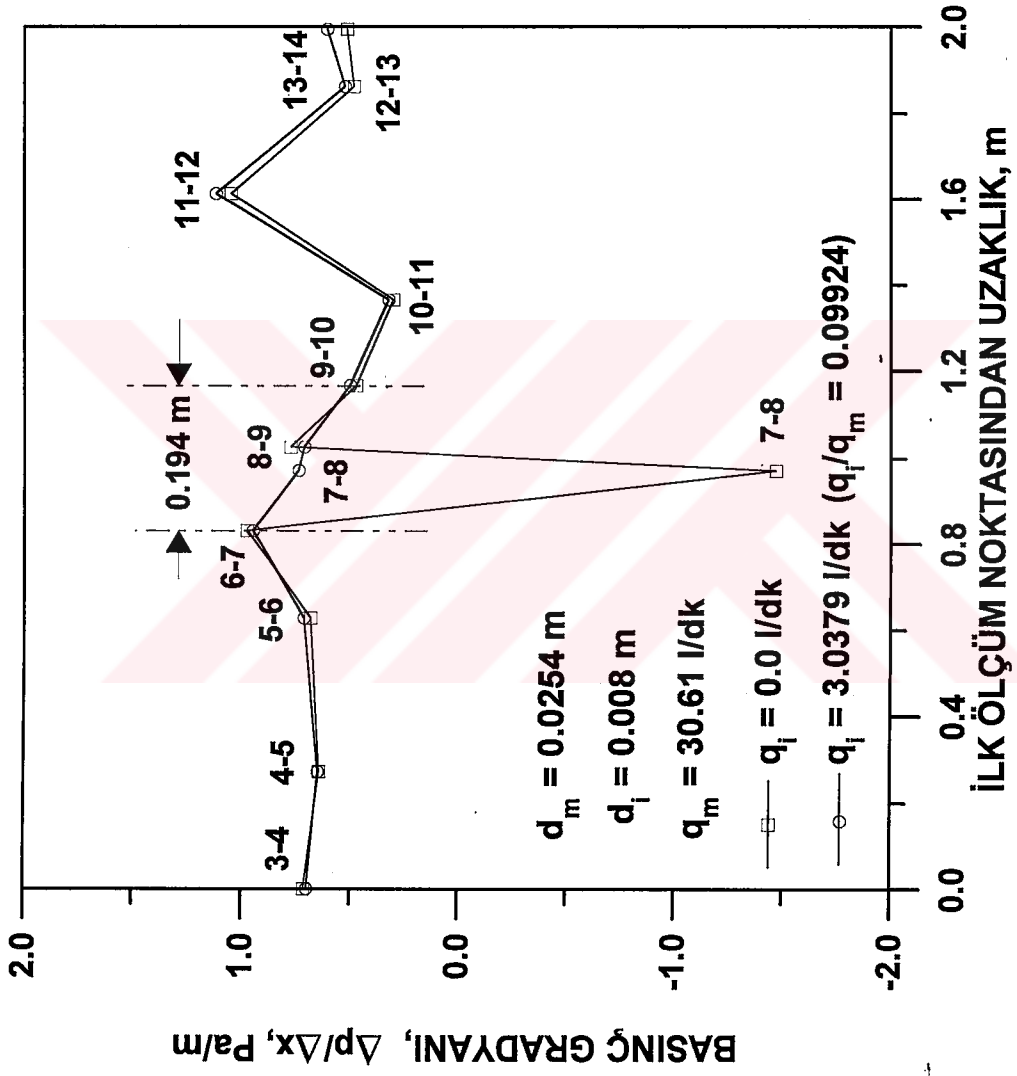
Şekil 5.9 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.01423$)



Şekil 5.10 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.09924$)



Şekil 5.11 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.01423$)



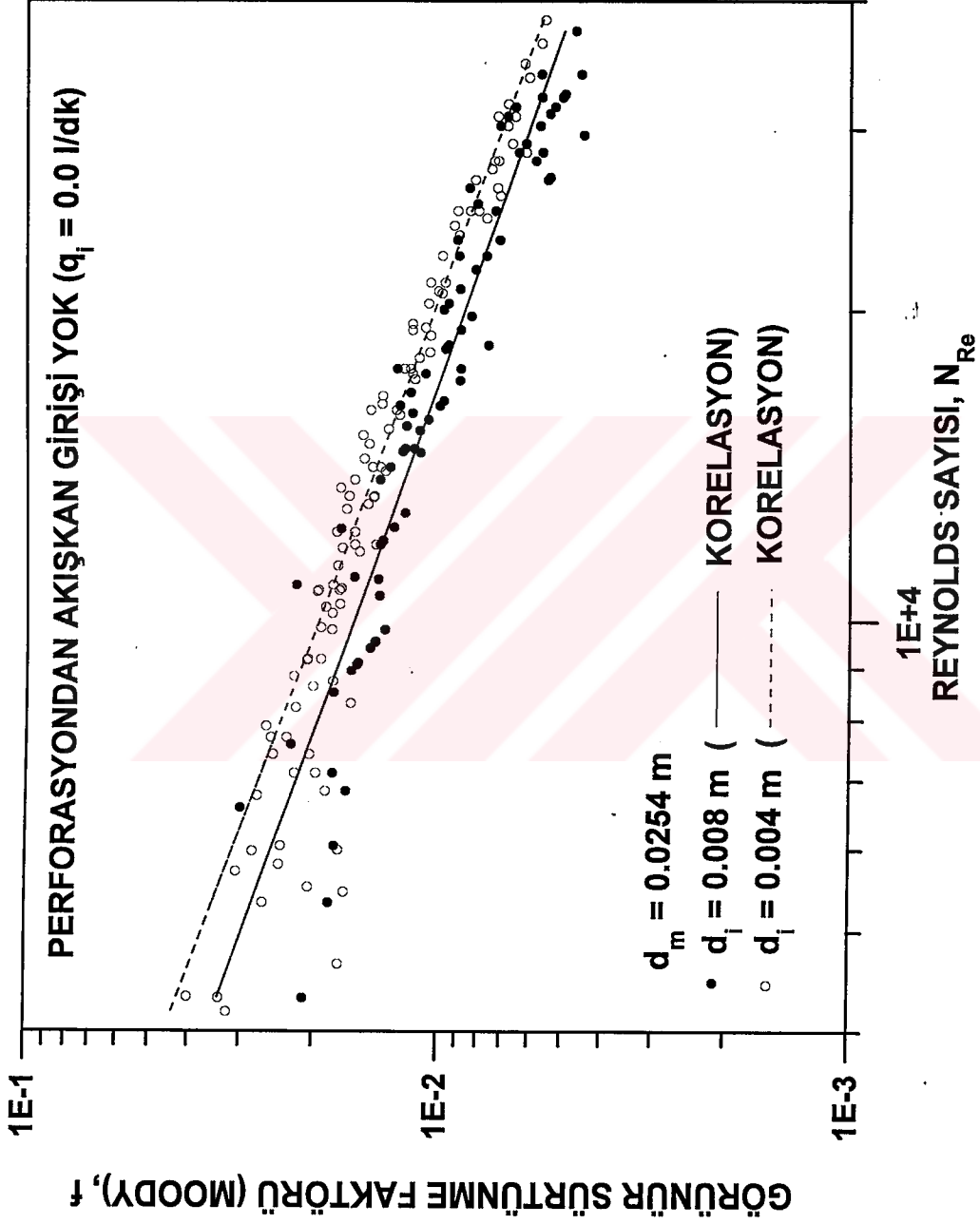
Şekil 5.12 Basiğ gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.09924$)

Şekil 5.13'de 4 ve 8 mm'lik perforasyon çapları için perforasyon enjeksiyonunun olmadığı durumda hesaplanmış olan görünür sürtünme faktörleri Reynolds sayısının fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Görünür sürtünme faktörlerinin yaklaşık olarak aynı aralıkta dağılım gösterdiğini kabul etmek mümkündür (perforasyondan akışın olmadığı durumda elde edilen veriler bu çalışmada alınan bütün veriler içinde en çok dağılım gösteren veriler olmuştur). Ancak gerek verilerde gözlenen dağılım eğilimi gerekse görünür sürtünme faktörünün perforasyon çapının fonksiyonu olması gerektiği yolundaki beklenti nedeni ile 4 ve 8 mm'lik perforasyon çapları için iki ayrı görünür sürtünme faktörü korelasyonu geliştirilmiştir. Bu korelasyonlar aşağıdaki denklemlerle ifade edilmiştir.

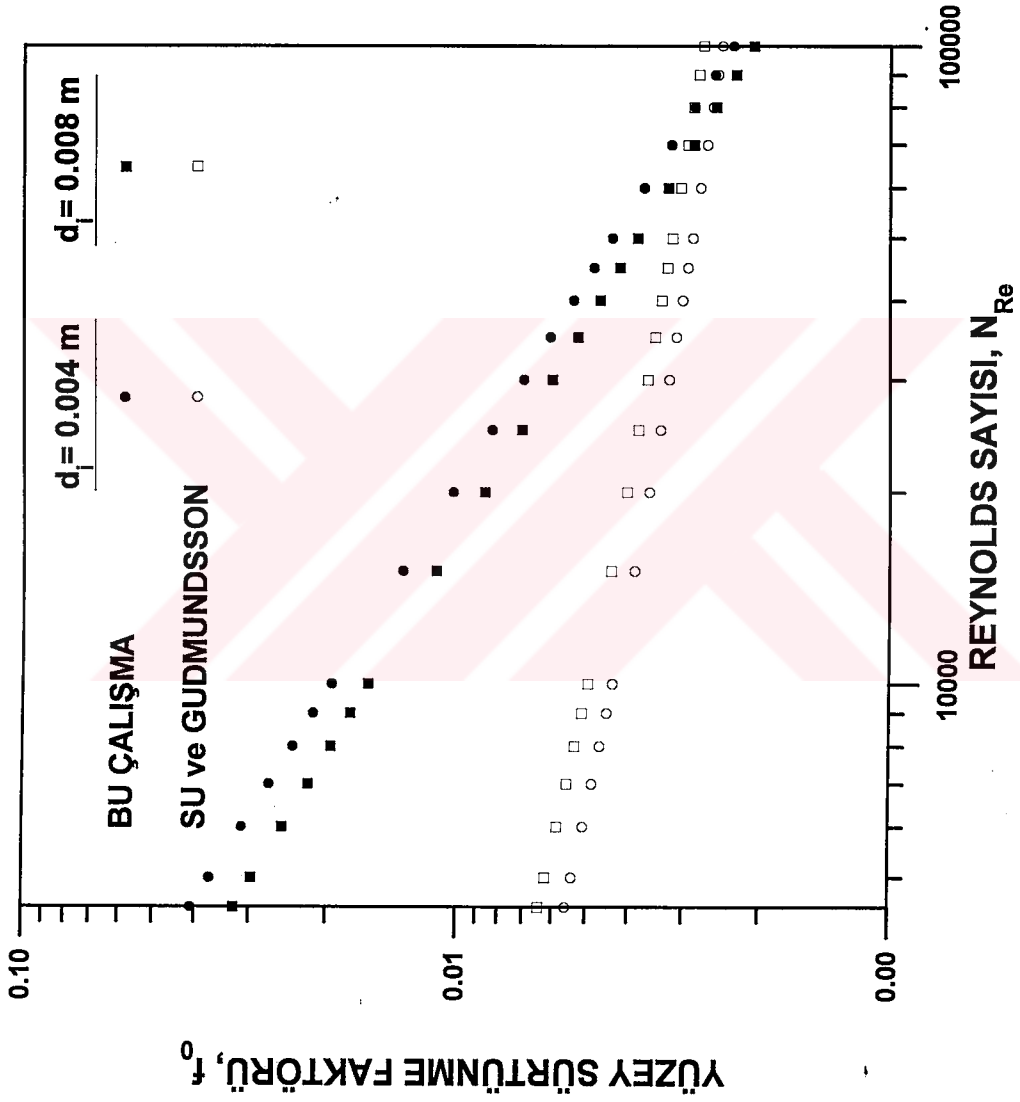
$$f_0 = 98.52 N_{Re}^{-0.926} ; \quad d_i = 4 \text{ mm} \quad (5.2)$$

$$f_0 = 57.22 N_{Re}^{-0.888} ; \quad d_i = 8 \text{ mm} \quad (5.3)$$

Perforasyondan akış olmadığı durum için elde edilen verilerin genel sonuçlar çıkarmaya yeterli olmadığını vurgulamak gerekir. Öncelikle yukarıda da değinildiği gibi elde edilen verilerin kalitesi konusunda şüpheler mevcuttur (deney donanımında kullanılan malzemelerin, pompaların ve ölçme araçlarının hassasiyeti en çok bu ölçümleri etkilemiştir). İkinci olarak mevcut verilerle perforasyon çapının veya daha genel olarak d_i/d_m oranının yüzey sürtünme faktörü üzerindeki etkisini incelemek için daha fazla değişik çapla deneyler yapılması gereklidir. Bu tür bir çalışma Su ve Gudmundsson tarafından yapılmıştır. Şekil 5.14'te gösterildiği gibi bu çalışmada elde edilen sonuçlar Su ve Gudmundsson'un sonuçlarından farklı gözükmemektedir. Ancak iki çalışmada kullanılan perforasyonların yapısı ve dağılımlarının farklı olduğu dikkate alınacak olursa bu beklenmesi gereken bir sonuçtur. Bu çalışmanın amacı esas olarak perforasyondan akışın neden olduğu ek sürtünme faktörünü modellemek olduğundan yüzey sürtünme faktörleri ile ilgili daha detaylı bir çalışma



Şekil 5.13 Görünür sürtünme faktörü - Reynolds sayısı, N_{Re} ilişkisi



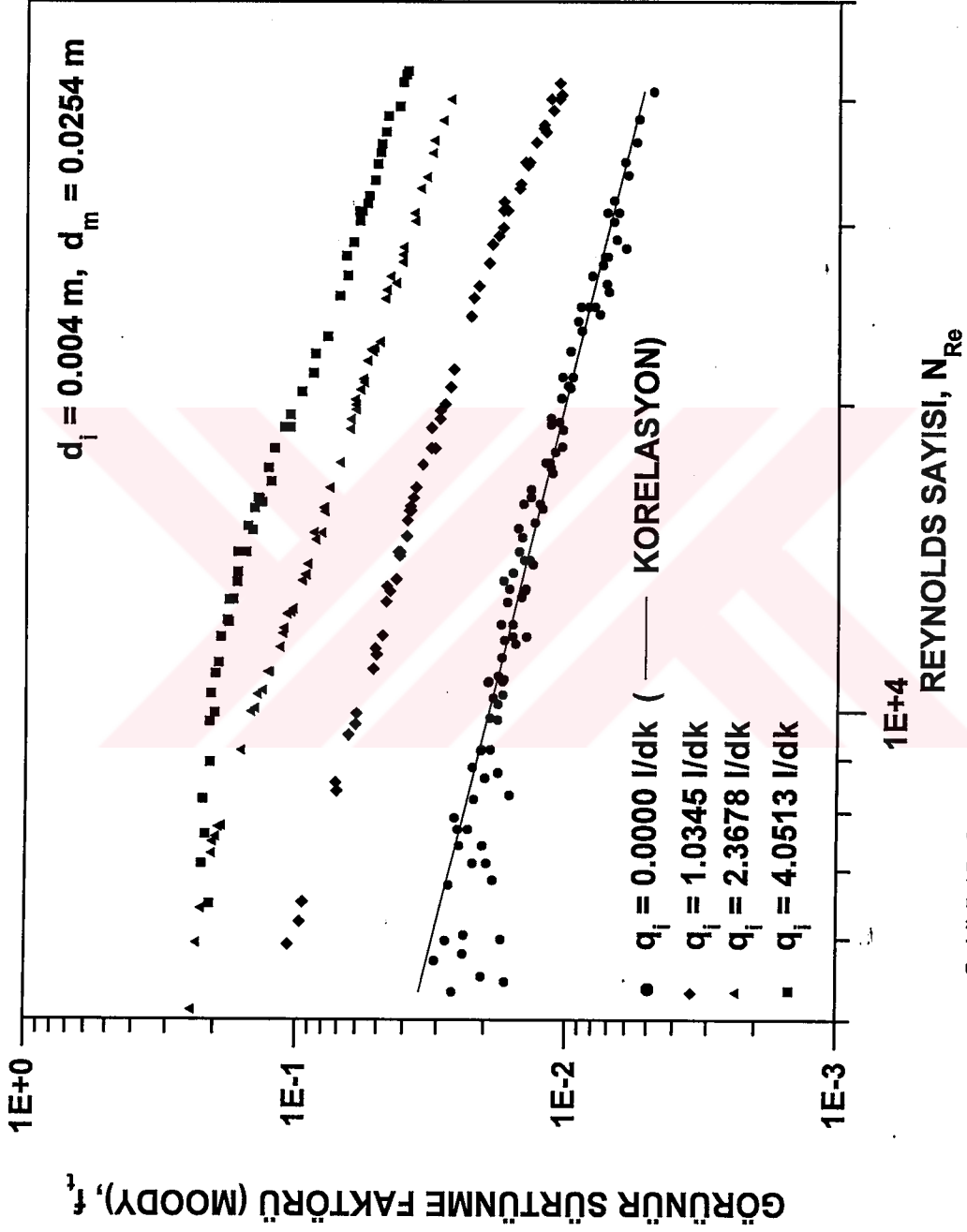
Şekil 5.14 Yüzey sürtünme faktörü korelasyonunun Su ve Gudmundsson korelasyonu ile karşılaştırılması [13]

yapılmamıştır. İleride de değinileceği gibi perforasyondan akış olmayan durumdaki yüzey sürtünme faktörleri genellikle perforasyondan akışın neden olduğu ek sürtünme faktörüne oranla küçüktür. Bu nedenle yapılacak hatalar yüzey sürtünme faktörünün büyüklüğünün mertebesini etkilemediği sürece toplam görünür sürtünme faktörü belirlemelerinde dikkate değer hatalara yol açmayacaktır.

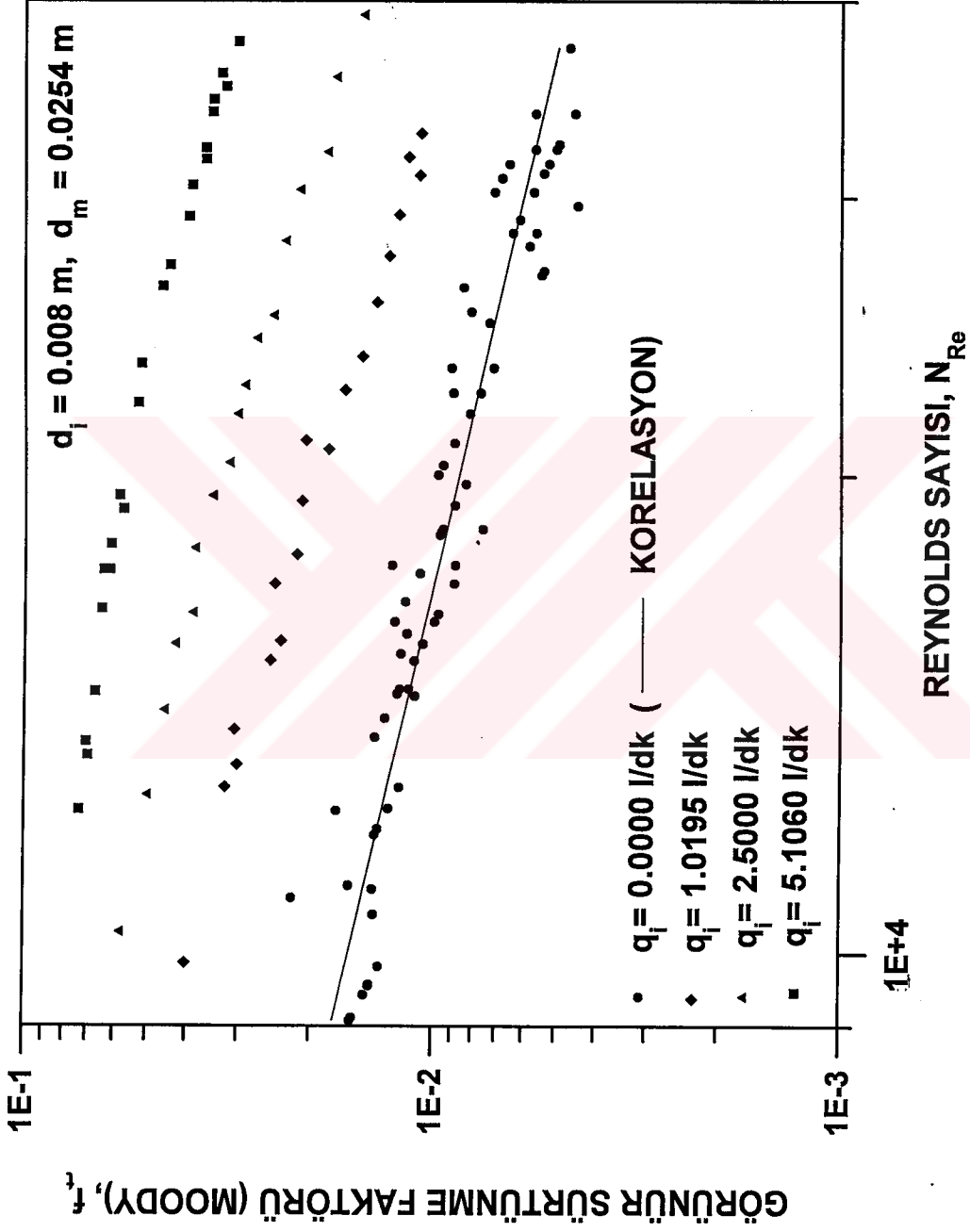
Şekil 5.15 ve 5.16'da sırasıyla 4 ve 8 mm'lik perforasyon çapları için 3'er değişik enjeksiyon debisinde hesaplanan görünür sürtünme faktörleri Reynolds sayısının fonksiyonu olarak gösterilmiştir (bu grafiklerde Reynols sayısı boruda akan toplam debiye göre hesaplanmıştır). Her iki çap için enjeksiyondan akışın olmadığı durumdaki sürtünme faktörleri de referans olması için şekillerde gösterilmiştir. Bekleneceği gibi bu şekillerde görünür sürtünme faktörü enjeksiyon debisi azaldıkça veya daha genel bir ifade ile enjeksiyon debisinin ana hat debisine oranı (q_i/q_m) küçüldükçe azalmaktadır. Özellikle Şekil 5.15'teki $q_i=2.3678$ l/dk ve 4.0513 l/dk durumlarına karşılık gelen veri noktalarının belirgin bir biçimde gösterdiği gibi q_i/q_m 'in büyük değerlerinde ise görünür sürtünme faktörünün değeri bir sabite yaklaşmaktadır. Bunun nedeni 4.Bölümün sonundaki tartışmada da vurgulandığı gibi q_i/q_m 'nin büyük değerlerinde görünür sürtünme faktörünün esas olarak perforasyondan giren akışkan tarafından belirlenmesidir. Şekil 5.15 ve 5.16'daki veriler ve çıkartılan sonuçlar bundan sonraki bölümde açıklanan görünür sürtünme faktörü korelasyonunun türetilmesinde kullanılmıştır.

5.4 Görünür Sürtünme Faktörü Korelasyonu

Bölüm 4'te açıklanan korelasyonlar ışığında görünür sürtünme faktörü, f_i 'nin yüzey sürtünme faktörü, f_w , ve perforasyondan girişin neden olduğu ek sürtünme faktörü, f_p 'nin toplamından oluştuğu kabul edilebilir (Denklem 4.14). Buradaki yüzey sürtünme faktörü perforasyondan akışkan girişinin olduğu durumdaki koşulları yansıtmalıdır. Yani Denklem (4.7)'deki yüzey kayma gerilmesi, τ_w , perforasyondan akış koşullarında değerlendirilmelidir. Perforasyondan akışın kayma gerilmesi, τ_w ,



Şekil 5.15 Görünür sürtünme faktörü - Reynolds sayısı, N_{Re} ilişkisi ($d_i = 0.004 \text{ m}$)



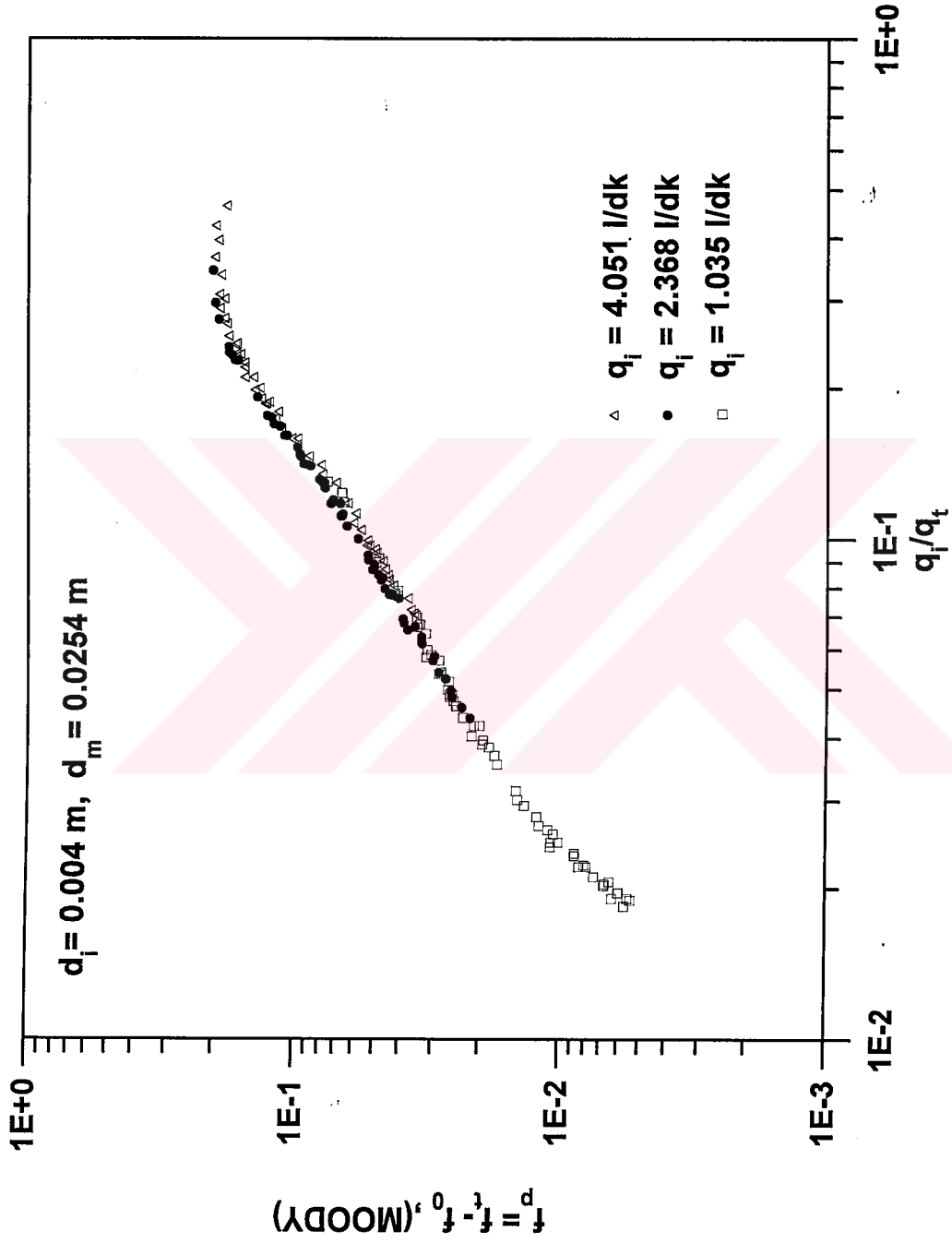
Şekil 5.16 Görünür sürtünme faktörü - Reynolds sayısı, N_{Re} ilişkisi ($d_i = 0.008 \text{ m}$)

üzerindeki etkisi toplam akış debisinin değişmesinden kaynaklandığına göre yüzey sürtünme faktörü için enjeksiyonsuz durumdaki sürtünme faktörü, f_0 'ın toplam akış debisine (q_i+q_m) karşılık gelen değeri kullanılabilir. Buna göre perforasyondan akışın neden olduğu, $f_p=f_t-f_0$ şeklinde gösterilebilir. Aşağıda f_0 için 5.3 numaralı alt bölümde verilen denklemler kullanılmıştır.

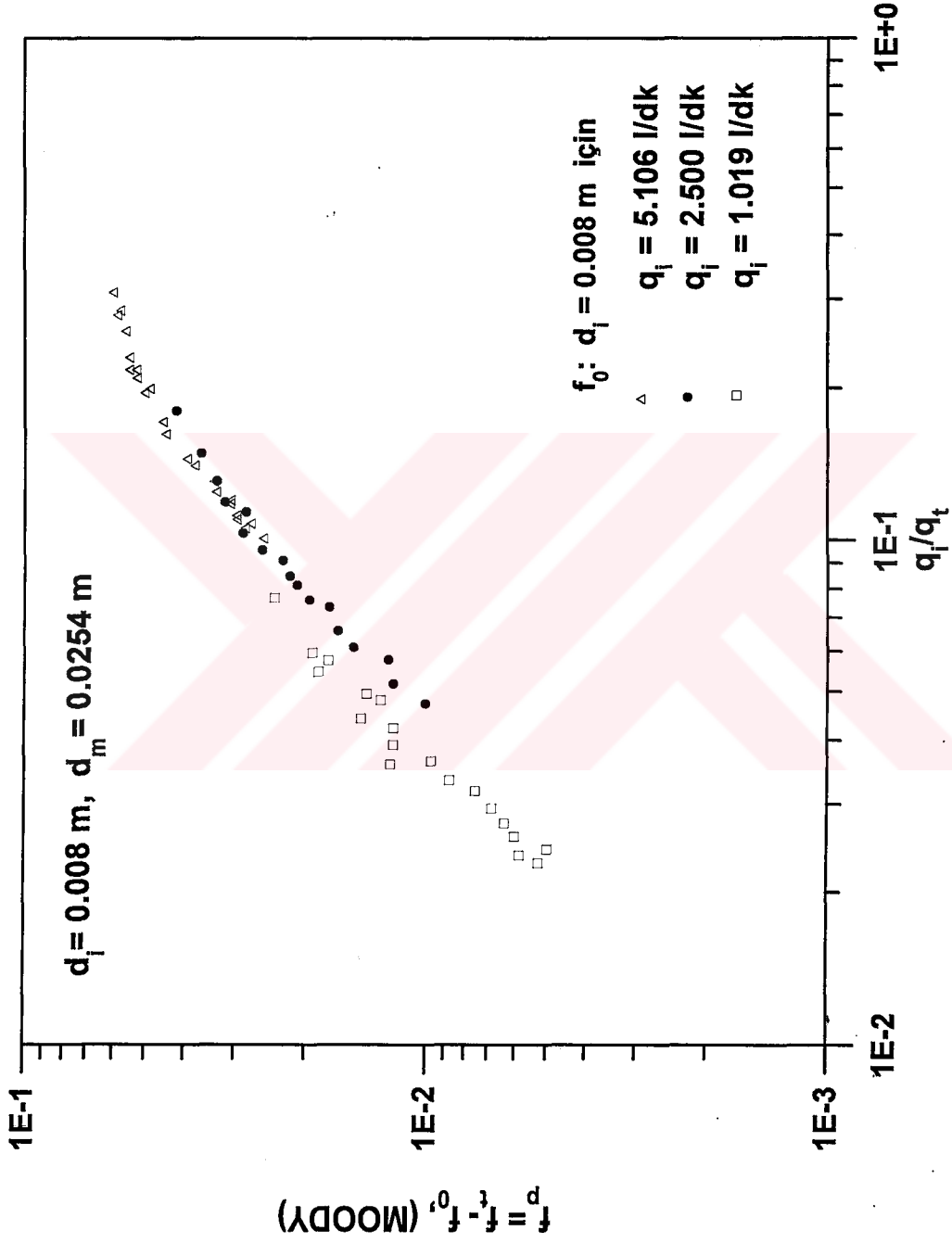
Denklem (4.3) veya (4.9)'dan görüleceği gibi f_p q_i/q_t 'nin fonksiyonudur. Şekil 5.17'de 4 mm çaplı perforasyondan üç değişik debide yapılan enjeksiyon durumları için f_p , q_i/q_t 'nin fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Burada f_p hesaplanırken deneyler sonucu bulunmuş olan f_t değerlerinden 4 mm'lik perforasyon çapı için Denklem (5.2) ile hesaplanan f_0 değerleri çıkarılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi sabit bir perforasyon ve boru çapı için f_p yalnızca q_i/q_t 'nin fonksiyonu olarak ifade edilebilir.

Şekil 5.18'de 8 mm'lik perforasyon çapı için f_p - q_i/q_t 'nin fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Burada da üç değişik enjeksiyon debisi için sonuçlar yer almaktadır. İçi boş veri noktaları f_0 için 8 mm'lik perforasyon çapı ile elde edilen korelasyon (Denklem 5.3) kullanılarak hesaplanmıştır. Şekilden görüldüğü gibi $q_i=1.019$ l/dk için f_p değerleri verilerin genel dağılımından bir miktar ötelenmiştir. f_0 için 4 mm'lik perforasyon çapı ile çıkartılan korelasyon kullanıldığında ise içi dolu veri noktaları ile gösterilen sonuç elde edilmiş ve Şekil 5.17'de olduğu gibi f_p değerlerinin sadece q_i/q_t 'nin fonksiyonu olarak ifade edilmesi sağlanmıştır. Burada f_0 için 4 mm'lik perforasyon çapı için geliştirilmiş olan korelasyonun kullanılmasının beklenene daha yakın sonuç vermesi şaşırtıcı olarak görülse bile 5.3 numaralı alt bölümün başlangıcında Şekil 5.13 ve 5.14 ile ilgili tartışma ışığında değerlendirildiğinde kabul edilebilir.

Şekil 5.19'da 4 ve 8 mm perforasyon çapları için elde edilen bütün f_p değerleri, kullanılarak $f_p/(d_m/\Delta x)$ q_i/q_t 'nin fonksiyonu olarak gösterilmiştir (Denklem (4.9) f_p 'nin $d_m/\Delta x$ ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir). Perforasyon çapının 4 ve 8 mm olması durumunda elde edilen verileri çakıştırmak üzere Şekil (5.20)'de $(d_i/d_m)^2$ [$f_p/(d_m/\Delta x)$] $(q_i/q_t)^2$ fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Bu şekilde 4 ve 8 mm'lik



Şekil 5.17 Perforasyon sürtünme faktörü f_p 'nin debi oranı q_i/q_t ile oranı ($d_i = 0.004 \text{ m}$)



Şekil 5.18 Perforasyon sürtünme faktörü f_p 'nin debi oranı q_i/q_t ile oranı ($d_i = 0.008 \text{ m}$)

perforasyon çaplarına karşılık gelen verilerin sabit olduğu değerler eşitlenmiş ve iki veri gurubu arasında yatay bir ötelenme kalmıştır. Bu nedenle yatay eksen d_i/d_m ile çarpılarak $\{(d_i/d_m)^2 [f_p/(d_m/\Delta x)]\} (d_i/d_m)(q_i/q_t)^2$ nin fonksiyonu olarak Şekil 5.21’de gösterilmiştir. Şekil 5.21’de elde edilen sonuç $\{(d_i/d_m)^2 [f_p/(d_m/\Delta x)]\}$ ’nin bütün d_i/d_m ve q_i/q_t oranları için yalnızca $(d_i/d_m)(q_i/q_t)^2$ fonksiyonu olarak ifade edilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu durum perforasyondan akışın etkisinin d_i/d_m ve q_i/q_t oranları cinsinden korele edilebileceği yolundaki beklentilerle uyumluluk göstermektedir.

Şekil 5.21’deki grafik Şekil 5.22’de yatay eksen bire bölünerek yeniden çizilmiş ve kesiksiz çizgi ile gösterilen eğri çakıştırılmıştır. Bu eğrinin denkleminde aşağıdaki korelasyon elde edilmiştir.

$$0.0932505 \sqrt{\frac{d_m}{d_i}} < \frac{q_i}{q_t} \leq 0.1838207 \sqrt{\frac{d_m}{d_i}} \text{ için}$$

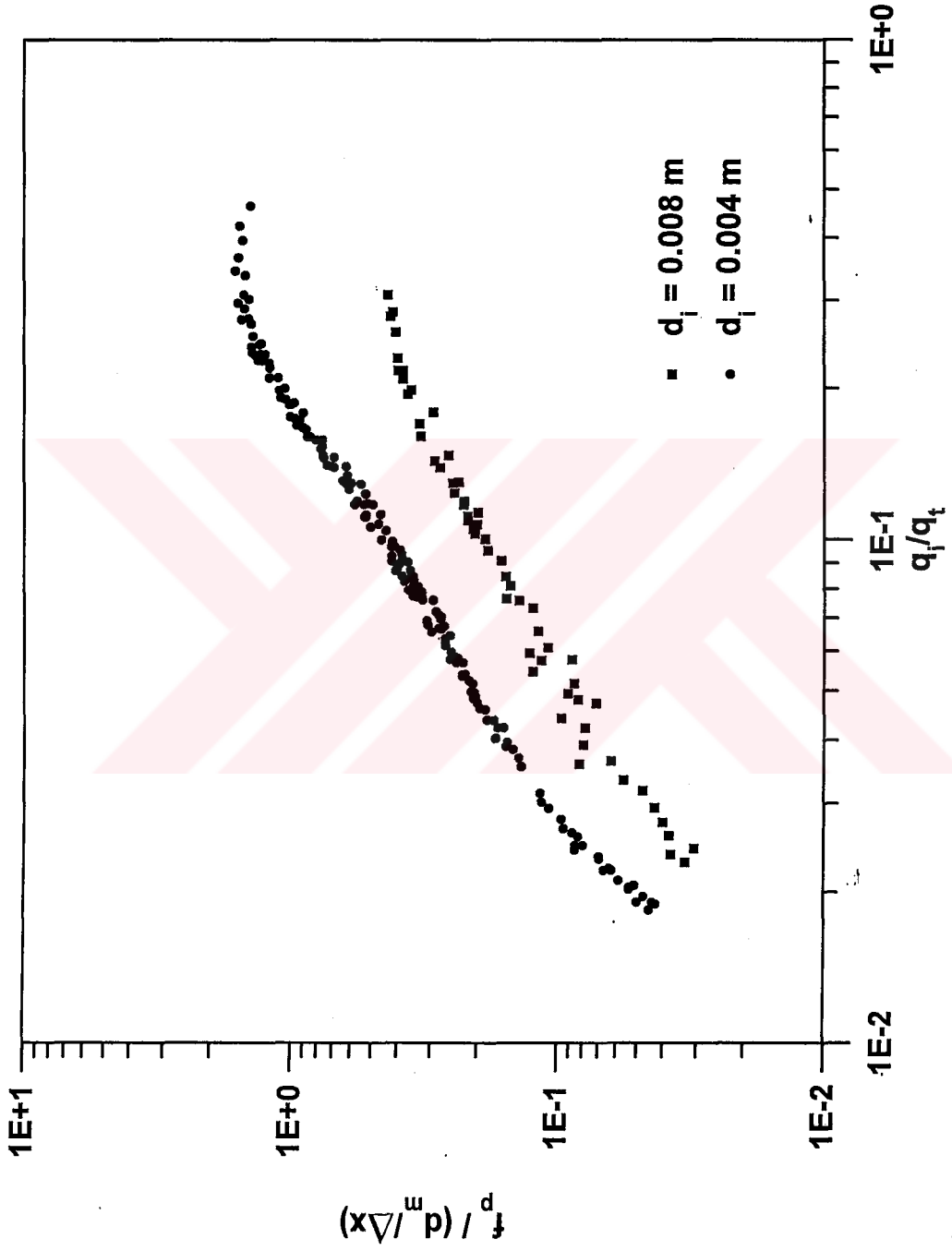
$$f_p = \left(\frac{d_m}{d_i} \right)^2 \frac{d_m}{\Delta x} \left[0.0454444 - 1.14567 \times 10^{-4} \left(\frac{d_m}{d_i} \right) \left(\frac{q_i}{q_t} \right)^{-2} \right] \quad (5.4)$$

$$0.0129099 \sqrt{\frac{d_m}{d_i}} \leq \frac{q_i}{q_t} \leq 0.0932505 \sqrt{\frac{d_m}{d_i}} \text{ için}$$

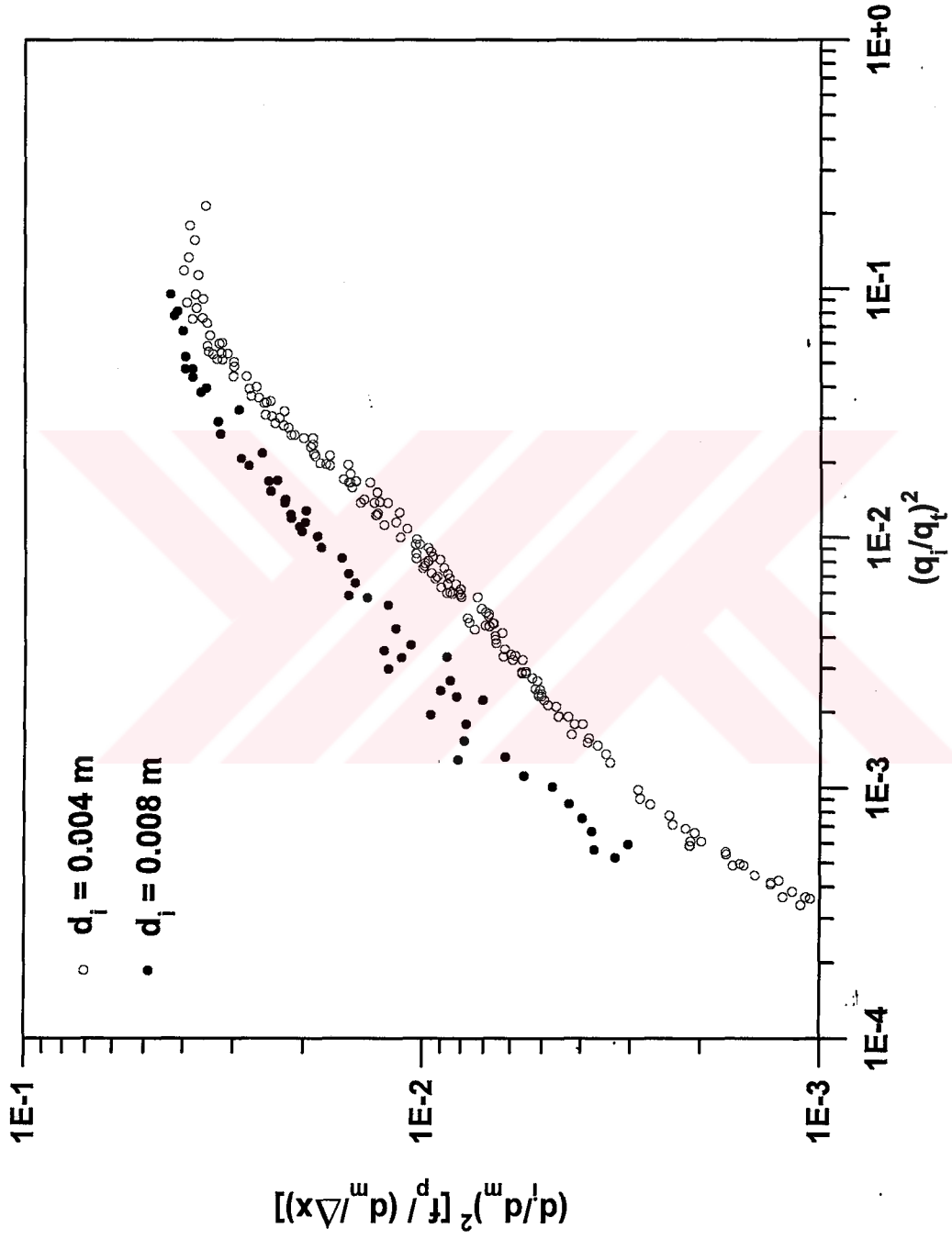
$$f_p = \left(\frac{d_m}{d_i} \right)^2 \frac{d_m}{\Delta x} \left[0.537285 \left(\frac{d_m}{d_i} \right)^{-0.592321} \left(\frac{q_i}{q_t} \right)^{1.184642} \right] \quad (5.5)$$

$$0.0073195 \sqrt{\frac{d_m}{d_i}} \leq \frac{q_i}{q_t} < 0.0129099 \sqrt{\frac{d_m}{d_i}} \text{ için}$$

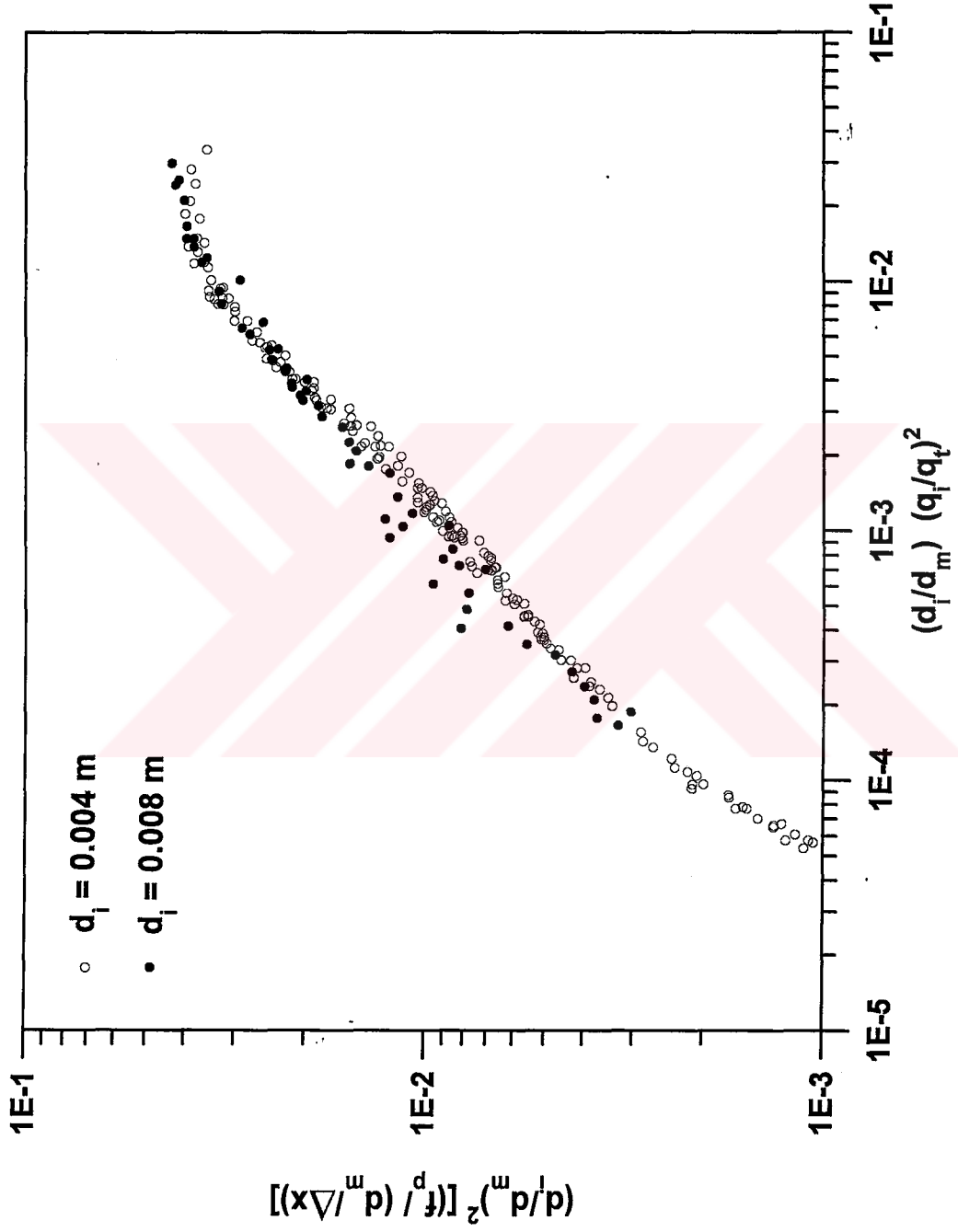
$$f_p = \left(\frac{d_m}{d_i} \right)^2 \frac{d_m}{\Delta x} \left[0.0198886 - 0.001927 \ln \left[\left(\frac{d_m}{d_i} \right) \left(\frac{q_i}{q_t} \right)^{-2} \right] \right] \quad (5.6)$$



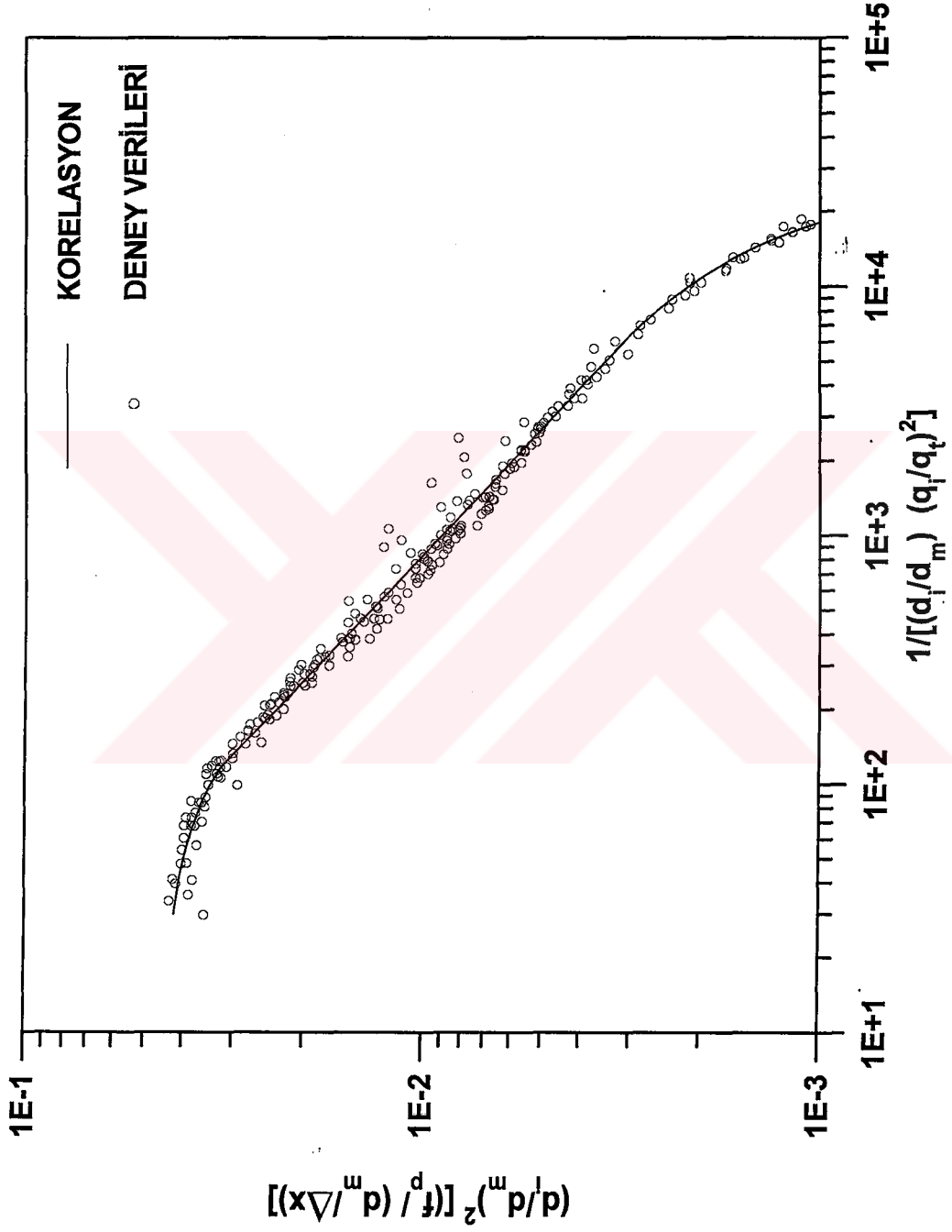
Şekil 5.19 Perforasyon çapının perforasyon sürtünme faktörü üzerindeki etkisi



Şekil 5.20 Perforasyon sürtünme faktörü korelasyonu



Şekil 5.21 Perforasyon sürtünme faktörü korelasyonu



Şekil 5.22 Perforasyon sürtünme faktörü korelasyonu

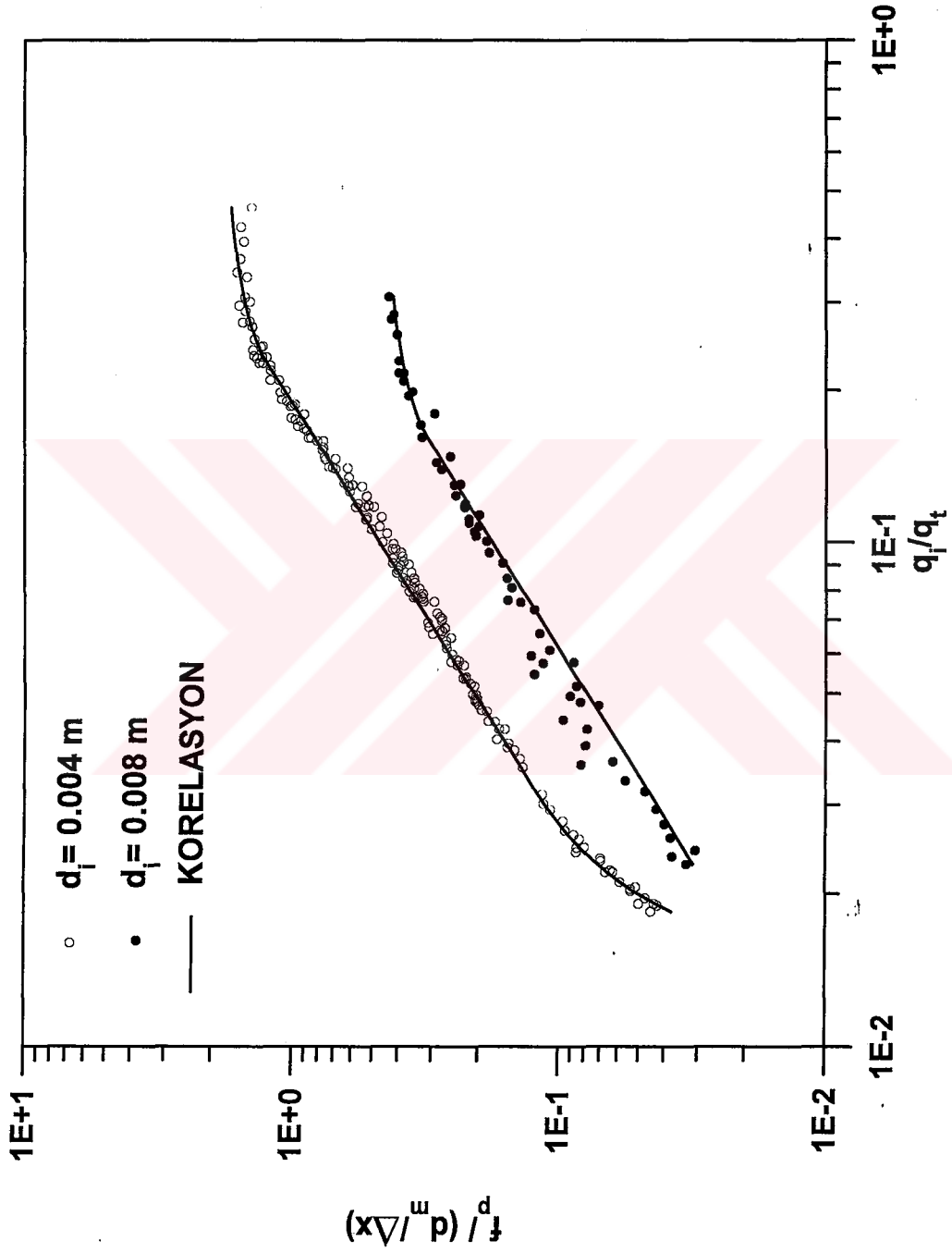
Şekil 5.23 yukarıda elde edilen f_p korelasyonunun 4 ve 8 mm'lik perforasyon çapları için deney verileri ile karşılaştırılmasını göstermektedir. Korelasyonun deney verileri ile uyumunun oldukça tatmin edici olduğu görülmektedir. Şekil 5.24 ve 5.25'te ise f_p ve f_0 için Denklem (5.4)-(5.6) ve (5.2)'deki korelasyonlar kullanılarak hesaplanan görünür sürtünme faktörleri deney verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu şekillerden yukarıda çıkartılan korelasyonların genel olarak tatmin edici olduğu görülmekle birlikte Şekil 5.25 hatanın 8 mm'lik perforasyon çapı için daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu sonuç daha önce de tartışıldığı gibi 8 mm'lik perforasyon çapı için elde edilen deneysel verilerin hassasiyetinin 4 mm'lik çap için elde edilenlerin hassasiyetinden daha az olmasına bağlanabilir.

Şekil 5.26'da bu çalışmada çıkartılan f_p korelasyonu 4 mm'lik perforasyon çapı ve 25.4 mm'lik boru çapı için literatürde verilen f_p korelasyonları (8,14) ile karşılaştırılmıştır. Genel olarak $0.035 < q_i/q_m < 0.35$ aralığında karşılaştırılan üç korelasyon da uyumlu sonuçlar göstermektedir. Bu çalışmada geliştirilen korelasyonla Asheim ve diğerleri tarafından çıkarılan korelasyon yaklaşık olarak aynı değerleri vermektedir. $q_i/q_m > 0.35$ değerlerinde üç korelasyonun verdiği sonuçlar da birbirinden uzaklaşmaya başlamaktadır. Bu çalışmada geliştirilen korelasyon q_i/q_m 'nin büyük değerlerinde sabit bir değere yaklaşmaktadır. Bu davranışın nedenleri Bölüm 4'ün sonunda tartışılmıştır. Benzer şekilde $q_i/q_m < 0.035$ değerlerinde ise yeni korelasyon diğer iki korelasyona göre f_p 'nin daha hızlı bir şekilde sıfıra doğru yaklaştığını belirlemektedir. Burada toplam görünür sürtünme faktörleri (f_t) cinsinden bir karşılaştırma gidilmemesinin nedeni her üç çalışmada da yüzey sürtünme faktörü için kullanılan korelasyonların birbirinden çok farklı sonuçlar vermesidir. Ancak daha önce de belirtildiği gibi pratikte karşılamak q_i değerleri için toplam sürtünme faktörünün belirleyici bileşeni f_p 'dir. Bu nedenle yüzey sürtünme faktörlerindeki farklılıklar toplam görünür sürtünme faktörüne önemli oranda yansımadağı söylenebilir.

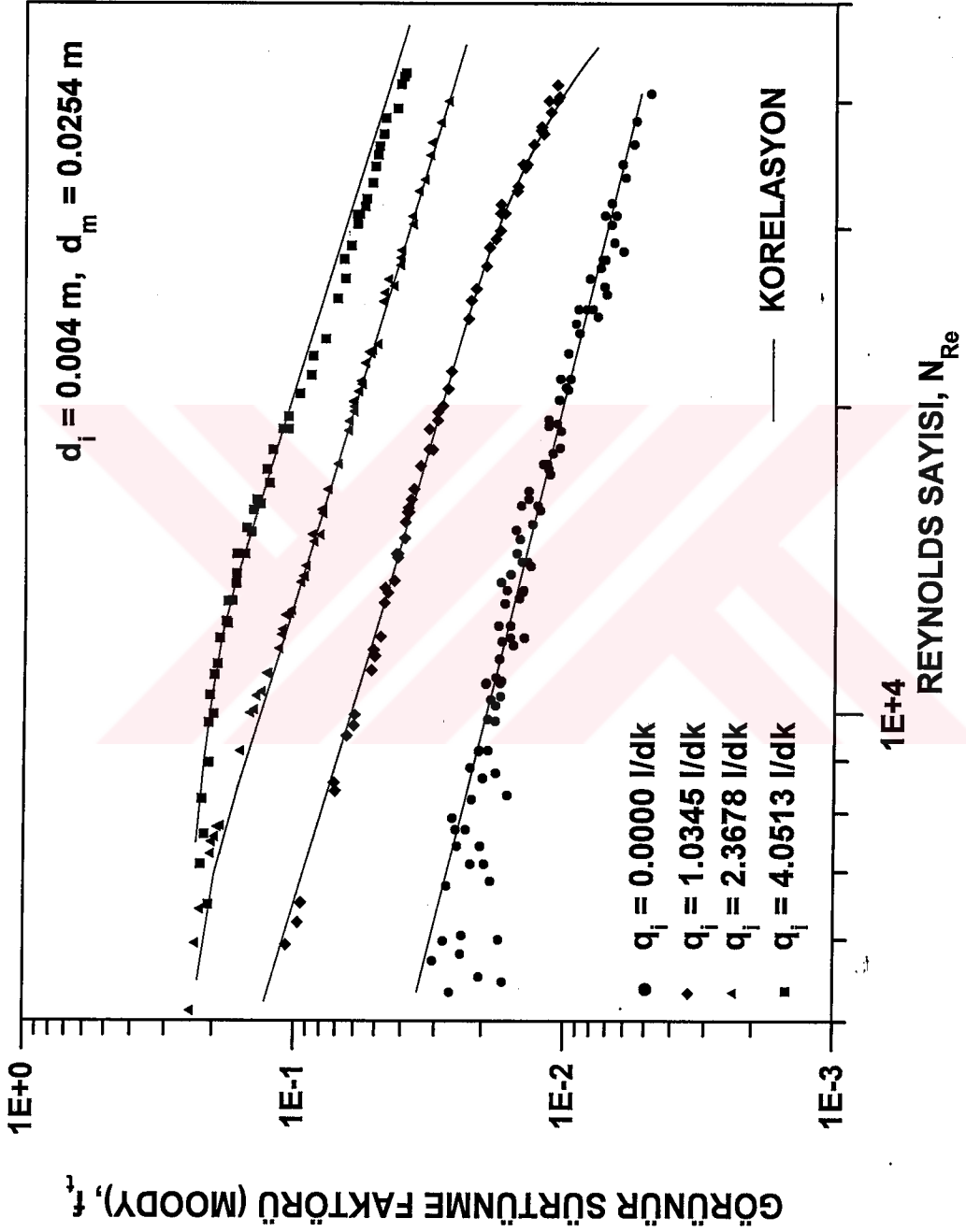
Şekil 5.27'de ise bu çalışmada elde edilen görünür sürtünme faktörü korelasyonu Yuan'ın deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır. Genel olarak q_i/q_m 'nin 1/30'dan

büyük değerlerinde elde edilen sonuçlar uyumludur. q_i/q_m 'nin $1/30$ 'dan küçük değerlerinde ise bu çalışmada geliştirilen korelasyonun belirlediği f_t değerleri Yuan verilerinden önemli oranda düşüktür. Bunun nedeni Şekil 5.26'da da görüldüğü gibi q_i/q_m 'nin $1/30$ 'dan küçük değerlerinde bu çalışmada çıkartılan korelasyonun belirlediği f_p değerlerinin hızla sıfıra doğru gitmesidir. Bu aşamada Yuan'ın deney verileri ile bu çalışmada elde edilen deney verilerinin de q_i/q_m 'nin $1/30$ 'dan küçük değerlerinde uyumlu olmadığı kaydedilmelidir. Bu uyumsuzluğun nedenleri daha detaylı çalışmayı gerektirmektedir.

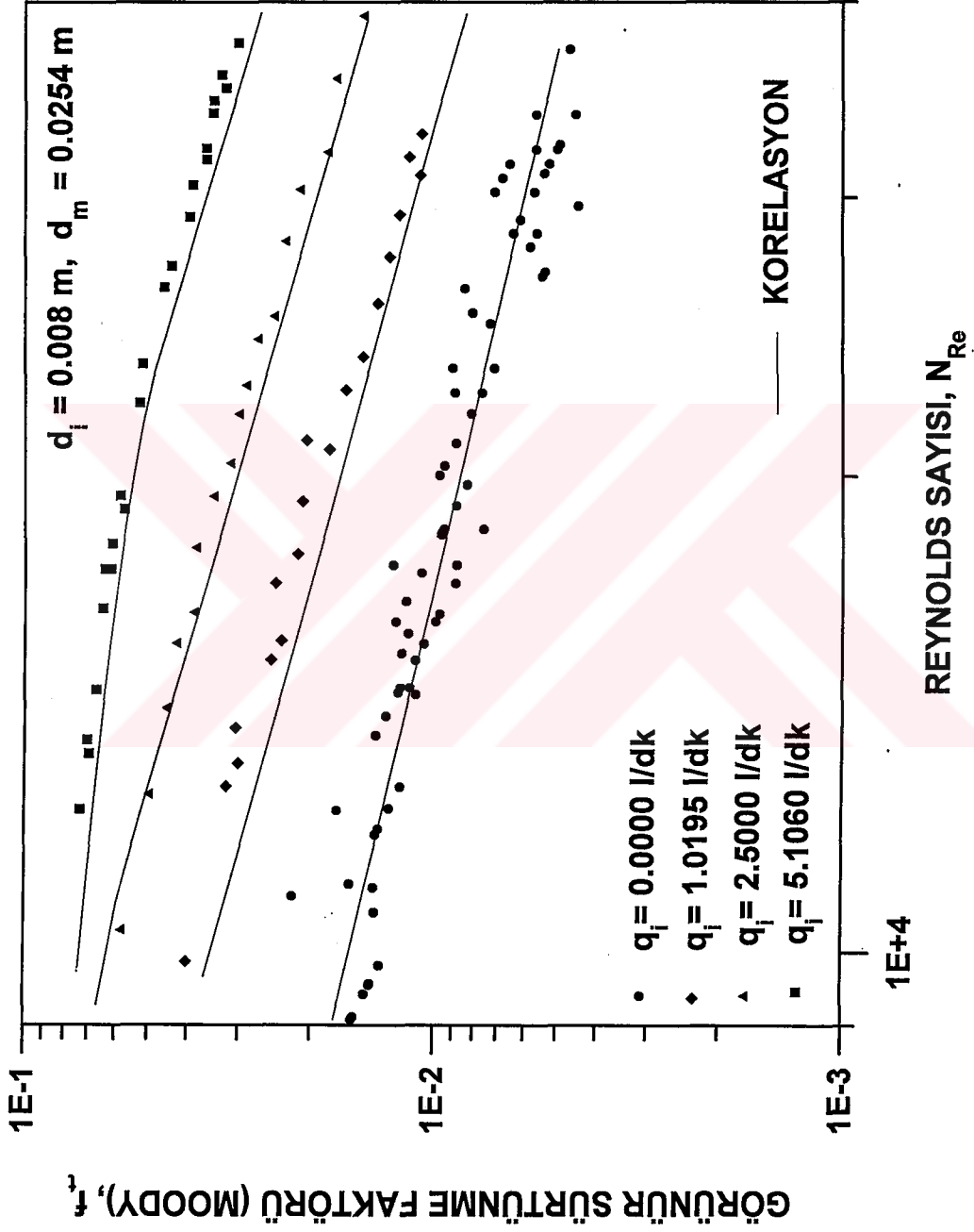
Yapılan bu çalışmadan elde edilen korelasyondan da göstermektedir ki boru için sürtünme faktörü korelasyonlarının yatay kuyuya uygulanamayacağı ve perforasyondan akışın etkilerini de içeren bir sürtünme faktörü korelasyonunun gerekliliği aşikardır.



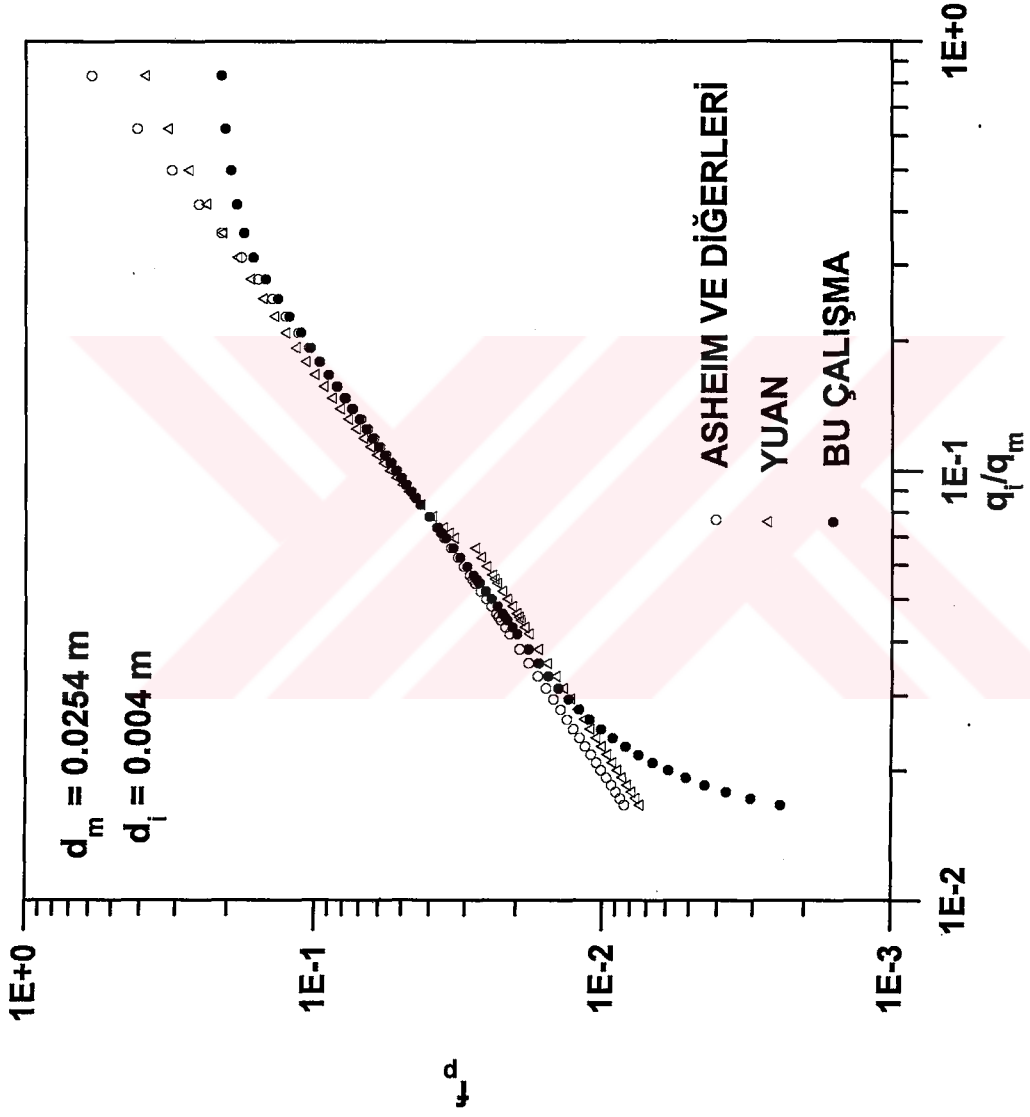
Şekil 5.23 Korelasyonun deney verileri ile karşılaştırılması



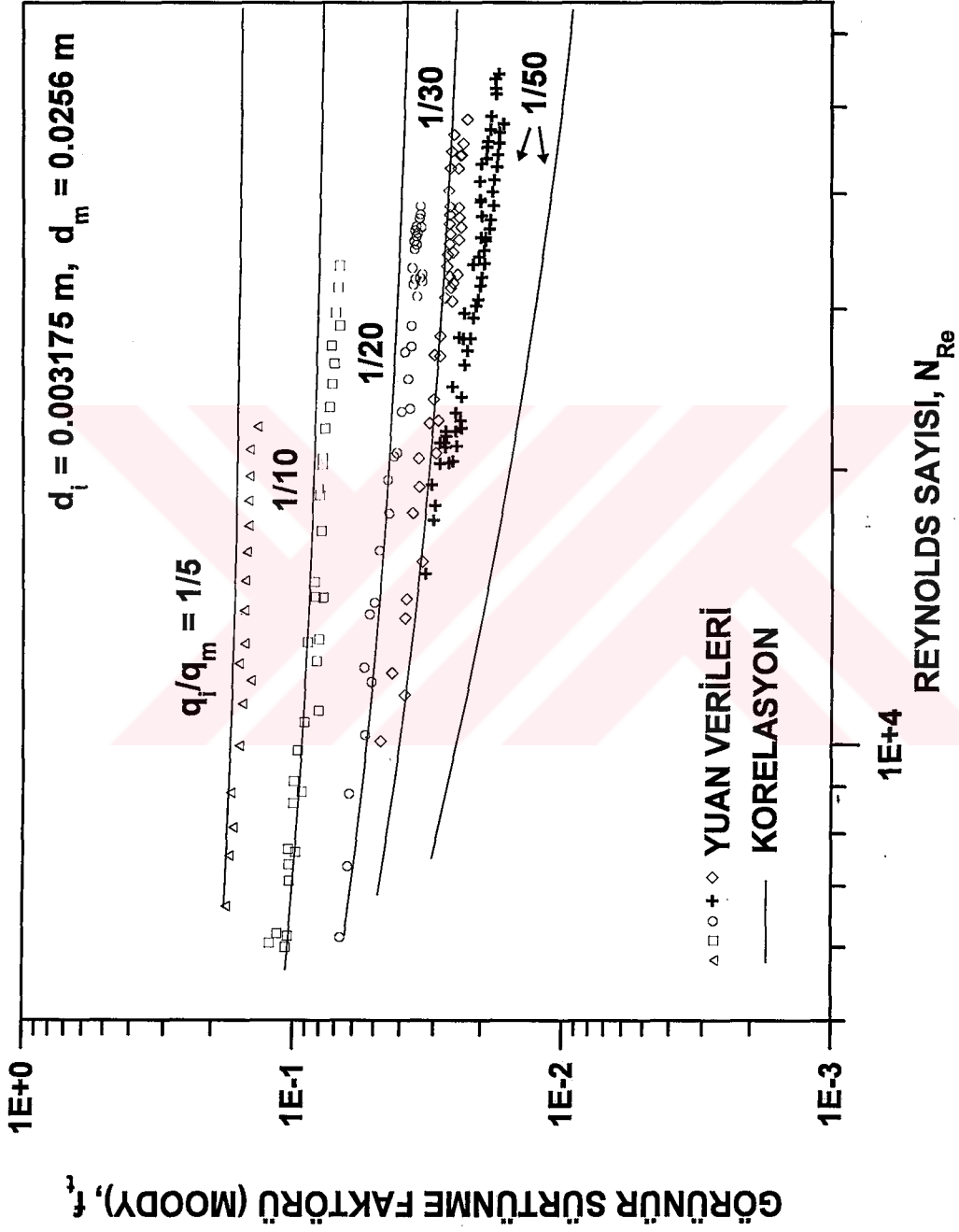
Şekil 5.24 Korelasyonun deney verileri ile karşılaştırılması



Şekil 5.25 Korelasyonun deney verileri ile karşılaştırılması



Şekil 5.26 Perforasyon sürtünme faktörü korelasyonunun diğer korelasyonlar ile karşılaştırılması



Şekil 5.27 Yuan verileri ile bu çalışmanın korelasyonunun karşılaştırılması [14]

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada perforasyondan kuyu içine akışın yatay kuyularda akış davranışına etkilerini belirlemek için deneysel ve analitik modeller sunulmuştur. Yatay kuyuyu modelleyen plastik borunun test aralığında 4 mm ve 8 mm çaplı iki perforasyon açılmış ve perforasyondan akışın olduğu ve olmadığı durumlar için 474 adet deney gerçekleştirilmiştir. Kullanılan boru hattının pürüzlülüğü deney verileri ile belirlenmiş ve Blasius'un korelasyonu ile karşılaştırılarak uyumluluğu görülmüştür.

Gerçekleştirilen deneyler ve yapılan analitik çalışma sonucunda, yatay kuyu akışının normal boru akış davranışını göstermediği, özellikle perforasyonlu kısımda akış davranışının farklılaştığı ve bu farklılığın q_i/q_m oranının 0.12'den küçük değerlerinde tam gelişmiş akışın $8d_m$ 'lik bir uzaklıkta olduğu görülmüştür (q_i/q_m 'nin 0.12'den büyük değerleri için bu uzaklığın kullanımının önemli bir hataya neden olmayacağı söylenebilir).

Yatay kuyularda sürtünme faktörünü belirlemek için analitik olarak çalışılmış ve görünür sürtünme faktörü yüzey sürtünme faktörü ve perforasyondan kaynaklanan sürtünme faktörünün toplamı olarak düşünülmüştür. Deney verileri değerlendirilerek yatay kuyularda perforasyondan kaynaklanan etkileri içeren yeni bir sürtünme faktörü korelasyonu geliştirilmiştir. Korelasyon geliştirilirken öncelikle perforasyondan akış ile kuyu akış davranışındaki basınç ölçümleri ile belirlenen değişimlerden hareket edilmiştir.

Çalışmada, perforasyon sürtünme faktörünün perforasyon/boru geometrisinin ve perforasyon/boru akış debilerinin fonksiyonu olduğu da belirlenmiştir.

Türetilen korelasyonun $0.035 \leq q_i/q_m \leq 0.35$ aralığında literatürde verilen korelasyonlarla uyumluluğu görülmüştür. Perforasyondan akışın neden olduğu sürtünme faktörü q_i/q_m oranının 0.35'den büyük değerlerinde bir sabite yaklaştığı ve q_i/q_m oranı 0.035'den küçük değerlerinde ise hızla sıfıra doğru gittiği belirlenmiştir.

Çalışma özellikle perforasyon çaplarının değiştirilerek etkileri üzerinde sürdürülmeli ve ayrıca yüzey sürtünme faktörü ile ilgili olarak gerek literatürde verilen gerekse bu çalışmada elde edilen sonuçların ek çalışmalarla geliştirilmeye ihtiyacı vardır.



KAYNAKLAR

- [1] DIKKEN, B. J., "Pressure Drop in Horizontal Wells and its Effect on Their Production Performance", paper SPE 19824, presented at the SPE 64th Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, Oct. 8-11, 1989.
- [2] SHAPIRO, A. H., SIEGEL, R., KLINE, S. J., "Friction Factor in the Laminar Entry Region of a Smooth Tube", Proceedings of Second U. S. National Congress of Applied Mechanics, June 1954, pp. 733-741
- [3] YUAN, S. W. and FINKELSTEIN, A. B., "Laminar Pipe Flow with Injection and Suction Through a Porous Wall", Transactions of ASME, vol. 78, 1956, pp. 719-724
- [4] KINNEY, R. B., "Fully Developed Frictional and Heat Transfer Characteristics of Laminar Flow in Porous Tubes", Int. J. Heat Mass Transfer, vol 11, 1968, pp. 1393-1401.
- [5] HORNBECK, R. W., ROULEAU, W. T. and OSTERLE, F., "Laminar Entry Problem in Porous Tubes", The Physics of Fluids, vol. 6, No. 11, Nov. 1963, pp. 1649-1654.
- [6] OLSON, R. M. and ECKERT, E. R. G., "Experimental Studies of Turbulent Flow in a Porous Circular Tube with Uniform Fluid Injection Through the Tube Wall", Journal of Applied Mechanics, March 1966, pp. 7-17.
- [7] KATO, H., FUJII, Y., YAMAGUCHI, H. and MIYAGANA, M., "Frictional Drag Reduction by Injecting High-Viscosity Fluid into Turbulent Boundary Layer", Journal of Fluids Engineering, June 1993, vol 115, pp. 207-212.
- [8] ASHEIM, H., KOLNES, J. and OUDEMAN, P., "A Flow Resistance Correlation for Completed Wellbore", Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 8(1992), pp. 97-104.

- [9] ISLAM, M. R., and CHAKMA, A., "Comprehensive Physical and Numerical Modelling of a Horizontal Well" SPE paper 20627, presented at SPE 65th Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA Sept. 23-26, 1990

- [10] ÖZKAN, E., SARICA, C., HACIİSLAMOĞLU, M., and RAGHAVAN, R., "Effect of Conductivity on Horizontal Well Pressure Behaviour" SPE paper 24683, presented at SPE 67th Annual Technical Conference and Exhibition, Washington, D. C., Oct. 4-7, 1992

- [11] BREKKE, K., and LIEN, S. C., "New and Simple Completion Methods for Horizontal Wells Improve the Production Performance in High Permeability, Thin Oil Zones" SPE paper 24762, presented at SPE 67th Annual Technical Conference and Exhibition, Washington, D. C., Oct. 4-7, 1992

- [12] KLOSTER, J., Experimental Research on Flow Resistance in Perforated Pipe, M.S Thesis, Norwegian Institute of Technology, 1990

- [13] SU, Z. and GUDMUNDSSON, J. S., "Friction Factor of Perforation Roughness in Pipes", paper SPE 26521, presented at SPE 68th Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, Oct. 3-6, 1993.

- [14] YUAN, H., Investigation of Single Phase Liquid Flow Behavior in a Single Perforation Horizontal Well, Fluid Flow Project Research Report, The Univ. of Tulsa, Oklahoma, 1994.

- [15] JOSHI, S. D., Horizontal Well Technology, Pennwell Publication Co., pp. 393-396, Tulsa, Oklahoma, 1991

- [16] DAUGHERTY, R. L., and INGERSOLL, A. C., Fluid Mechanics, McGraw-Hill Book Co., pp.161-198, 1954

- [17] WHITE, F. M., Viscous Fluid Flow, McGraw-Hill Book Co., pp. 9-12, 1974

EKLER



EK-A DENEY VERİLERİ

A.1 4 mm Perforasyon için Deney Verileri

Enjeksiyon Debisi = 0.0 l/dk

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
40784.60	0.0048902
38323.46	0.0055385
36348.70	0.0056550
34730.61	0.0062249
33678.16	0.0060684
31753.72	0.0068262
30871.70	0.0065653
30871.70	0.0072219
30241.64	0.0068418
29055.70	0.0066705
29055.70	0.0066705
28496.93	0.0061641
27959.25	0.0073640
27959.25	0.0072039
27441.49	0.0074783
26780.25	0.0082012
26304.86	0.0072343
25846.05	0.0071187
24974.84	0.0080253
24974.84	0.0084266
24974.84	0.0090285
24560.89	0.0076758
24160.44	0.0092186
23646.39	0.0089524
22566.10	0.0098300
21270.44	0.0105109
21270.44	0.0096811
20873.99	0.0100552
20773.46	0.0098598
20299.18	0.0106297
19412.76	0.0116226

Enjeksiyon Debisi = 0.0 l/dk' nın devamı

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
19244.68	0.0108128
19142.76	0.0116226
18917.11	0.0104911
18219.35	0.0105560
17998.06	0.0112035
17571.23	0.0121598
17571.23	0.0117545
17365.32	0.0116299
17164.18	0.0114690
16526.10	0.0137464
16223.39	0.0137887
15991.08	0.0146816
15991.08	0.0127241
15820.36	0.0125002
15329.38	0.0133137
15120.82	0.0153255
14818.40	0.0148176
14340.39	0.0152134
14068.11	0.0145434
14068.11	0.0139111
13935.80	0.0135321
13678.53	0.0160524
13430.58	0.0173444
13191.46	0.0143831
13191.46	0.0165406
13191.46	0.0165406
13152.43	0.0144686
12960.70	0.0148998
12811.30	0.0167743
12179.51	0.0160289
12179.51	0.0177161
11854.72	0.0142477
11854.72	0.0160287
11760.64	0.0171910
11668.04	0.0156265
11311.76	0.0176044
10842.74	0.0180959
10763.97	0.0172816
10712.10	0.0174494
10712.10	0.0196305
10686.35	0.0197252
10386.73	0.0173997

Enjeksiyon Debisi = 0.0 l/dk' nın devamı

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
10314.43	0.0188208
10172.82	0.0181392
9857.03	0.0193200
9813.51	0.0181923
9184.96	0.0207674
9184.96	0.0192840
9166.02	0.0208533
8838.01	0.0224299
8733.83	0.0180464
8632.08	0.0201539
8309.39	0.0163122
8232.45	0.0221581
7896.13	0.0260930
7691.21	0.0232708
7691.21	0.0253863
7409.20	0.0250760
7409.20	0.0205167
7112.83	0.0197885
7112.83	0.0222621
6839.26	0.0187279
6766.40	0.0273334
6048.33	0.0239462
5991.27	0.0174318
5975.16	0.0280414
5803.55	0.0241509
5714.04	0.0306628
5515.54	0.0205685
5454.63	0.0168244
5330.36	0.0264269
4655.00	0.0173257
4324.44	0.0401514
4311.85	0.0336551
4182.05	0.0321990
3355.11	0.0555859

Enjeksiyon Debisi = 4.0513 l/dk

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
42693.84	0.0398205
42342.57	0.0404839
41658.40	0.0414640
39440.41	0.0426385
38565.88	0.0471184
37198.03	0.0479341
36177.24	0.0497211
35450.75	0.0502862
34530.22	0.0514287
33243.35	0.0526565
32057.40	0.0554068
31498.64	0.0561287
30960.96	0.0587479
30960.96	0.0600534
30274.84	0.0598024
28847.76	0.0631588
27976.54	0.0671537
26774.55	0.0663357
25567.80	0.0708310
23300.90	0.0783687
22414.46	0.0871806
21447.85	0.0884147
20572.94	0.0975731
19527.81	0.1073123
18992.79	0.1075456
18992.79	0.1127494
18122.53	0.1226950
17342.10	0.1289933
16807.67	0.1262520
16193.16	0.1407885
16154.13	0.1390718
16038.42	0.1362207
15813.01	0.1451368
15181.22	0.1531245
15049.19	0.1475345
14313.46	0.1667561
14313.46	0.1557612
13688.05	0.1669803
13388.44	0.1675560
12880.62	0.1734858
12858.74	0.1793743
12301.96	0.1819210

Enjeksiyon Debisi = 4.0513 l/dk' nın devamı,

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
12243.95	0.1794749
11839.72	0.1919394
11173.61	0.1954589
10897.83	0.2002081
10410.91	0.2078279
9969.61	0.2014524
9768.10	0.2098497
8929.07	0.2087604
8231.71	0.2216200
7603.69	0.2164510
7102.77	0.2232520
6480.18	0.2086090

Enjeksiyon Debisi = 2.3678 l/dk

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
40077.81	0.0272690
38193.05	0.0291688
36484.98	0.0314938
35432.51	0.0318974
33508.07	0.0334373
32626.05	0.0352696
32626.05	0.0352696
30810.04	0.0371769
30251.28	0.0369220
28534.60	0.0407297
28059.21	0.0410088
27600.40	0.0410693
26729.19	0.0455418
26315.24	0.0433716
25914.79	0.0469584
25400.74	0.0475206
23024.79	0.0498081
22723.79	0.0521057
22625.34	0.0535380
22527.81	0.0527697
22053.53	0.0553211
21167.11	0.0572584

Enjeksiyon Debisi = 2.3678 l/dk' nın devamı

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
20999.04	0.0567597
20671.46	0.0585728
20200.50	0.0613359
19973.70	0.0608546
19752.41	0.0609427
19325.58	0.0636645
18918.53	0.0639860
17547.71	0.0696884
16572.75	0.0760914
15822.46	0.0799799
15822.46	0.0794800
15690.15	0.0793010
14954.81	0.0868363
14945.81	0.0812340
14715.05	0.0855355
13933.86	0.0915280
13609.67	0.0932461
13609.07	0.0925704
13422.38	0.0958580
12597.08	0.1033094
12518.32	0.1054120
12466.45	0.1087068
12466.45	0.1087068
12068.78	0.1116927
11927.17	0.1126014
11567.86	0.1150290
10939.31	0.1275817
10939.31	0.1254902
10488.18	0.1331049
10386.43	0.1392058
10063.74	0.1420980
9986.80	0.1468054
9163.55	0.1594674
7745.62	0.1877323
7729.51	0.1927046
7557.90	0.1971735
7468.39	0.2019280
7269.89	0.2036348
6409.35	0.2223843
5936.40	0.2308210
5109.46	0.2396782

Enjeksiyon Debisi = 1.0345 l/dk

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
41555.59	0.0108703
41551.07	0.0108727
40463.14	0.0107008
40458.63	0.0107032
40111.89	0.0108891
40107.37	0.0108915
40107.37	0.0116695
39094.45	0.0114632
39089.93	0.0114659
37812.48	0.0124287
37506.32	0.0124545
37205.17	0.0122049
36335.16	0.0132704
36330.64	0.0132737
34701.75	0.0140294
34701.75	0.0145490
34444.66	0.0142396
32980.39	0.0151870
32630.56	0.0152793
31642.69	0.0174981
31638.17	0.0175031
31008.11	0.0175708
31008.11	0.0169200
29826.68	0.0175836
29822.16	0.0175890
29263.40	0.0182671
28730.24	0.0192546
28725.72	0.0192606
27551.24	0.0197837
27546.72	0.0197902
26173.97	0.0215552
26169.45	0.0215626
25468.33	0.0225732
25463.81	0.0225812
24417.38	0.0230889
24412.86	0.0230974
21641.98	0.0267187
21637.46	0.0267298
20795.86	0.0274902
20791.34	0.0275022
20011.15	0.0287510
19731.50	0.0300141

Enjeksiyon Debisi = 1.0345 l/dk' nin devamı

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
19366.98	0.0300281
18990.34	0.0322720
18985.82	0.0322874
18136.31	0.0323392
18131.79	0.0313554
17483.47	0.0347994
17478.96	0.0348174
16591.35	0.0368239
16586.83	0.0368440
16202.30	0.0376602
15887.29	0.0386726
15739.07	0.0383940
15734.55	0.0384161
15734.55	0.0389216
15389.89	0.0396277
14839.09	0.0397825
14834.58	0.0398067
14324.41	0.0420828
14319.89	0.0427196
14319.89	0.0421093
14201.57	0.0421934
14197.05	0.0422203
13472.48	0.0434364
13467.96	0.0434656
13253.89	0.0470182
13119.68	0.0458039
13115.16	0.0458355
12818.47	0.0472202
12813.95	0.0472535
11884.79	0.0487291
11880.27	0.0487661
11534.96	0.0517296
11530.44	0.0517701
11380.83	0.0510790
11376.31	0.0512486
11014.13	0.0526113
11009.61	0.0526545
9955.95	0.0606016
9951.43	0.0606567
9715.70	0.0609843
9711.18	0.0610411
9487.70	0.0646457

Enjeksiyon Debisi = 1.0345 l/dk' nın devamı

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
9483.18	0.0647074
8542.88	0.0720194
8538.36	0.0720956
8383.18	0.0712280
8378.66	0.0713049
6507.15	0.0945753
6502.63	0.0947068
6225.62	0.0968646
6221.10	0.0970054
5922.23	0.1070432
5917.64	0.1072092



A.2 8 mm Perforasyon için Deney Verileri

Enjeksiyon Debisi = 0.0 l/dk

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
37357.20	0.0046685
33935.28	0.0056575
33935.26	0.0045260
32449.05	0.0049501
32213.95	0.0050226
32213.92	0.0056505
31528.38	0.0065543
31528.38	0.0052434
31087.56	0.0053932
30871.92	0.0068360
30241.64	0.0071239
30241.64	0.0056991
30241.40	0.0056992
29636.81	0.0044506
29055.70	0.0061738
28497.27	0.0064182
28496.93	0.0056160
27959.37	0.0058341
26942.82	0.0053851
26780.56	0.0054506
26780.25	0.0054507
26780.25	0.0054507
26304.89	0.0084718
25380.96	0.0080910
25380.96	0.0080910
25380.96	0.0080910
25380.96	0.0080910
24974.84	0.0073117
23397.52	0.0071407
23397.52	0.0071407
23397.48	0.0090449
22566.21	0.0076765
22566.10	0.0089560
22566.10	0.0076766
21899.12	0.0081511
21899.08	0.0081513
21899.08	0.0081513
20969.44	0.0088901
20299.18	0.0094869

Enjeksiyon Debisi = 0.0 l/dk' nın devamı

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
20024.85	0.0097486
19757.88	0.0083448
19757.88	0.0083448
19161.72	0.0088722
18523.01	0.0094957
18523.01	0.0075957
18445.95	0.0095741
18367.41	0.0096561
17571.23	0.0088628
17571.22	0.0126612
17367.17	0.0108004
17098.16	0.0089143
16648.48	0.0117530
16343.83	0.0097562
16166.88	0.0124637
16166.88	0.0124637
16165.53	0.0099726
15884.56	0.0116309
15884.56	0.0116309
15653.27	0.0106360
15653.27	0.0106360
15433.37	0.0120354
15433.37	0.0120354
15276.70	0.0111668
14671.69	0.0115014
14670.22	0.0121092
14575.38	0.0122673
14529.45	0.0111105
14527.85	0.0111129
14070.08	0.0131642
13678.87	0.0139280
13678.53	0.0139310
13678.50	0.0139287
12701.52	0.0121154
12314.09	0.0128897
12277.05	0.0172902
11951.04	0.0136848
11854.72	0.0139081
11032.30	0.0160589
10976.58	0.0140594
10842.63	0.0221670
10587.75	0.0139486

Enjeksiyon Debisi = 0.0 l/dk' nın devamı

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
9813.49	0.0135304
9813.49	0.0135304
9557.87	0.0142638
9539.72	0.0143181
9539.72	0.0143181
9417.10	0.0146935
9109.61	0.0157021
9068.86	0.0158435
8944.69	0.0162865
8516.36	0.0179659
8516.36	0.0179659
7573.32	0.0227188
7112.83	0.0180290
6839.26	0.0167144
6586.78	0.0300339
6048.33	0.0178097
5330.36	0.0183445
4311.85	0.0210257

Enjeksiyon Debisi = 5.106 l/dk

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
37718.40	0.0302249
35997.09	0.0331846
35311.52	0.0323957
34655.06	0.0347196
34024.54	0.0348928
32280.41	0.0362642
31742.51	0.0362104
30563.70	0.0390575
29186.33	0.0397715
27180.66	0.0440939
26349.35	0.0459816
23541.01	0.0517286
22239.37	0.0527392
19436.41	0.0586374
19059.84	0.0573904
18123.65	0.0614892
17462.01	0.0619638

Enjeksiyon Debisi = 5.106 l/dk' nın devamı

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
17461.64	0.0641032
16484.66	0.0647339
14625.77	0.0670059
13596.63	0.0704848
13322.86	0.0697408
12299.50	0.0732154

Enjeksiyon Debisi = 2.5 l/dk

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
39209.63	0.0148324
35787.58	0.0172959
32093.94	0.0181759
30349.23	0.0212204
28157.19	0.0230095
25249.78	0.0245259
24418.40	0.0268800
22821.74	0.0287712
21877.15	0.0299480
20375.31	0.0313870
19423.53	0.0345384
18017.83	0.0381309
16380.15	0.0385192
15658.27	0.0425168
14235.37	0.0450110
12564.40	0.0495252
10319.96	0.0575043

Enjeksiyon Debisi = 1.0195 l/dk

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
32969.29	0.0107890
31842.93	0.0115658
30997.01	0.0108495
29252.30	0.0121823
27535.62	0.0128893

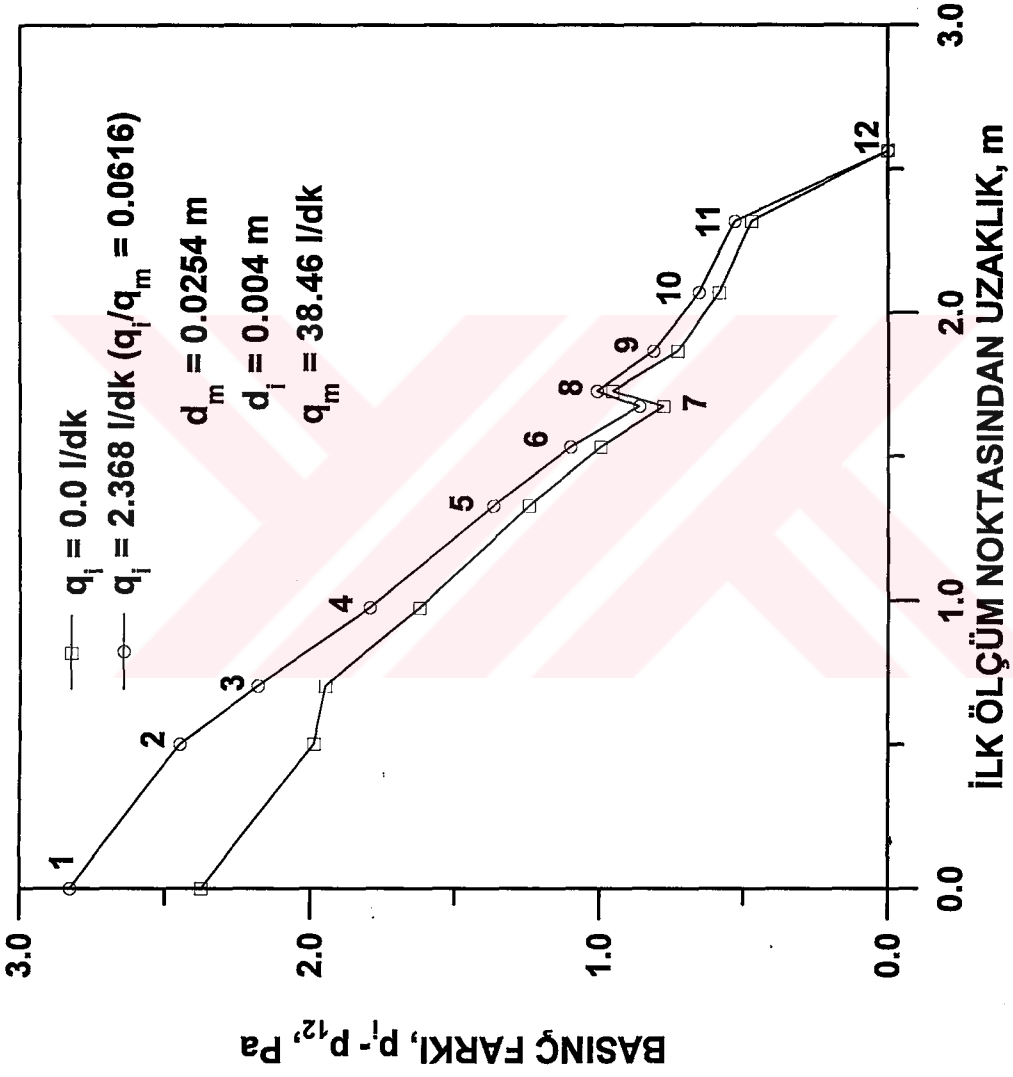
Enjeksiyon Debisi = 1.0195 l/dk'nın devamı

<u>Reynolds Sayısı</u>	<u>f_t</u>
25730.21	0.0137775
23789.16	0.0149663
22654.49	0.0165030
21054.55	0.0205762
20780.24	0.0181054
19278.38	0.0210363
17853.53	0.0216664
17099.19	0.0245115
15723.45	0.0237178
15283.18	0.0251040
13830.39	0.0306550
13138.43	0.0301947
12705.67	0.0322867
9865.04	0.0401681

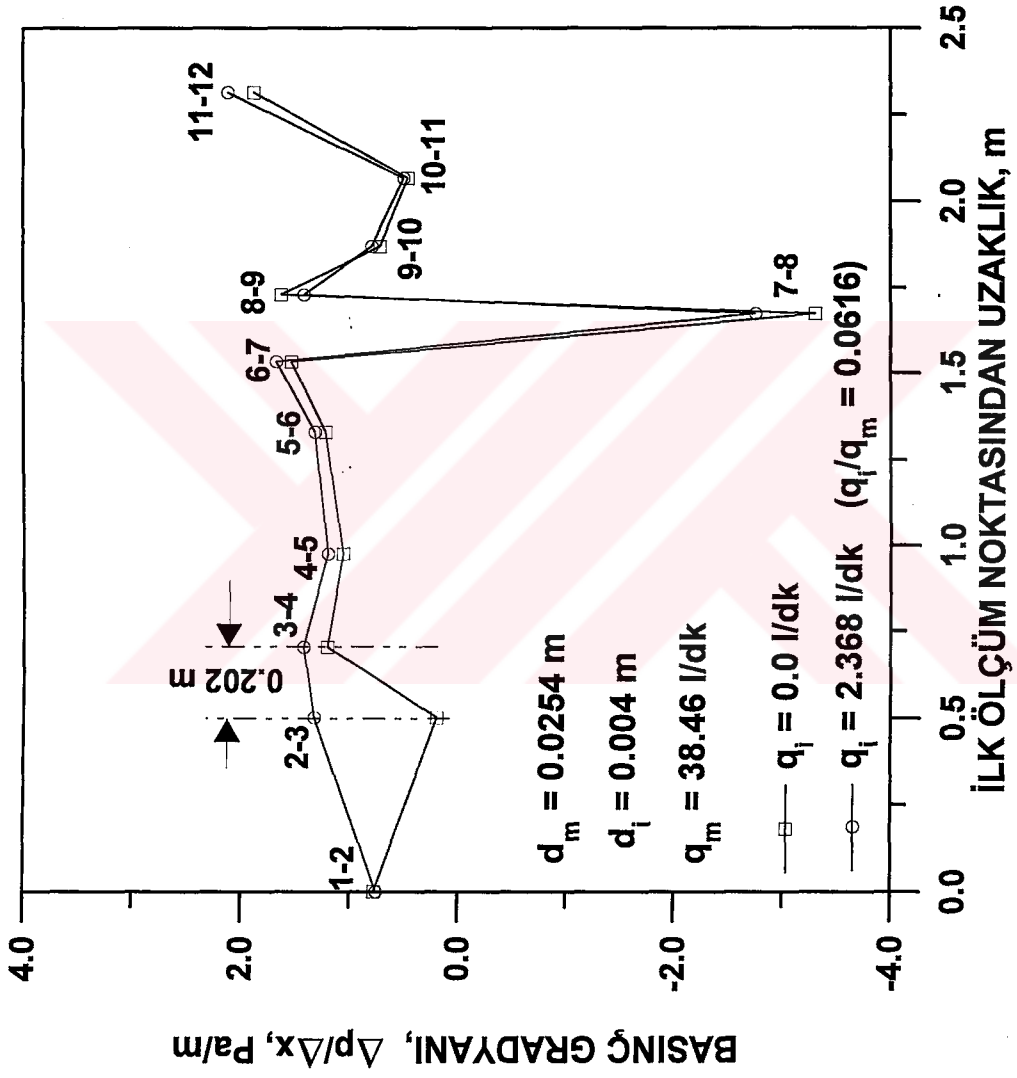
EK-B

Bu bölümde yapılan basınç ölçümlerinin farklı enjeksiyon debisi, ana hat debi oranlarındaki basınç gradyanı ve basınç farkının ilk ölçüm noktasından uzaklık şekilleri 4 mm ve 8 mm perforasyon çapları için ek olarak verilmiştir.

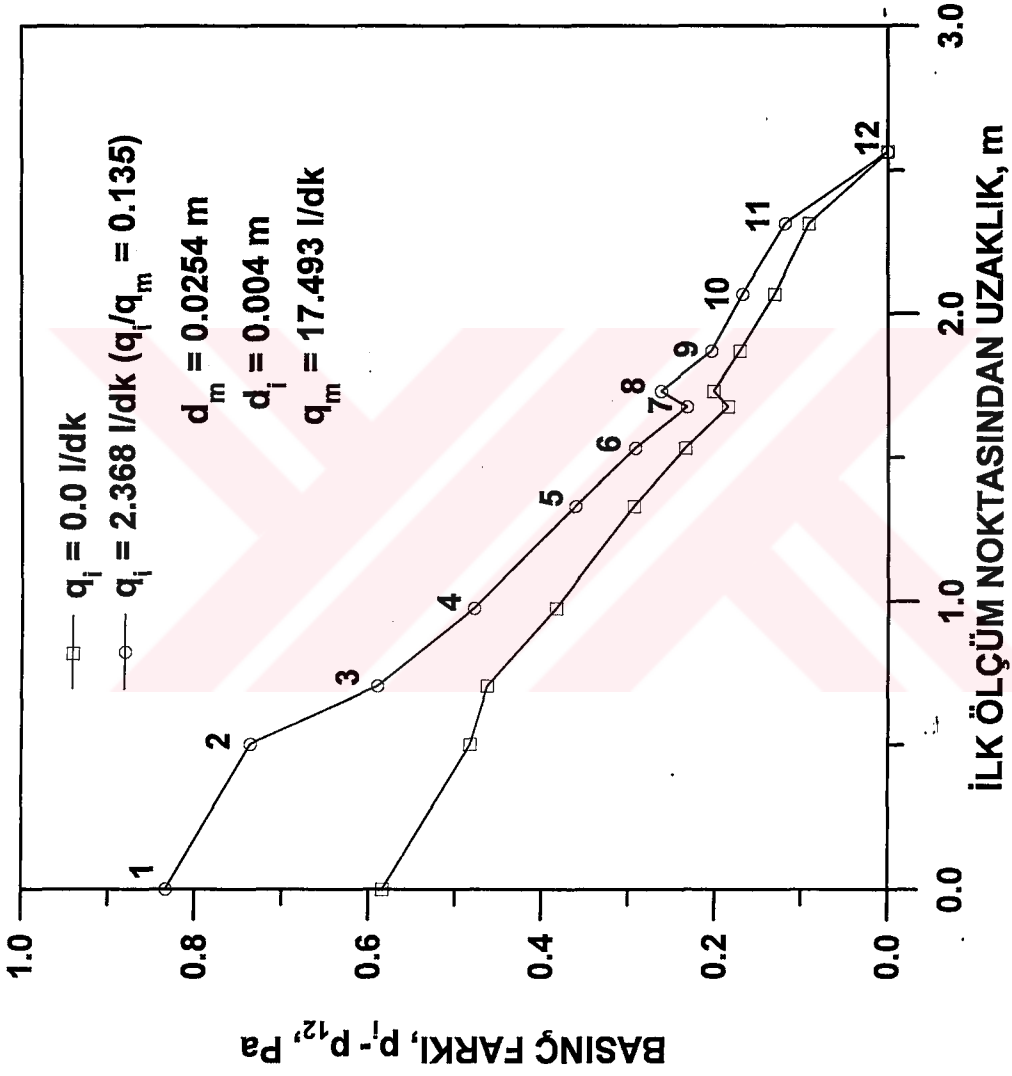




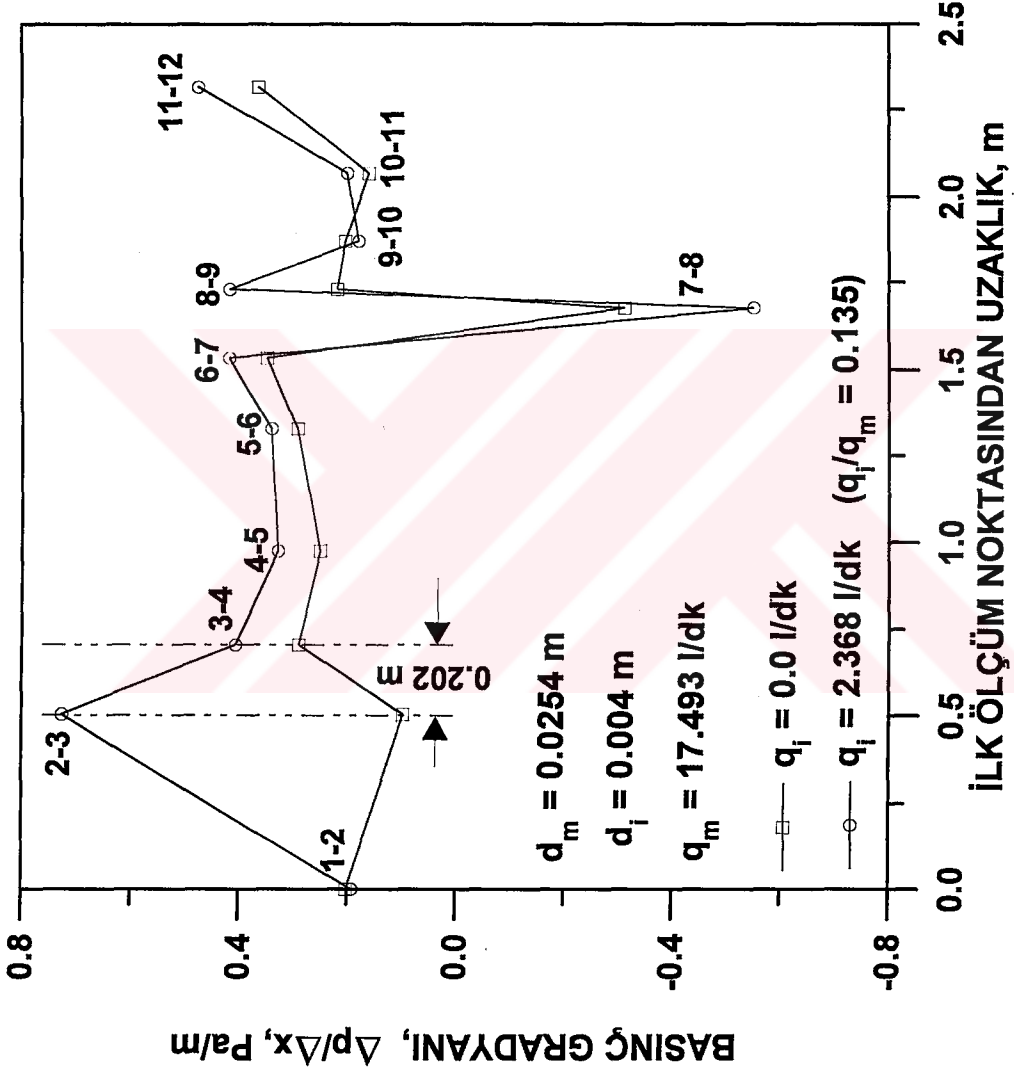
Şekil B.1 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.0616$)



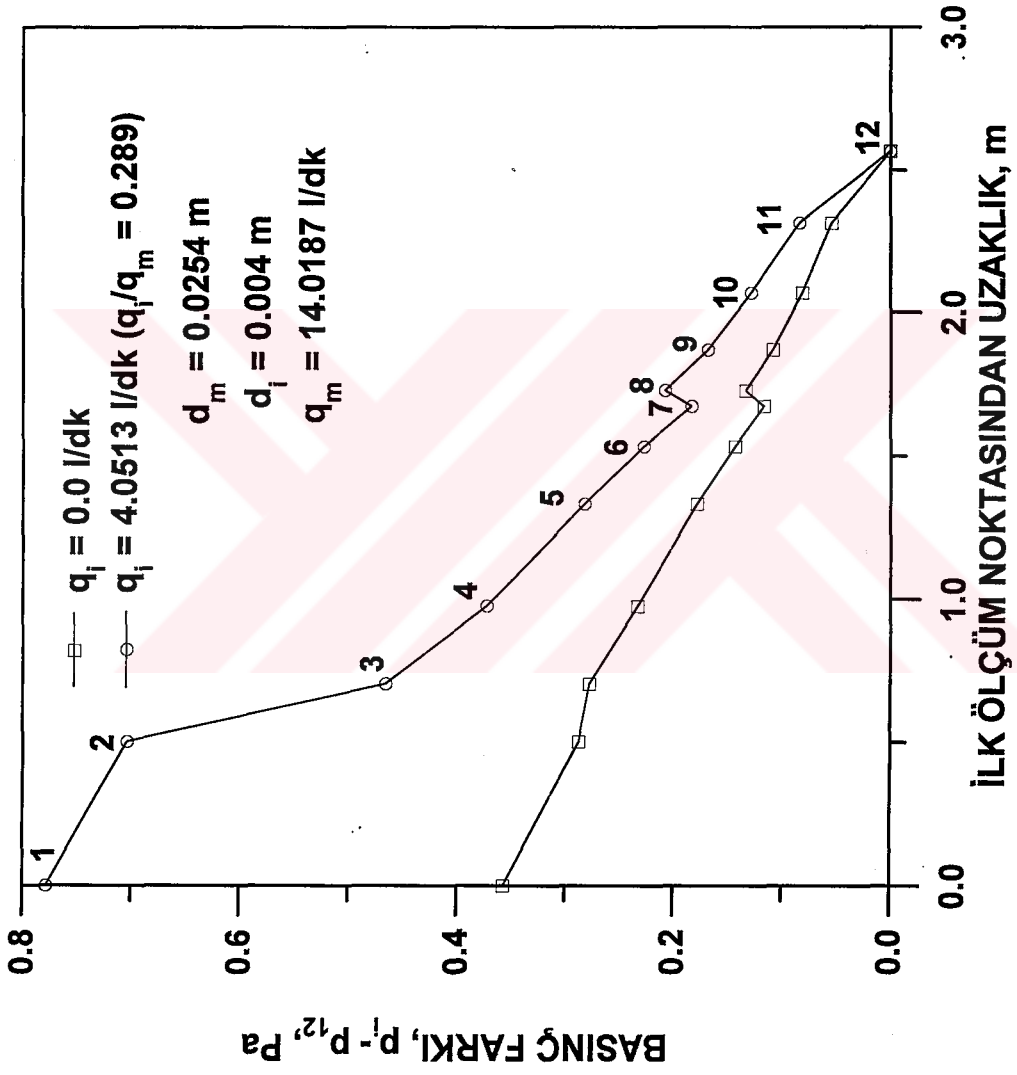
Şekil B.2 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.0616$)



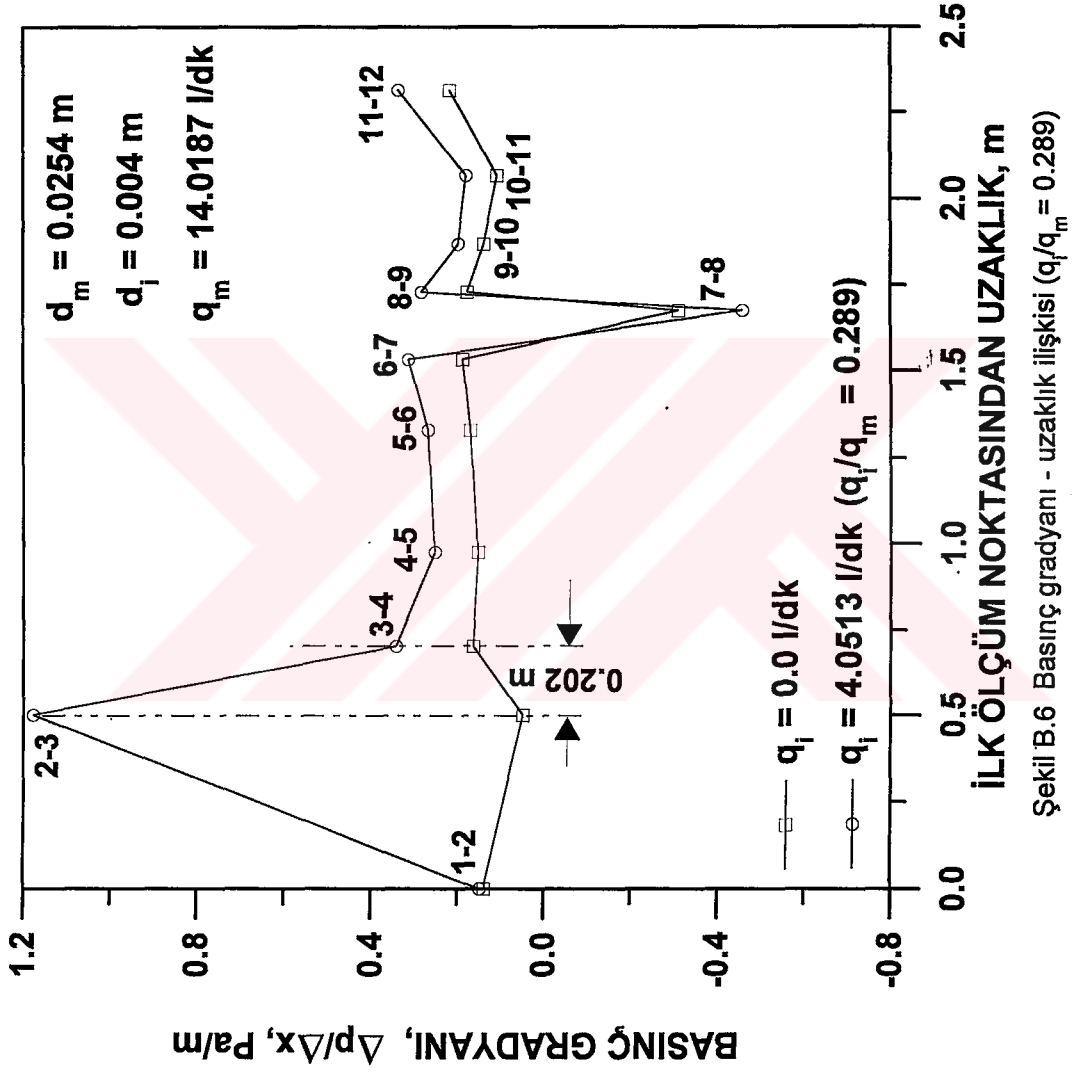
Şekil B.3 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q/q_m = 0.135$)

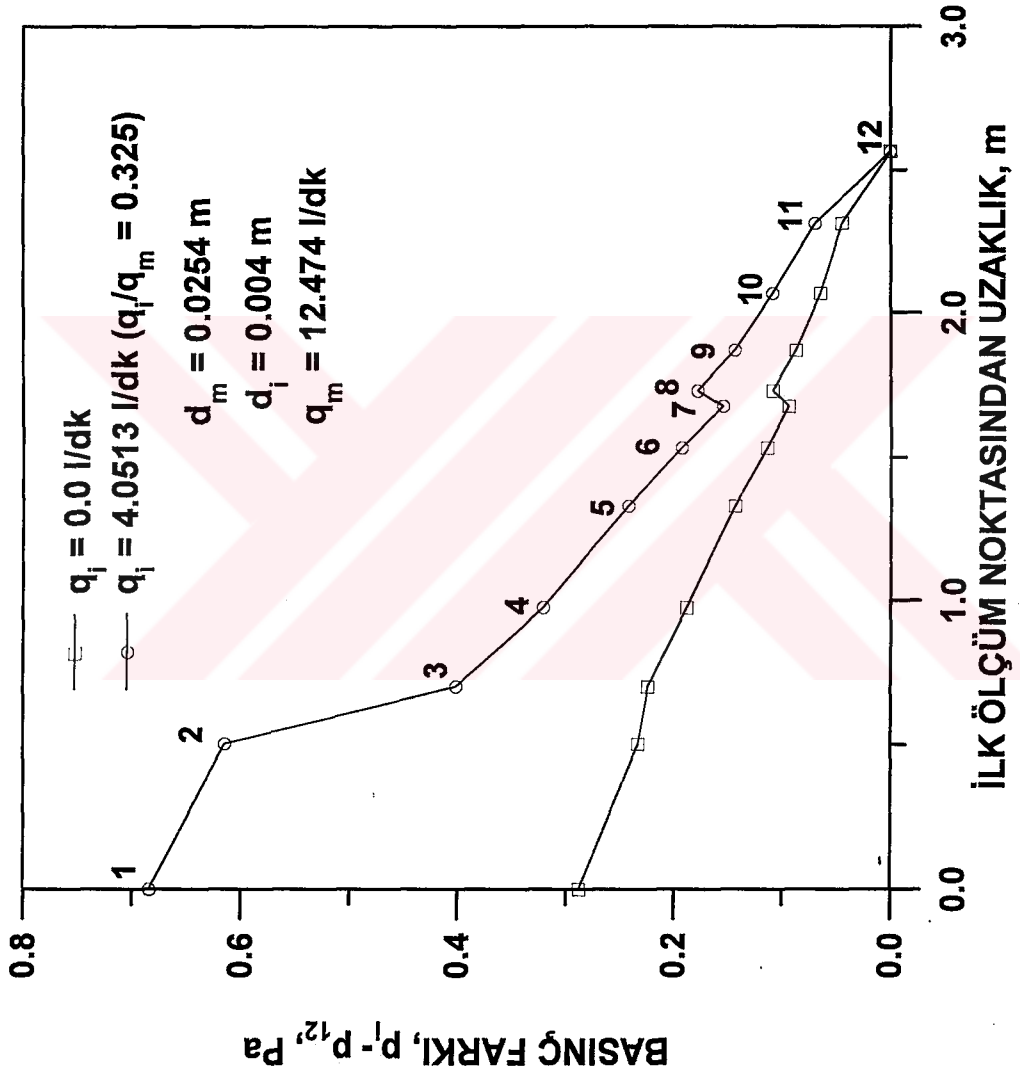


Şekil B.4 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.135$)

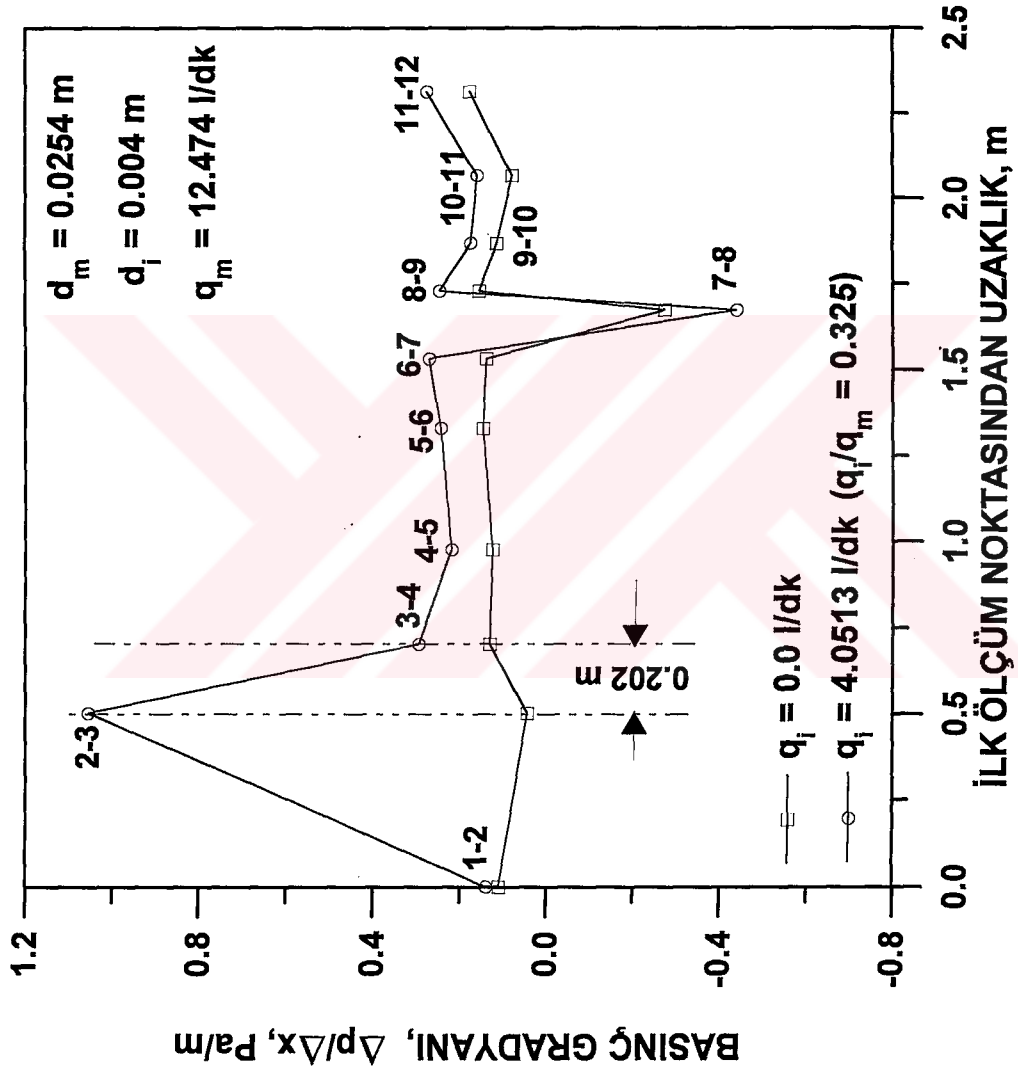


Şekil B.5 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.289$)

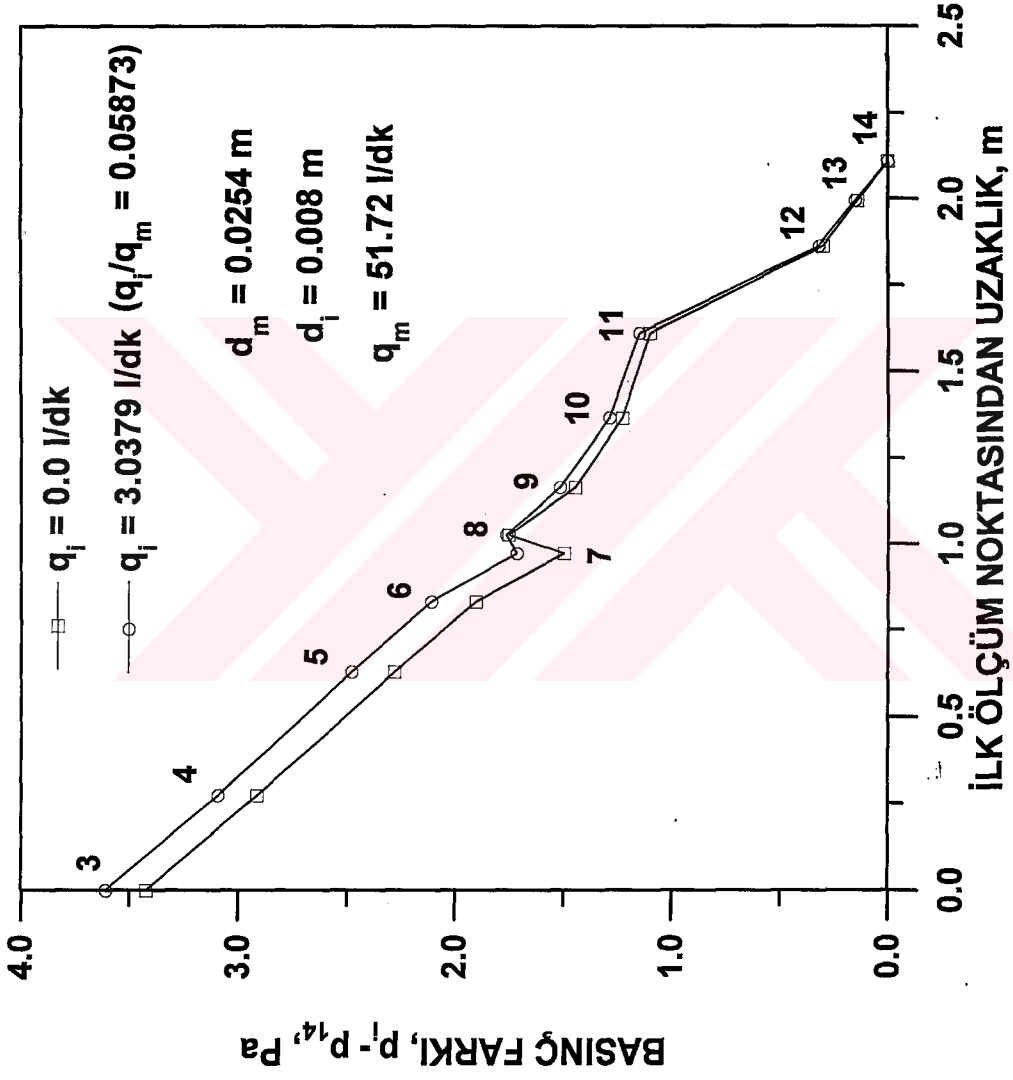




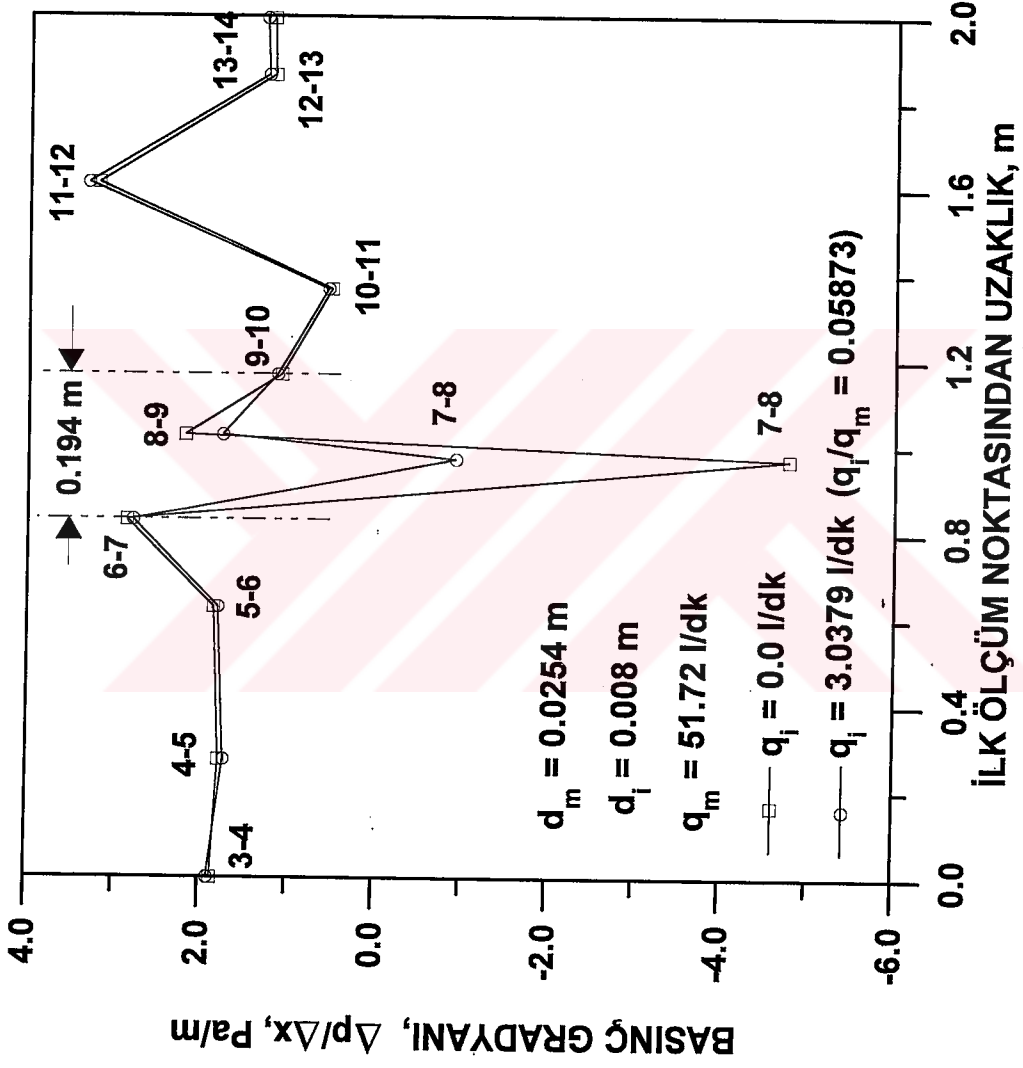
Şekil B.7 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.325$)

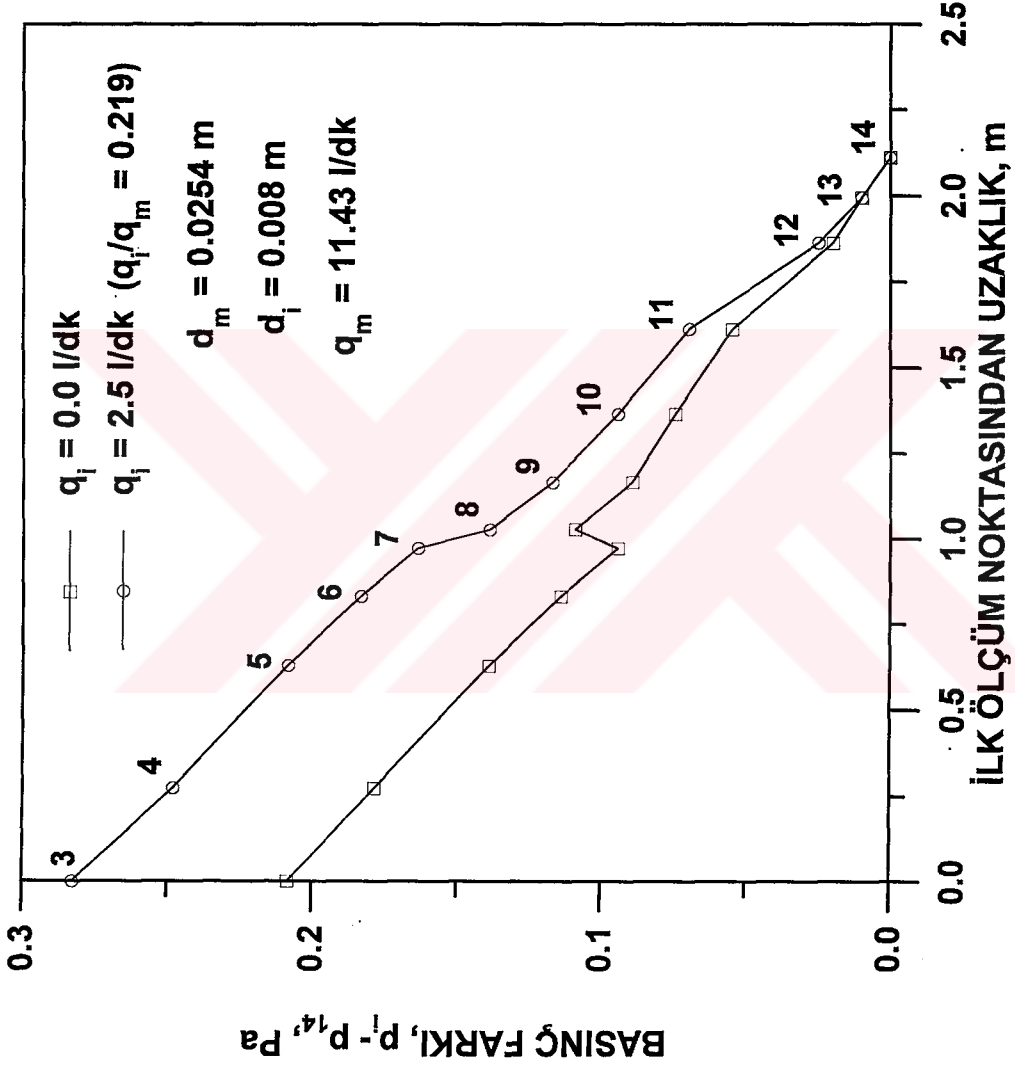


Şekil B.8 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.325$)

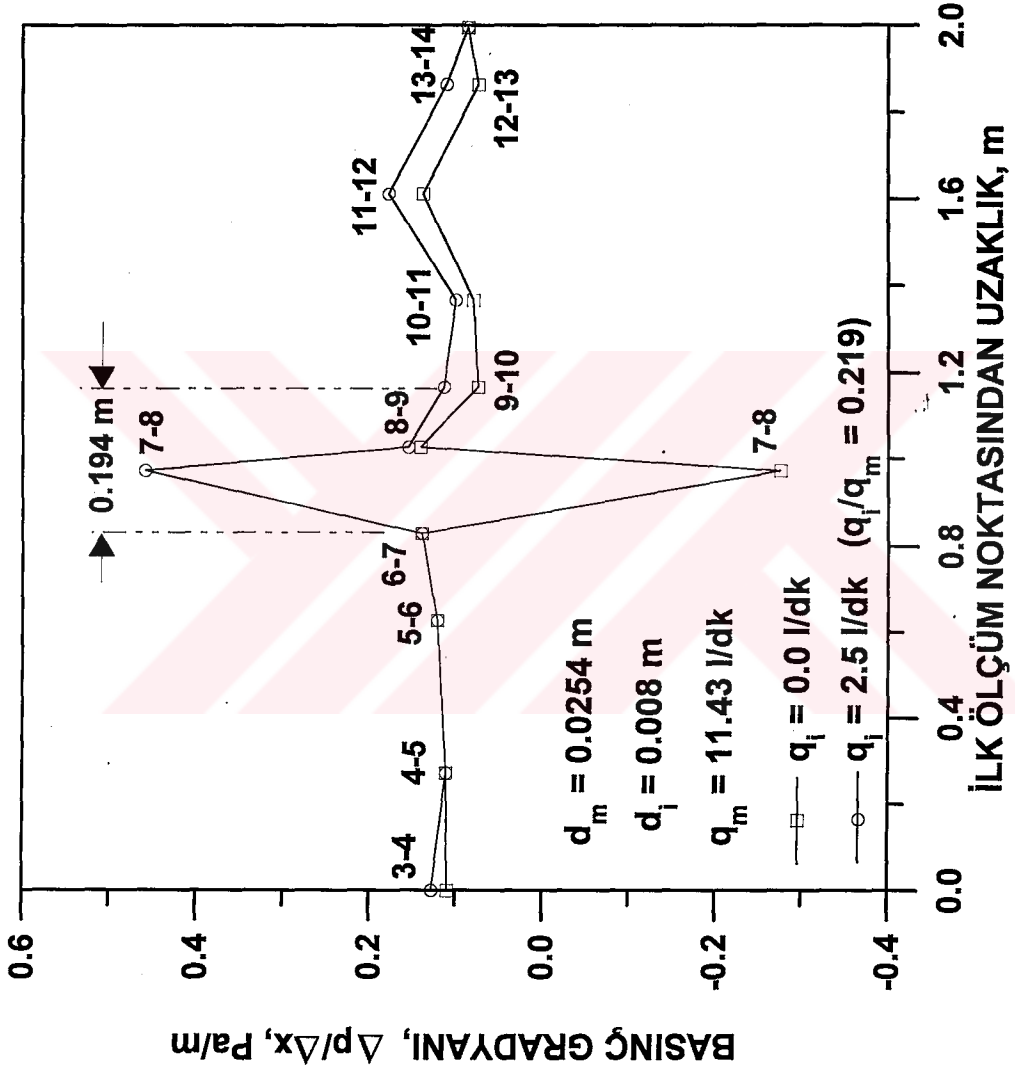


Şekil B.9 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.05873$)

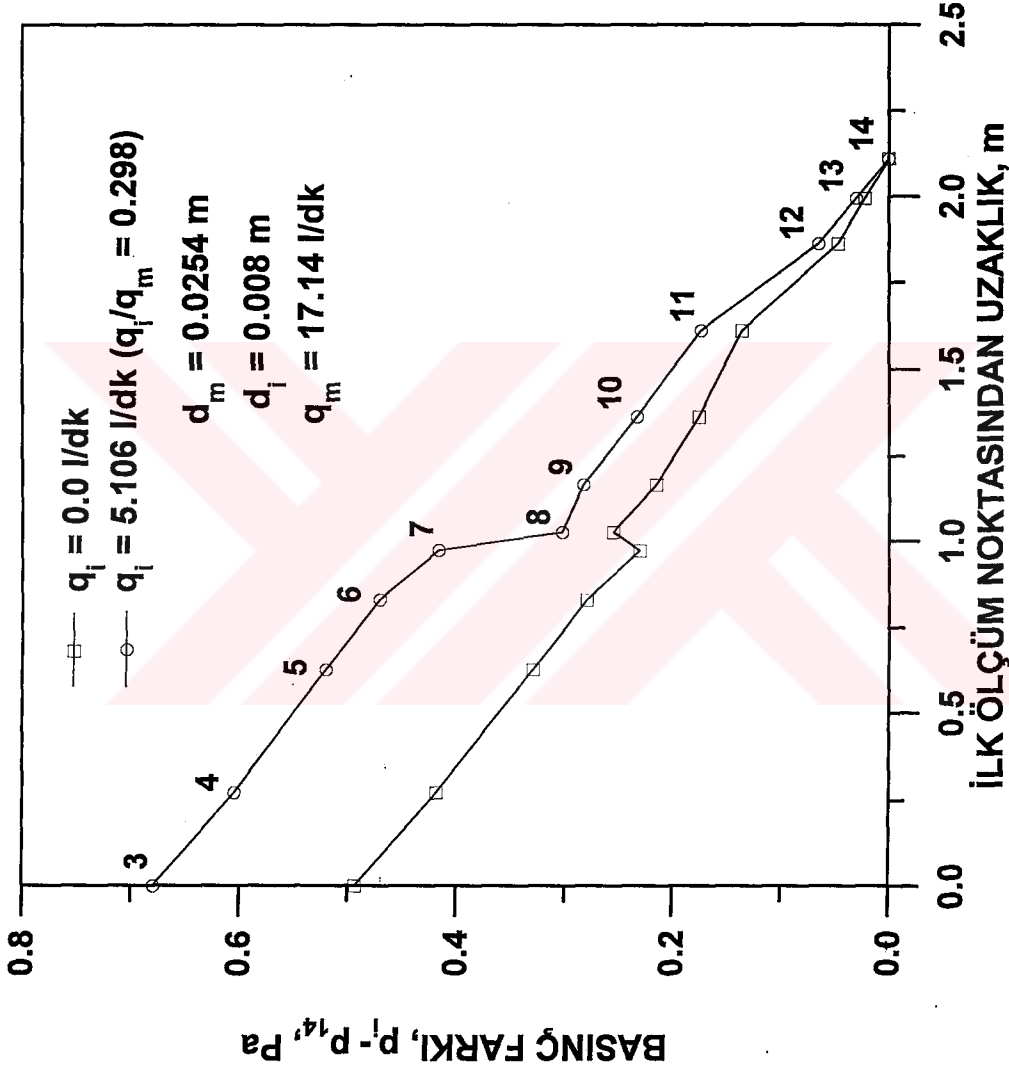




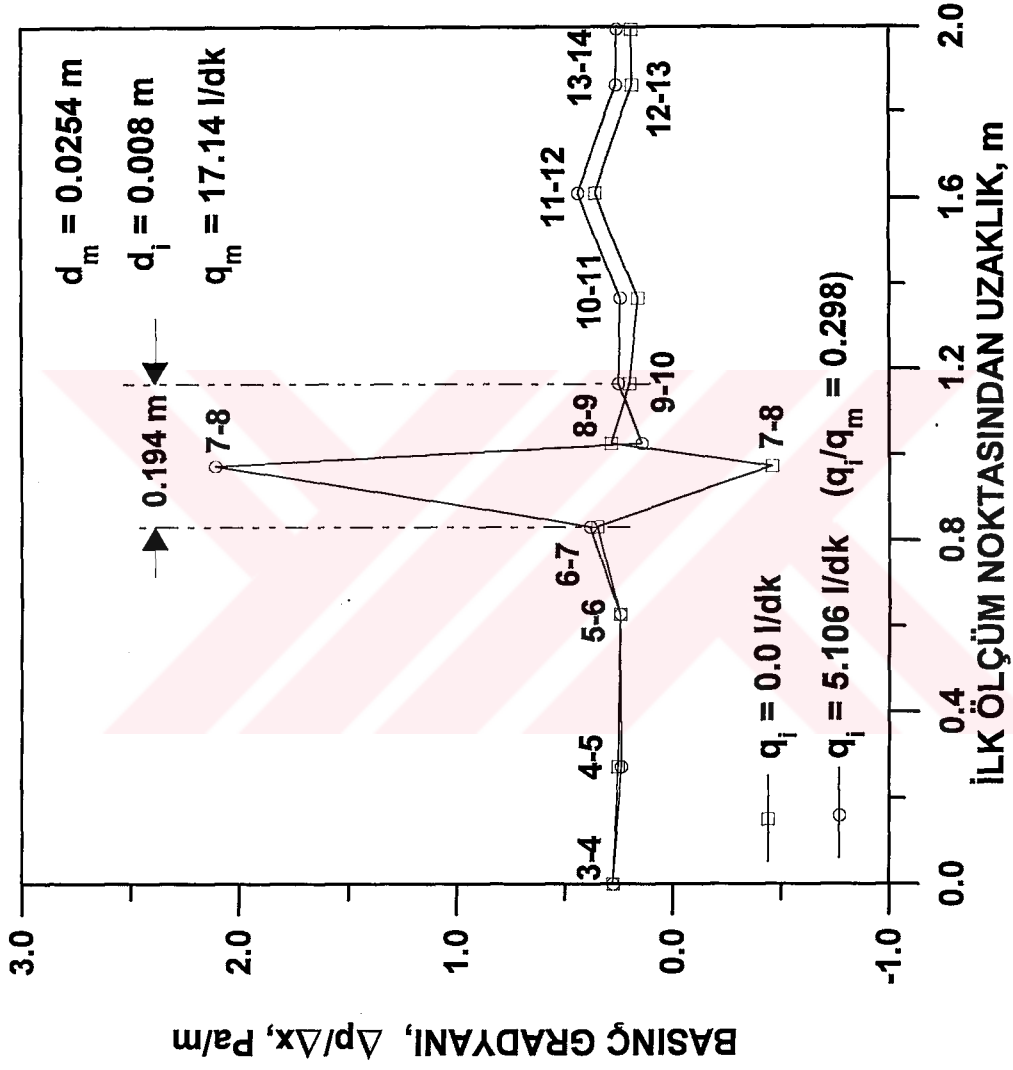
Şekil B.11 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.219$)

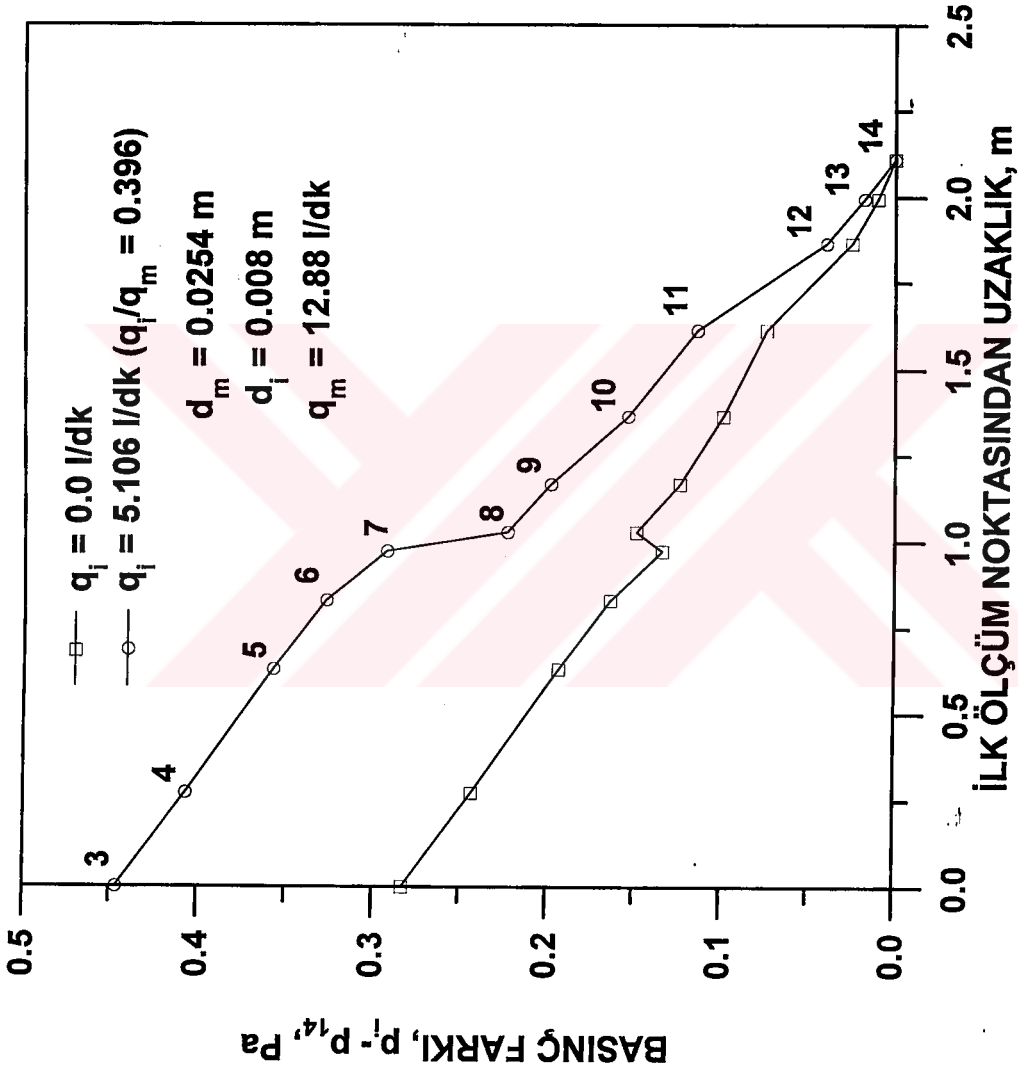


Şekil B.12 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.219$)

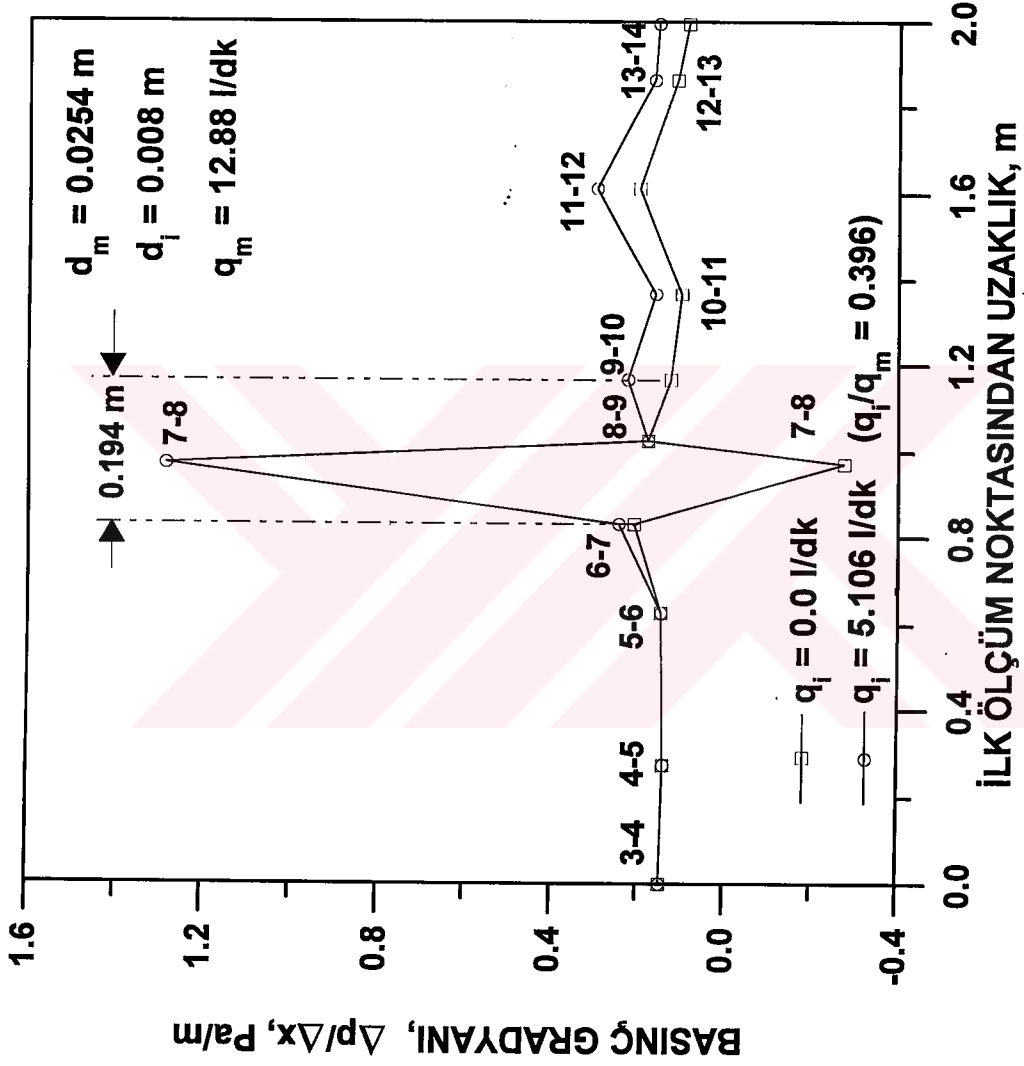


Şekil B.13 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.298$)

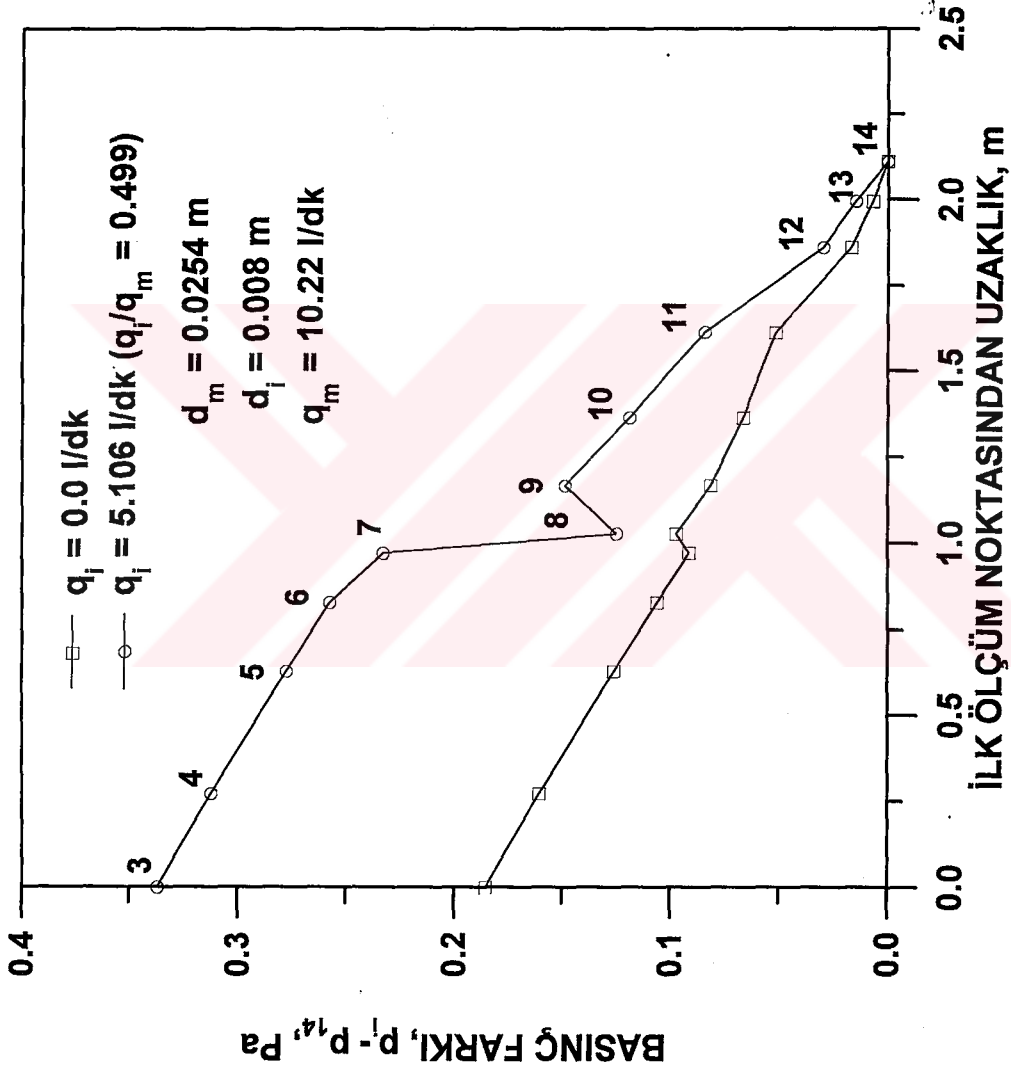




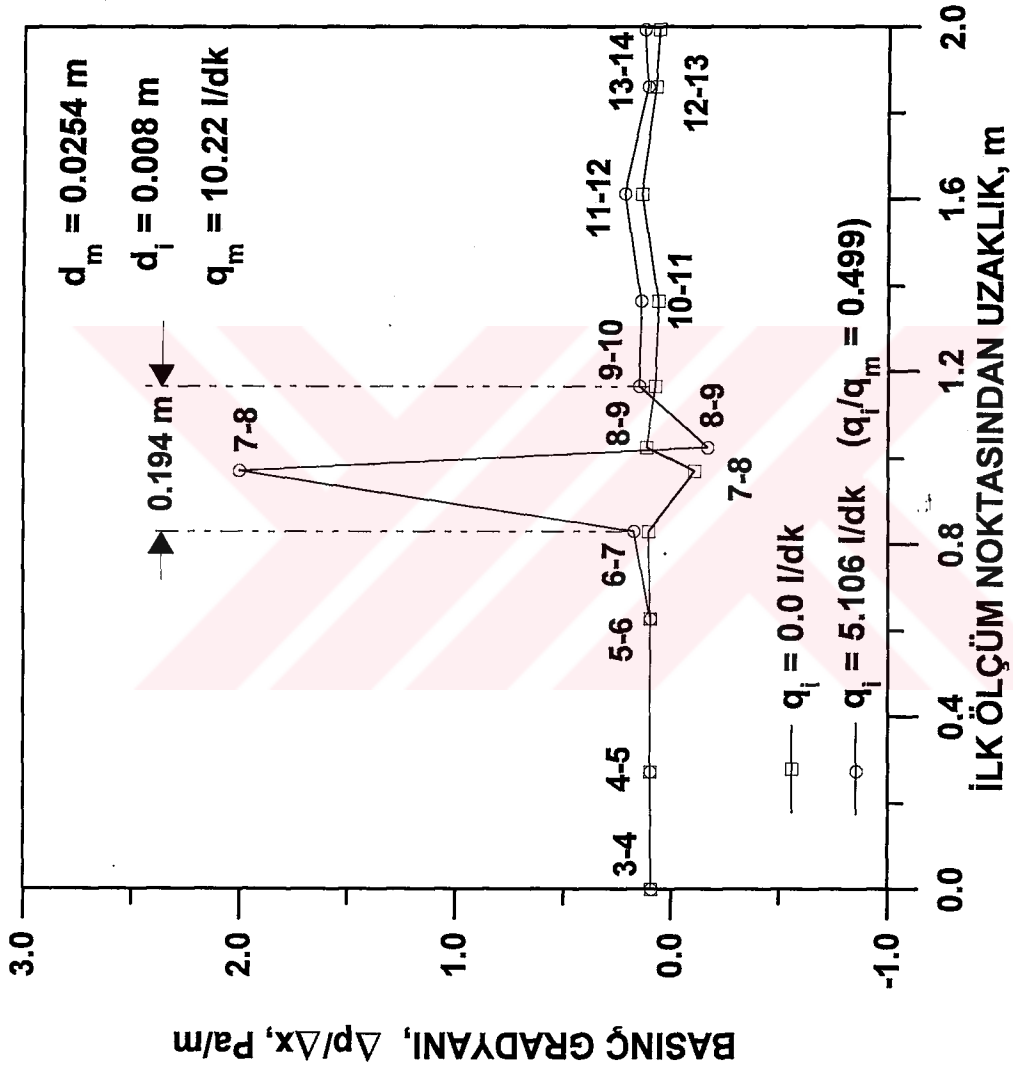
Şekil B.15 Basınç farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.396$)



Şekil B.16 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.396$)



Şekil B.17 Basiñ farkı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.499$)



Şekil B.18 Basınç gradyanı - uzaklık ilişkisi ($q_i/q_m = 0.499$)

ÖZGEÇMİŞ

Mersin' de 1970 yılında doğan M. Umut YALNIZ, 1988 yılında Tarsus Amerikan Kolejinden mezun oldu. İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümünden 1993 yılında mezun olarak aynı sene İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Petrol Mühendisliği Yüksek Lisans programına girdi. 1994 yılından beri İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

