

1997-1251
DOĞAL GAZIN BORU HATLARI
İÇERİSİNDE GEÇİCİ VE İZOTERMAL
OLMAYAN ŞARTLARDAKİ
AKIŞININ SİMÜLASYONU

PROJE NO : MAG 974 - YBAG 0027

Yard. Doç. Dr. Fariborz RASHIDI
Serhat AKIN
Murat ARIKAN
İsmail DURGUT

MART 1994
ANKARA

ÖNSÖZ

Son yıllarda Türkiye'de doğal gaz enerjisi, endüstriden, konut ısıtmaya kadar pekçok değişik alanda kullanılmakta ve bu kullanım giderek yaygınlaşmaktadır. Bunun sonucu olarak yeni iletim ve dağıtım hatlarının yapılması gerekmektedir. Ayrıca, Orta Asya Türk Cumhuriyetleri de petrol ve doğal gazlarını Türkiye üzerinden göndermeyi düşünmektedirler. Türkiye'de şimdiye kadar gerçekleştirilen doğal gaz boru hattı ve şebekeleri yabancı firmalarca tasarlanmıştır. Boru hattı veya bir şebeke yapıldıktan sonra, optimal verimlilik sağlanabilmesi için sürekli analiz edilmesi gerekmektedir. Bu konuda dışa bağımlılıktan kurtulmak için, doğal gaz boru hattı ve şebekelerinin geçici ve izotermal olmayan şartlardaki analizini yapabilen, kolay kullanımlı bilgisayar programları üretilmiştir. Bu raporda TÜBİTAK tarafından desteklenen " Doğal Gazın Boru Hatları İçerisinde Geçici ve İzotermal Olmayan Şartlardaki Akışının Simulasyonu " başlıklı ve MAG 974 - YBAG 0027 numaralı proje kapsamında geliştirilen bilgisayar programları ve bu programların uygulama alanları örneklerle birlikte sunulmuştur. Geliştirilen paket programların hızlı ve doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
ÖZ	vii
ABSTRACT	viii
1. GİRİŞ	1
2. İŞLEMİN MODELLENMESİ	2
2. a. Boru Hatlarında Kararsız (Tranzient) Akış	2
2. b. Temel İlişkiler	2
2. c. Benzetim Paketi TRANFLOW	6
2. d. Benzetim Paketi PIPESIM	11
2. e. Benzetim Paketi TRNONISO	14
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	24
3. a. İzotermal Benzetimler	24
3. b. İzotermal Olmayan Benzetimler	27
4. SONUÇLAR	49
5. GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER	50
6. REFERANSLAR	51
EK A DOĞAL GAZIN TERMODİNAMİK ÖZELLİKLERİ	53
EK B DOĞAL GAZ İÇİN Z-FAKTÖRÜ	59
EK C SÜRÜNME FAKTÖRÜ	61
EK D DOĞAL GAZIN AKMAZLIĞI	63
EK E PIPESIM KULLANIM KILAVUZU	66
EK F TRANFLOW KULLANIM KILAVUZU	71
EK G TRNONISO KULLANIM KILAVUZU	73

TABLO LİSTESİ

1. İki çözücü için Hesaplama Zamanları	10
2. Sınır Durumları Tipleri	11
A.1. Denklem A.2-A.12'deki Sabitler	55

ŞEKİL LİSTESİ

1.1. Verilen Problem için Katsayı Matrisi	3
1.2. İki Matris Çözümünün Karşılaştırılması	9
1.a. Eskişehir-Ankara Hattının Ankara Ucundaki Basınç Davranışı-Simulattör TRANFLOW.	31
1.b. Eskişehir-Ankara Hattının Ankara Ucundaki Basınç Davranışı-Simulattör PIPESIM.	31
2.a. Giriş Basıncı-Zaman Grafiği, Örneğ B-Simulattör TRANFLOW	32
2.b. Çıkış Basıncı-Zaman Grafiği, Örneğ B-Simulattör TRANFLOW	32
2.c. Giriş Basıncı-Zaman Grafiği, Örneğ B-Simulattör PIPESIM	33
2.d. Giriş Basıncı-Zaman Grafiği, Örneğ C-Simulattör PIPESIM	33
3.a. Çıkış Basıncı-Zaman Grafiği, Örneğ C-Simulattör TRANFLOW	34
3.b. Giriş Debisi-Zaman Grafiği, Örneğ C-Simulattör TRANFLOW	34
3.c. Çıkış Basıncı-Zaman Grafiği, Örneğ C-Simulattör PIPESIM	35
3.d. Giriş Debisi-Zaman Grafiği, Örneğ C-Simulattör PIPESIM	35
4.a. Giriş ve Çıkış Basıncı-Zaman Grafiği, Örneğ D-Simulattör TRANFLOW	36
4.b. Giriş ve Çıkış Basıncı-Zaman Grafiği, Örneğ D-Simulattör PIPESIM	36

5.Hesaplanan ile Literatürden Alınan Sıcaklık Dağılımının Karşılaştırılması	37
6.a.Tanımlanan Sınır Koşulu, Örnek F	38
6.b.Hesaplanan Çıkış Sıcaklığı, Örnek F	38
6.c.Giriş Basıncı-Zaman, Örnek F	39
6.d.Çıkış Basıncı-Zaman, Örnek F	39
6.e.Değişik Zaman Basamaklarında Sıcaklık Dağılımları, Örnek F	40
7.a.Tanımlanan Sınır Koşulu, Örnek G	42
7.b.Hesaplanan Çıkış Sıcaklığı, Örnek G	42
7.c.Giriş Basıncı-Zaman Grafiği, Örnek G	43
7.d.Çıkış Basıncı-Zaman, Örnek G	43
7.e.Değişik Zaman Basamaklarında Sıcaklık Dağılımları, Örnek G	44
8.a.Toprak ve Çıkış Sıcaklıkları, Örnek H	47
8.b.Giriş Basıncı-Zaman, Örnek H	47
8.c.Çıkış Basıncı-Zaman, Örnek H	48
A.1.Basit Akışkan için Sıkıştırılabilirlik Faktörü	54
A.2.Referans Akışkan için Sıkıştırılabilirlik Faktörü	54
A.3.Metan için Entalpi-Basınç Grafiği	58
B.1.Doğal Gaz için Değişik İndirgenmiş Sıcaklık ve Basınlarda Sıkıştırılabilirlik Faktörü	60
C.1.Boru Akışı için Moody Sürtünme Faktörü	62
D.1.Parafinik Hidrokarbon Gazlar için 1 atmde Akmazlık	65
D.2.Akmazlık Oranı-İndirgenmiş Sıcaklık Grafiği	65

Öz

Sabit olmayan (unsteady) veya geçici (transient) durumlar göz önüne alınarak planlanmış doğal gaz taşıma sistemleri etkin ve verimli bir işletme ortamı doğurur. Optimum planlamada hernekadar dikkat değişiklik göstermeyen, sabit (steady) yükleri destekleyecek şekilde yapılsa bile, bu çeşit ortamlar ancak teorik durumlarda karşılaşırlar. Oysa, gerçek işletme ortamlarında, zaman içerisinde doğal gaz iletim sisteminin herhangi bir noktasında geçici olarak oluşabilecek bir değişiklik bu sabitlik kavramını geçersiz kılar. Herhangi bir gaz kompresörünün arızalanıp bir süre için devre dışı kalması, şebekenin satış ve dağıtım noktalarında ani olarak arz veya talepte meydana gelebilecek değişimler veya müşterinin zaman içerisinde değişken miktarlarda doğal gaz ihtiyacı duyması veya sistem sıcaklığında oluşabilecek değişken veya geçici ortamları hazırlayan birkaç örnektir. Bu nedenle, doğal gaz taşıma sistemlerinde muhtemelen oluşabilecek geçici durumların analiz edilmesi ekonomik açıdan önem taşır. Bu proje çerçevesinde doğal gaz taşıma sistemlerinde oluşabilecek sabit veya geçici olmayan ve izotermal olmayan durumların söz konusu olduğu doğal gaz taşıma sistemlerini benzeten bilgisayar pakete programları geliştirilmiş ve değişik sınır koşulları içeren örneklerle birlikte sunulmuştur. Geliştirilen programların hızlı ve etkili olduğu ve doğru sonuçlar verdiği literatürde sunulan örneklerle doğrulanmıştır.

ABSTRACT

Flow parameters of natural gas in real pipeline systems are usually time dependent. The loss of a compressor, the addition or loss of supply or sale points and customers who demand variable sale rates are few of the causes that prescribe transient flow in pipeline systems. Each of the foregoing examples has a feature in common: The problems described have no meaning if only steady-state flow is considered. In each case, time dependent response of the system of pipelines is the critical factor. Hence, a model of the transient response of transmission system under unsteady loads or upset conditions is needed if any quantitative solutions to the problems are to be found. Therefore, cost efficient design and control of real pipeline systems must consider transient response and non isothermal conditions induced by equipment failure and sales rate changes. In this study, user friendly computer packages that can simulate the transient and nonisothermal flow of natural gas in single and multiple high pressure pipelines under varying boundary conditions were developed and tested. The test results show that the generated models are fast and efficient and yield accurate results.

1. giriş

Günümüzde Türkiye doğal gazını taşıma hattı yoluyla Rusya'dan almaktadır. Zamanla talep arttıkça, gelecekte ikinci bir taşıma hattının ilkinde paralel olarak kurulması gereksinimi doğabilecektir. Bu tür gereksinimleri karşılayabilmek amacıyla bir üçüncü ya da dördüncüsü de sisteme eklenebilir. Bu şekilde birbirine paralel olan boruhattı sistemlerine kapalı akış döngüsü denir. Borular genellikle yeryüzeyinin 4-7 Ft (1.22-2.13 metre) altına döşenir.

Gaz şirketleri tüketicilere doğal gazı değişik uzunlukta ve çapta boru hatları yoluyla iletirler. En büyük çaplı ve en uzun boruhatları uzak noktalara büyük miktarlarda gaz götüren taşıma hatlarıdır.

Taşıma hatları şehir merkezleri ya da endüstriyel tüketiciler gibi büyük ölçekli kullanıcılara doğal gaz iletir. Bu hatlar kararlı işlemlere göre tasarlanır. Ancak gaz tüketicileri kararlı durumda gaz kullanmazlar. Daha içrikli bilgi için birinci gelişme raporunun incelenmesi önerilebilir, (Rashidi, 1992).

Birçok boruhattı kararlı durumda akışa göre tasarlanır. Kararlı akıştaki tüm değişkenler konunun yani 'x' in fonksiyonudurlar ve zamana bağlı değişmezler. Bütün gerçek durumlarda bu akış şekli seyrek olarak geçerlidir ve aslında gaz akışı kararlı ya da 'tranzient' olarak isimlendirilir. Bundan ötürü gaz taşıma sistemlerinde akış genellikle kararsızdır ve bu durum birincil olarak talepteki değişimlerden ötürü olur. Kararsız akış, tüketim noktasındaki akış hızı,

hattın gaz girişi noktasındaki besleme debisinden farklılaştığı anda oluşur. Hattaki akışkan eğer sıkıştırılamaz özellikte ise (sıvıların büyük çoğunluğu bu özelliktedir) debideki bu değişim anında boruhatlı boyunca ulaştırılır ve sonunda giriş ve çıkış noktalarını da içermek üzere her yerde debi aynı değere ulaşır. Yüksek oranda sıkıştırılabilir olan gaz içinse basınç değişimlerinin hattın bir ucundan diğer ucuna ulaşabilmesi belirli bir süre alır. Kararlı akış varsayımı böyle sistemlerde yukarıdaki nedenden ötürü geçerliliğini yitirir. Boruhatlı mühendisliğinde akışın kararsız olduğu pekçok durum sözkonusudur:

- * Sistemdeki Mekanik Bozukluklar
- * Akışa Kapatma ve Temizleme
- * Kapanan Bir Vanada Basınç Dalgalanmaları
- * Değişken Tüketici Talebi
- * Basınç Testi

2. İŞLEMİN MODELLENMESİ

2.a. Boruhatlarında Kararsız (Tranzient) Akış

Akış, direnç ve basınç düşümüne ek olarak, eğer zamanın fonksiyonu ise kararsız olarak isimlendirilir. Taşıma sistemlerinde doğal gaz akışı genellikle talepteki değişimlerden ötürü kararsızdır.

2.b. Temel İlişkiler

Kararsız gaz akışı dört temel denklem kullanılarak tanımlanır, (Streeter-Wylie, 1970): Durum denklemi, sürekli

denklemini, hareket denklemini ve gazın ideal davranıştan farklılığını ortaya koyan ilişki. Uzun boruhatlarındaki akış için, doğal akışın genellikle izotermal olduğu, kararlı sürtünme ilişkisinin geçerliliği, ilgili borunun sabit eğimli olduğu ve basınç değişimlerinden dolayı boru çeperlerindeki genişlemenin önemsiz olduğu varsayılır.

Kullanılan en basit durum denklemini:

$$\frac{P}{\rho} = \frac{ZRT}{M} \quad (1)$$

Burada, gazın ideal durumdan sapmasını ölçen, sıcaklık ve gaz kompozisyonunun fonksiyonu olan sıkıştırılabilirlik faktörü, Z çeşitli yollardan verilebilir. İzotermal ve sabit kompozisyon varsayımı kullanılarak bu ilişki aşağıdaki formu alır:

$$Z = f(P)_{T,x}$$

Z-faktörünün fonksiyonel bağımlılığını göstermek için çeşitli ilişkiler vardır. Ancak pratikte ortalama bir Z değeri alınır, böylece denklem sayısı üçe iner. (1) numaralı denklem böylece:

$$\frac{P}{\rho} = \frac{ZRT}{M} = \frac{B^2}{g_c} \quad (3)$$

ya da,

$$\rho = \frac{g_c}{B^2} P \quad (4)$$

halini alır. Burada B izotermal ses hızıdır.

Süreklilik denklemini aşağıdaki gibi yazılır:

$$\frac{\partial m}{\partial x} + \frac{\partial(\rho A)}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

Denklem (4) deki gaz yoğunluğu bağıntısı yerine konursa:

$$\frac{B^2}{Ag_c} \frac{\partial m}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

Hareket denklemini ise şu şekilde yazılır:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{P}{g_c} \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} \right] + \frac{Pg}{g_c} \sin \alpha + \frac{f|u|P}{2dg_c} = 0 \quad (7)$$

Yukarıdaki son denkleme her terimin biriminin lb/ouft olduğuna dikkat edilmelidir. Sırttme terimindeki mutlak değer işareti akışın yönünü göz önüne almak için kullanılır.

Eğer A, borunun kesit alanı ise, akış hızı, v ile kütle

akış debisi, m arasındaki ilişki aşağıdaki gibi verilebilir:

$$u = \frac{m}{Ap}$$

Denklemler (4) deki yoğunluk tanımı yerine konursa:

$$u = \frac{mB^2}{APg_c} \quad (8)$$

(4) ve (8) hareket denkleminde yerine konursa:

$$\frac{\partial P}{\partial x} \frac{P}{m^2 B^2} \frac{\partial P}{\partial P} - \frac{P}{m} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{Ag_c AP^2 g_c}{\partial x} \frac{Ag_c P^2}{\partial t} + \frac{PmB^2}{Ag_c AP^2 g_c} \frac{\partial m}{\partial x} + \frac{P}{Ag_c} \frac{1}{P} \frac{\partial m}{\partial t} + \frac{Pg}{B^2} \sin \alpha + \frac{f|m|B^2}{2dA^2 g_c^2 P} = 0 \quad (9)$$

Zamana bağlı basınç türevi süreklilik denkleminde geliştirilip

son ilişkide yerine konup yeniden düzenleme yapılırsa:

$$\left[1 - \frac{m^2 B^2}{A^2 P^2 g_c^2} \right] \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{2mB^2}{A^2 P g_c^2} \frac{\partial m}{\partial x} + \frac{1}{Ag_c} \frac{\partial m}{\partial t} + \frac{Pg}{B^2} \sin \alpha + \frac{f|m|B^2}{2dA^2 g_c^2 P} = 0 \quad (10)$$

Yukarıdaki denkleme basıncın konum türevinin katsayısındaki ikinci terim 1 değeri ile karşılaştırıldığında gözardı edilebilir, (Osiaadacz, 1983). Ayrıca kütle akış debisinin konuma göre türevi diğer terimlerle karşılaştırıldığında önemsizdir, (Kumar, 1987). Bu

sadeleşmelerden sonra kararsız gaz akışı için hareket denklemi:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial P^2}{\partial x} + \frac{P}{Ag_c} \frac{\partial m}{\partial t} + \frac{P^2 g}{B^2} \sin \alpha + \frac{f|m|B^2}{2dA^2 g_c^2} = 0 \quad (11.a)$$

halini ya da aşağıdaki şekli alır:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{Ag_c} \frac{\partial m}{\partial t} + \frac{Pg}{B^2} \sin \alpha + \frac{f|m||B^2}{2dA^2 g_c^2 P} = 0 \quad (11.b)$$

Kararsız gaz akışını tanımlayan (6) ve (11) inci denklemler ikili-doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklem sistemini oluşturur, **(NL-PDE)**.

Bu denklem çiftinin analitik çözümü bugüne kadar olanaklı olamamıştır, (Ikoku, 1984) bu yüzden sayısal çözümler gereklidir. Temelde sözkonusu olan denklem sisteminin çözümü için literatürde rastlanan üç yöntem vardır: a) Sonlu Farklar Yöntemi, b) Karakteristikler Yöntemi, c) Değişimler Yöntemi. Tüm bu yöntemler sırayla her yeni zaman basamağında bir defada çözüm üretirler. Gereken parametreler yani basınç ve debi değerleri boruhatlı boyunca değişik noktalarda (n+1) zaman düzeyinde bir önceki (n) düzeyindeki bilinen dağılımları kullanılarak hesaplanır ve ileriki basamağa atlanır.

Bu projede sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Çözüm aşamasında sayısal yöntemler kullanılırken ve benzetim paketleri fiziksel olayların modellenmesinde geliştirilirken aşağıdaki ayrıntıların gözönünde tutulması gerekir:

Bir benzetim paketi çalışabilir ve birtakım sonuçlar üretilebilir ancak varılan sonuçlar doğru olmayabilir ve/veya genel kullanıma uygun düşmeyebilir. Daha ayrıntılı bilgi için ikinci gelişme raporunun incelenmesi önerilebilir, (Rashidi, 1992). Bu nedenle bir karşılaştırma ve kontrol mekanizması bu tür yazılımlar için çok gereklidir. Bu sorunu çözmek için iki bağımsız paket programın geliştirilmesi öngörülmüş ve farklı sayısal teknikler kullanılarak yazılımları gerçekleştirilmiştir. Amaca uygun olarak bu iki paket birbirine

paralel çalıştırılacak ve böylece sonuçların hassaslık ve doğruluk karşılaştırması yapılabilecektir. Aşağıdaki bölümler benzetim programları **TRANFLOW** ve **PIPESIM** 'in gelişimini anlatmaktadır.

2.c. Benzetim Paketi TRANFLOW

TRANFLOW değişik sınır durumlarında doğal gaz akışının kararsız davranışını modelleyen genel amaçlı bir benzetim programıdır.

Yapısı Streeter-Wylie yöntemine göre kurulmuştur, (Streeter-Wylie, 1970). Ancak üçüncü gelişme raporunda da belirtildiği gibi (Rashidi, 1993), yöntemin stabilite sorunlarını ortaya çıkaran basınç ve/veya debi davranışlarındaki dalgalanmalar birtakım test örneklerinde uygulanmıştır. Bu nedenle yazarların yaklaşımı yeniden gözden geçirilmiş ve aşağıdaki yöntem geliştirilmiştir:

Bu bölümün başında da gösterildiği gibi, doğal gazın uzun boruhatlarındaki kararsız akışının matematiksel tanımlanması iki doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklem sistemi ile

yapılabilir:

$$\frac{B^2}{A g_c} \frac{\partial m}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} = 0$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial P^2}{\partial x} + \frac{P}{A g_c} \frac{\partial m}{\partial t} + \frac{P^2 g}{B^2} \sin \alpha + \frac{f m |m| B^2}{2 d A^2 g_c^2} = 0$$

Kısmi türevler ve bağımlı değişkenler için aşağıdaki

yaklaşım teknikleri kullanılmıştır:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{P^{n+1} + P_{i+1}^{n+1} - P_i^n - P_{i+1}^n}{\Delta t} \quad (12)$$

$$\frac{\partial P^2}{\partial x} = \frac{(P_{i+1}^{n+1})^2 - (P_i^{n+1})^2}{\Delta x} \quad (13)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{m_i^{n+1} + m_{i+1}^{n+1} - m_i^n - m_{i+1}^n}{2\Delta t} \quad (14)$$

$$\frac{\partial m}{\partial x} = \frac{m_{i+1}^{n+1} - m_i^{n+1}}{\Delta x} \quad (15)$$

$$P = \frac{P_i^{n+1} + P_{i+1}^{n+1}}{2} \quad (16)$$

$$m = \frac{m_i^{n+1} + m_{i+1}^{n+1}}{2} \quad (17)$$

Bu açılımlar süreklilik ve hareket denklemlerinde (6 ve

11.a) yerlerine konursa, matematiksel problem aşağıdaki

cebirsel formu alır:

$$C_i = \frac{B^2}{Ag_c \Delta x} (m_{i+1}^{n+1} - m_i^{n+1}) + \frac{1}{2\Delta t} (P_i^{n+1} + P_{i+1}^{n+1} - P_i^n - P_{i+1}^n) = 0 \quad (18)$$

$$M_i = \frac{1}{2\Delta x} \left[(P_{i+1}^{n+1})^2 - (P_i^{n+1})^2 \right] + \frac{1}{4Ag_c \Delta t} (P_{i+1}^{n+1} + P_i^{n+1}) (m_{i+1}^{n+1} + m_i^{n+1} - m_{i+1}^n - m_i^n) + \frac{g \sin \alpha}{4B^2} (P_{i+1}^{n+1} + P_i^{n+1})^2 + \frac{\beta B^2}{8dA^2 g_c^2} (m_{i+1}^{n+1} + m_i^{n+1}) |m_{i+1}^{n+1} + m_i^{n+1}| = 0 \quad (19)$$

Bu denklemler herbir nokta-blok için birarada çözülüp bilinmeyen parametreler P_i^{n+1} , P_{i+1}^{n+1} , m_i^{n+1} , ve m_{i+1}^{n+1} yeni zaman düzeyinde bir kerede hesaplanmalıdır. Eğer boruhatlı 'm' tane özdeş bloka ayrılırsa, sistemdeki denklemler $(2m+2) * (2m+2)$ boyutunda bir katsayı matrisi oluşturur. Başka bir deyişle, toplam denklem sayısı ve bilinmeyen sayısı $(2m+2)$ olur. Denklemler seti iki tane sınır koşulunu da içerir. Böylece sözkonusu sınır koşulları matristen çıkarıldığı zaman yeni boyut $(2m) * (2m)$ olur.

Parçalanmış hareket denklemindeki doğrusal olmayan terimler nedeniyle bir dögümlü tekiğe gereksinim vardır. İlk çalışmada (Wylie-Streeter, 1970) ve bu projede Newton-Raphson dögümlü

yöntemi uygulanmıştır. Buna göre ardışık iki deneme dönüşünde ortaya çıkan bağıntı aşağıdaki ilkeye dayanır:

$$X_{new} = X_{old} + \Delta Y \quad (20)$$

Delta değerleri her boru blok-noktasında denklem setini gözerek hesaplanır.

$$\frac{\partial C_i}{\partial m_i^{n+1}} \Delta m_i^{n+1} + \frac{\partial C_i}{\partial P_i^{n+1}} \Delta P_i^{n+1} + \frac{\partial C_i}{\partial m_{i+1}^{n+1}} \Delta m_{i+1}^{n+1} + \frac{\partial C_i}{\partial P_{i+1}^{n+1}} \Delta P_{i+1}^{n+1} = -C_i \quad (21)$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial m_i^{n+1}} \Delta m_i^{n+1} + \frac{\partial M_i}{\partial P_i^{n+1}} \Delta P_i^{n+1} + \frac{\partial M_i}{\partial m_{i+1}^{n+1}} \Delta m_{i+1}^{n+1} + \frac{\partial M_i}{\partial P_{i+1}^{n+1}} \Delta P_{i+1}^{n+1} = -M_i \quad (22)$$

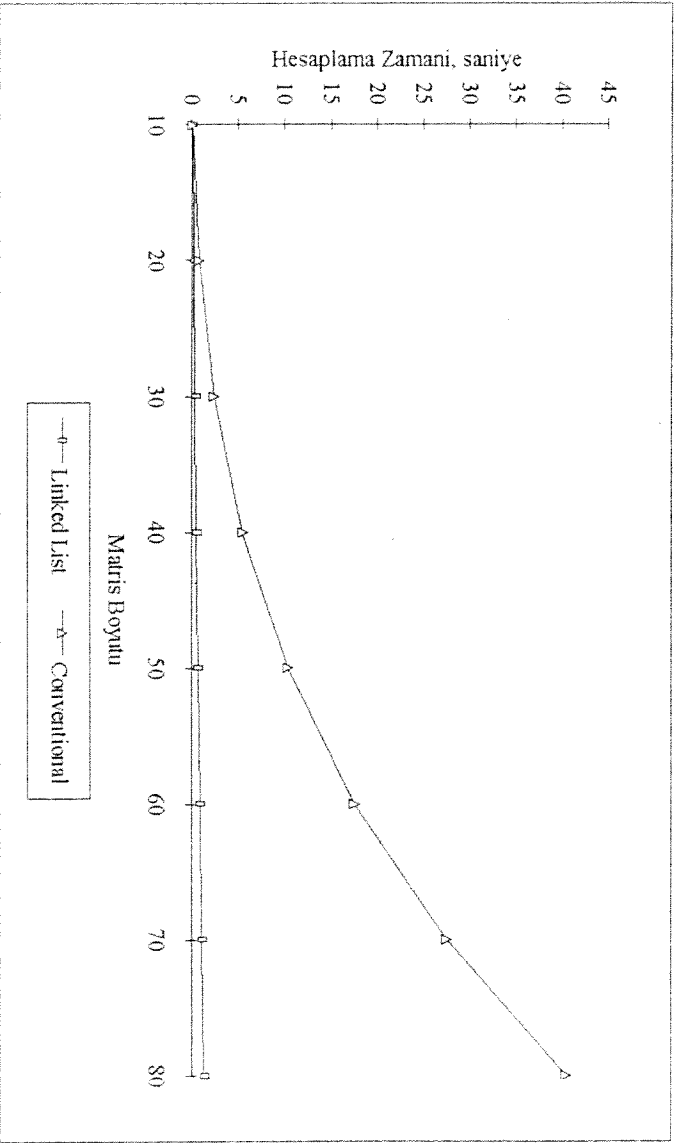
Görüldüğü gibi doğrusal olmayan ve bilinmeyen basınç ve debi terimlerini içeren ortak denklemlerin ilk hali, doğrusal olan ve delta değerlerini bilinmeyen olarak ortaya çıkaran cebirsel denklemlere dönüşmektedir. Örneğin, giriş basıncını ve çıkış debisini sınır koşulu olarak alan, 4 nokta-bloğuna ayrılmış bir sistemde (boruhattında) katsayı matrisi aşağıdaki gibi olur:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial m_1} & \frac{\partial C_1}{\partial M_1} & \frac{\partial C_1}{\partial m_2} & \frac{\partial C_1}{\partial M_2} & \frac{\partial C_1}{\partial P_2} & \frac{\partial C_1}{\partial M_1} & \frac{\partial C_1}{\partial P_2} & \frac{\partial C_1}{\partial M_2} & \frac{\partial C_1}{\partial m_3} & \frac{\partial C_1}{\partial M_3} & \frac{\partial C_1}{\partial P_3} & \frac{\partial C_1}{\partial M_3} & \frac{\partial C_1}{\partial m_4} & \frac{\partial C_1}{\partial M_4} & \frac{\partial C_1}{\partial P_4} & \frac{\partial C_1}{\partial M_4} \\ \frac{\partial C_2}{\partial m_2} & \frac{\partial C_2}{\partial M_2} & \frac{\partial C_2}{\partial m_3} & \frac{\partial C_2}{\partial M_3} & \frac{\partial C_2}{\partial P_3} & \frac{\partial C_2}{\partial M_3} & \frac{\partial C_2}{\partial m_4} & \frac{\partial C_2}{\partial M_4} & \frac{\partial C_2}{\partial P_4} & \frac{\partial C_2}{\partial M_4} & \frac{\partial C_2}{\partial P_4} & \frac{\partial C_2}{\partial M_4} & \frac{\partial C_2}{\partial P_4} & \frac{\partial C_2}{\partial M_4} & \frac{\partial C_2}{\partial P_4} & \frac{\partial C_2}{\partial M_4} \\ \frac{\partial C_3}{\partial m_3} & \frac{\partial C_3}{\partial M_3} & \frac{\partial C_3}{\partial m_4} & \frac{\partial C_3}{\partial M_4} & \frac{\partial C_3}{\partial P_4} & \frac{\partial C_3}{\partial M_4} & \frac{\partial C_3}{\partial P_4} & \frac{\partial C_3}{\partial M_4} & \frac{\partial C_3}{\partial P_4} & \frac{\partial C_3}{\partial M_4} & \frac{\partial C_3}{\partial P_4} & \frac{\partial C_3}{\partial M_4} & \frac{\partial C_3}{\partial P_4} & \frac{\partial C_3}{\partial M_4} & \frac{\partial C_3}{\partial P_4} & \frac{\partial C_3}{\partial M_4} \\ \frac{\partial C_4}{\partial m_4} & \frac{\partial C_4}{\partial M_4} & \frac{\partial C_4}{\partial P_4} & \frac{\partial C_4}{\partial M_4} & \frac{\partial C_4}{\partial P_4} & \frac{\partial C_4}{\partial M_4} & \frac{\partial C_4}{\partial P_4} & \frac{\partial C_4}{\partial M_4} & \frac{\partial C_4}{\partial P_4} & \frac{\partial C_4}{\partial M_4} & \frac{\partial C_4}{\partial P_4} & \frac{\partial C_4}{\partial M_4} & \frac{\partial C_4}{\partial P_4} & \frac{\partial C_4}{\partial M_4} & \frac{\partial C_4}{\partial P_4} & \frac{\partial C_4}{\partial M_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_2 \\ \Delta P_2 \\ \Delta m_3 \\ \Delta P_3 \\ \Delta m_4 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} C_1 \\ M_1 \\ C_2 \\ M_2 \\ C_3 \\ M_3 \\ C_4 \\ M_4 \end{bmatrix}$$

Şekil 1.1 - Verilen Problem için Katsayı Matrisi

Bu denklem setini çözebilmek için değişik yöntemler vardır. Bu projede katsayı matrisinin seyrek yapısını çözümlenebilmek için bir 'Spars-Matris' çözücü geliştirilmiştir. Bağlaşık listeleme (Linked List Implementation) tekniği kullanılarak hafıza tasarrufu, eliminasyon ve yerleştirme işlemlerinde başarıyla sağlanmıştır. 'L-U' ayrıştırma yöntemi ile listeleme tekniği birlikte uygulanmıştır. Bağlaşık listelerle ilgili ayrıntılı bilgi başka kaynaklardan edinilebilir, (Rashidi, 1993).

Bu yöntem hesaplama zamanında ve depolama gereksinimlerinde indirim sağlamaktadır. Alışlagelmiş yöntem ile bu yeni yaklaşımın hesaplama zamanına göre karşılaştırılması Tablo 1'de verilmiştir. Görüldüğü gibi her dönemde gerekli matris çözümü süresi önemli oranda yeni teknik kullanılarak düşürülmektedir.



Şekil 1.2. - İki Matris Çözücüsünün Karşılaştırılması

Dikkat edilirse bu karşılaştırma beş bant-köşegenli matris çözümü (genel yapısı şekil 1' de verilmektedir) temel alınarak yapılmıştır. Çalışma AT-286 (hız 12 Mhz) IBM uyumlu kişisel bilgisayarda yürütülmüştür. Bu çalışmada programlama dili FORTRAN olarak seçilmiş ve yazılımın derlenmesi WATFOR-77 ortamında gerçekleştirilmiştir. Tablo 1 karşılaştırma sonuçlarını özetlemektedir.

Matris Boyutu	Bağlaşık Listeleme Yöntemi	Klasik Yaklaşım
10	0.10	0.1
20	0.23	0.8
30	0.38	2.4
40	0.54	5.5
50	0.71	10.4
60	0.89	17.6
70	1.08	27.5
80	1.28	40.5

Tablo 1 - İki çözücü için Hesaplama Zamanları

Matris boyutu arttıkça bağlaşık listeleme tekniğinin üstünlüğü daha iyi ortaya çıkmaktadır. Bilindiği gibi büyük boyutlu matris işlemleri uzun taşıma boruhatlarının benzetimi için oldukça sık karşılaşılan bir durumdur. Geliştirilen program aynı zamanda birden fazla bölüm içeren (herbiri kendi çapına, uzunluğuna, eğimine ve sürtünme faktörüne sahip) sistemleri de çözebilmektedir. Dört değişik sınır durumu tipi

İlgili veri dosyasının yeniden derlenmesi ile kolayca uyarlanabilmektedir. Birinci tip sınır koşulları giriş basıncı ve çıkış debisi olarak daha önce senaryolaştırılan bir arz-talep akış hızı sözkonusudur. Son grupta ise bir önceki senaryodaki debi değişkenin yerini gaz basıncı almaktadır. Sınır koşullarının özeti Tablo 2' de verilmiştir.

Sınır Türü	Basıncı		Debi	
	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış
1	✓	?	?	✓
2	?	✓	✓	?
3	?	?	✓	✓
4	✓	✓	?	?

Tablo 2 - Sınır Durumları Tipleri

(✓:Belirtilmiş SD, ?:Bilinmeyen SD)

2.d. Benzetim Paketi PIPESIM

PIPESIM bu proje bütününde gerçekleştirilmiş olan ve yeni bir sayısal yaklaşıma tekniğine dayalı olarak yaratılmış bir benzetim yazılımıdır. Ayrıntılı bilgi için üçüncü gelişme raporu incelenebilir, (Rashidi, 1993).

Denklemler sistemini (6 ve 11) cebirsel ifadelere çevirmeden önce sürtünme gurubundaki tek doğrusal olmayan terimler topluluğu olan $m\cdot m/p$ gurubunu incelemek ilginç olacaktır. Bunu gözönüne alarak bu gurubu doğrusal hale getirmek model sistemi de doğrusal yapacaktır. Bu amaca ulaşmak için $m\cdot m/p$ terimi $m\cdot m/p$ şekline çevirilmiştir; burada m ve p değerleri yeni

zaman düzeyindeki bilinmeyen parametreler olmalarına rağmen bir önceki döngü değerleri olarak ele alınmışlar ve böylece bilinen sabitler haline gelmişlerdir.

Ancak matematiksel modeli doğrusal hale getiren bu yaklaşırma tekniğini uygulamadan önce çok bilinen Wylie-Streetter, farklar yöntemine kısaca değinmek gereklidir, (Wylie-Streetter, 1970). Alışılagelmiş yöntemlerde 6 ve 11 numaralı denklemler ortalı farklar tekniği ile parçalanmakta ve böylece kısmi türevlerin zamana göre ve konuma göre ortalamaları alınmaktadır:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{P_{i,11}^{n+1} + P_{i,11}^n - P_{i,1}^{n+1} - P_{i,1}^n}{2\Delta x} \quad (23)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{P_{i,11}^{n+1} + P_{i,11}^n - P_{i,11}^n - P_{i,11}^n}{2\Delta t} \quad (24)$$

Benzer denklemler kütle akış hızı için de yazılabilir. Bu yaklaşım, problemi doğrusal olmayan bir cebirsel denklem setini gözme işleminde dönüştürmektedir. Bu seti çözmek için verimli bir algoritmaya gereksinim vardır ve Wylie-Streetter, Newton-Raphson döngü yöntemini önermektedir, (Wylie-Streetter, 1970). Ancak katsayı matrisinin boyutu ve hesaplama zamanı gözönüne alındığında bu çözüm tekniğinin iki önemli engeli olduğu daha önce belirtilmiştir.

Bu çalışmada 6 v 11 numaralı denklemler ortalı sonlu farklar kullanılarak açılmış ve zamana bağlı türevlerin yaklaştırmasında geriye yönelik farklar ortalama alınmadan kullanılmıştır. Son şekil aşağıdaki gibidir:

$$\frac{B^2}{Ag_c \Delta x} \frac{m_{i,11}^{n+1} - m_{i,11}^n}{2\Delta x} + \frac{P_{i,11}^{n+1} - P_{i,11}^n}{\Delta t} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{P_{i,11}^{n+1} - P_{i,11}^n}{2\Delta x} + \frac{1}{Ag_c} \frac{m_{i,11}^{n+1} - m_{i,11}^n}{\Delta t} + \frac{P_{i,11}^{n+1} g}{B^2} \sin \alpha + \frac{fB^2 [m_{i,11}^{n+1}]^* [m_{i,11}^{n+1}]}{2dA^2 g_c^2 [P_{i,11}^{n+1}]^*} = 0 \quad (26)$$

Bir önceki zaman düzeyindeki m^* ve P^* değerleri kullanılarak yukarıda söylendiği gibi 21 numaralı denklem doğrusallaştırılmıştır. Bu yaklaşım, problemi bir doğrusal denklemler sistemini çözmeye işlemine dönüştürmektedir ki bu iş hem uygulamada kolay ve hızlı hem de ekonomiktir. Çözüm algoritması şöyle özetlenebilir: Kararlı akışdaki bağımlı değişkenlerin ilk değerleri (m ve P) -Weymouth denklemlerinden hesaplanmaktadır- yeni zaman düzeyi için tüm noktalarda başlangıç değerleri olarak kullanılırlar. 22 ve 23 numaralı denklemler bu ilk değerler uygulandıktan sonra Gauss yoketme yöntemi ile birarada çözülürler. Çözüm aşağıdaki kriterlere ulaşıldığında elde edilir:

$$P_j^* = P_j \quad \text{if} \quad |P_j^* - P_j| < \xi_1$$
$$m_i^* = m_i \quad \text{if} \quad |m_i^* - m_i| < \xi_2$$

Burada epsilon değerleri daha önceden tanımlanan toleranslardır. Bu yöntem Newton-Raphson' a göre temelde daha verimli ve daha hızlıdır, çünkü türev hesaplamalarına gerek kalmamıştır.

Sayısal yöntem için TURBO PASCAL dilinde bir yazılım gerçekleştirilmiştir. Matematiksel işlemcili bir IBM AT kişisel bilgisayarda geliştirilen bu paket çalıştırılıp test edilmiştir. Yazılım standart Gauss yoketme tekniğini kısmi pivotlama yöntemi ile beraber kullanmaktadır. Tekniğin kararlılığını garanti altına almak için değişken bir zaman-basamak boyutu seçim algoritması kullanılmıştır. Bunu sağlamak içinse ilk olarak gelişigüzel seçilmiş bir boyut ilk hesaplamalarda kullanılmıştır. Katsayı matrisinin en büyük 'eigen' değeri 'Kuvvet yöntemi' ile bulunmuştur. Bu yöntemde belirleyici eigen

değeri 'Aitken Karesel Delta İvmelenme' tekniğı ile bulunmaktadır. Bu belirleyici değerin mutlak değeri eğer 1 sayısından büyükse, zaman-basamak boyutu bir yavaşlatma faktörü olan 'w' (w bu çalışmada 0.9 olarak seçilmiştir) ile çarpılmakta ve böylece yeni boyut bulunmaktadır. Alternatif olarak mutlak değer 1 sayısından küçükse zaman boyutu hızlandırma faktörü 'w1' (bu çalışmada w1=1.2) ile çarpılıp büyütülmektedir. Anlatılan bu yöntem optimum bir zaman boyutu bulunana kadar sürdürülmektedir. bu teknik sadece optimum zaman basamağını vermekle kalmayıp aynı zamanda da kararlılığı garanti altına almaktadır.

2.e. Benzetim Paketi 'TRNONISO'

Daha önce anlatılan iki yazılımın enerjiye bağlı ya da diğer bir deyişle sıcaklığa bağlı problemlerin çözümünde önemli bir yetersizliği vardır. Örneğin, sistemde sıcaklığa bağlı akış özellikleri sabit alınsa bile (ses hızı, ağdalılık, sürtünme faktörü) basınç ve debide sıcaklık etkisini bu yaklaşımlarla görmek olası değildir. Gerçekte gündüz ve gece saatlerinde meydana gelen sıcaklık değişimleri pratik yaşamda sık sık gözlenmektedir. Bu nedenle programlar eğer izotermal olmayan değişimleri gözönüne alabiliyorlarsa daha gerçekçi olmaktadır.

Geliştirilen benzetim programı TRNONISO (Kararsız izotermal olmayan akış benzetimcisi-İngilizce- kısaltması), belirgin olarak süreklilik ve hareket denklemlerinin (6 ve 11) enerjinin korunumu yasasıyla birleştirilmesine dayanmaktadır. İlk ikisi

daha önce türetilmiştir. Burada enerjinin korunumu ilkesi anlatılmaktadır.

Termodinamiğin birinci yasasının hareket halindeki belirli miktarlardaki gaz kütlelerine uygulanması dikkatli yapılmalıdır. Birçok durumda kontrol hacime dayalı olarak hareket denkleminde olduğu gibi enerji yasasını yeniden formüle etmek daha basittir.

Başlangıç olarak herhangi bir akışkan kütleli küçük bir zaman dilimi olan dt boyutunda düşünülebilir. Bu zaman dilimi içinde akışkan kütleli ya da sistem çevreleyen akışkandan ısı alır ve yüzeyindeki kuvvetler nedeniyle çevresine iş yapar. Bu gerçek tam olarak enerjinin korunumu yasasını anlatır. Korunum ilkesi aşağıda anlatılmaktadır:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Kontrol hacmi} \\ \text{içinde enerjinin} \\ \text{birikim hızı} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Girislerde enerjinin} \\ \text{tasınma hızı} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Çıkışlarda enerjinin} \\ \text{tasınma hızı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Kontrol yüzeyi} \\ \text{boyunca giren} \\ \text{ısı akısı, } \dot{Q} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Kontrol yüzeyi} \\ \text{boyunca çıkan} \\ \text{net iş, } \dot{W} \end{array} \right\}$$

$$\text{ya da} \left\{ \begin{array}{l} \text{Kontrol hacmi} \\ \text{içinde enerjinin} \\ \text{birikim hızı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Disariya akimmlarla} \\ \text{olusan net} \\ \text{enerji tasınımı} \end{array} \right\} = \dot{Q} - \dot{W}$$

Sol yandaki birinci terim, kontrol-hacimdeki toplam iç-enerji değişiminin hızıdır (toplam kütle ile birim kütle başına düşen iç enerjinin çarpımı), $d(m\gamma U)_{cv}/dt$. Her akan gaz kütleli ile beraber, üç enerji formu düşünülür: İç-enerji, akış hızı, u' ya bağlı olarak kinetik enerji ve bir referans düzeye göre alınan z yüksekliğine bağlı olarak konum enerjisi. Birim kütleyle göre yazıldığında, gaz kütlelerinin toplam enerjisi:

$$U + \frac{u^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} z$$

ve enerji transfer hızı:

$$\left(U + \frac{u^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} z \right) m$$

Böylece enerji korunumu denklemi:

$$\frac{d(m_T U)}{dt} + \Delta \left[\left(U + \frac{u^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} z \right) m \right] = \dot{Q} - \dot{W} \quad (27)$$

olur. Burada "cv" ve "fs" kısaltmaları kontrol-hacimi ve akışkan kütleli simgelenmektedir.

Güç ya da iş hızı terimi \dot{W} iki parçayı içermektedir. İlki 'Şaft' işi hızı, \dot{W}_s dir. Daha az bilinen diğer bölümü ise giriş ya da çıkış noktasında akan gaz kütleleri ile ilişkin olan iş miktarıdır. Bu noktalarda akışkanın ortalama P, V, U, H gibi özelliklere sahip olduğu kabul edilir. Giriş ya da çıkış bölgesine çok yakın olan birim kütleli akışkanın bu homojen özelliklere sahip olduğu düşünülebilir. Bu birim kütle ikinci bir kütle tarafından kontrol-hacime doğru ötelenir ve sabit basınç, P ile hareket eden bir piston gibi davranır. Pistonun birim kütleli kontrol-hacme iterken yaptığı işi PV , işin hızı ise $(PV)m$ ile gösterilir. Kontrol-hacimde yapılan net iş ise Δ

$[(PV)m]_{fs}$ dir. Böylece:

$$\dot{W} = \dot{W}_s + \Delta[(PV)m]_{fs} \quad (28)$$

Bir önceki denklem ile birleştirilirse:

$$\frac{d(m_T U)}{dt} + \Delta \left[\left(U + PV + \frac{u^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} z \right) m \right] = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (29)$$

Tanım gereği $U+PV=H$ olduğundan, denklemin sıkça rastlanan

şekli:

$$\frac{d(m_T U)}{dt} + \Delta \left[\left(H + \frac{u^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} z \right) m \right] = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (30)$$

U yerine H kullanıldığında, hesaplama yönünden daha

elverişli olan aşağıdaki form elde edilir:

$$\frac{d(m_T(H - PV))}{dt} + \Delta \left[\left(H + \frac{u^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} z \right) m \right]_f = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (31)$$

$\rho = m_T/V$ and $\rho = 1/V$ tanımları kullanıldığında:

$$\frac{d(\rho V(H - P/\rho))}{dt} + \Delta \left[\left(H + \frac{u^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} z \right) m \right]_f = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (32)$$

ya da

$$V \frac{d(\rho H)}{dt} - V \frac{dP}{dt} + \Delta \left[\left(H + \frac{u^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} z \right) m \right]_f = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (33)$$

Denklem 4 son denkleme yerine konursa:

$$V \frac{g_c}{B^2} \frac{d(PH)}{dt} - V \frac{dP}{dt} + \Delta \left[\left(H + \frac{u^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} z \right) m \right]_f = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (34)$$

Borudaki akışlarda, şaft-iş akışkan açısından sözkonusu değildir. \dot{Q} terimi ısı akış hızıdır ve $m\dot{Q}$ ile verilir, burada \dot{Q} birim küttele ısı akışıdır. Eğer entalpiler ve ısı akışları 'Btu' türünden, basınçlar da lb_f/ft² birimi ile yazılırsa bir çevirim faktörü olan J kullanılmalıdır-778 ft-lb_f/Btu. Bu bilgileri değerlendirerek ve 34 numaralı denklemden ilk diferansiyel terimi açarak:

$$V \frac{g_c}{B^2} \left[P \frac{dH}{dt} + H \frac{dP}{dt} \right] - \frac{V}{J} \frac{dP}{dt} + \Delta \left[\left(H + \frac{u^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} z \right) m \right]_f = m\dot{Q} \quad (35)$$

Bu son denklem termodinamikte bir akış işlemi için genellikle yazılan enerji dengesi denklemdir. Türetimindeki ideal koşullar ve yaklaşık hesaplamalardan dolayı birtakım sınırlamaları vardır. Özetlenirse:

— İki ardışık kontrol-hacim arasındaki bir kesit alanda akış tek yönlüdür.

— Aynı kesit alanda gazın termodinamik, kinetik ve dinamik özellikleri akış yönüne dik doğrultuda değişmemektedir. Bu

yuzden bu ozellikler ilgili kesit alanda tek bir ortalama deger alirlar.

— Konum ve kinetik enerji değişimleri kontrol-hacim içerisinde gozardı edilebilecek oranda küçük hızdadırlar. Bu aynı zamanda yükseklik terimi z' nin kontrol-hacmin kitle merkezinden ölçülmesi demektir.

Ancak mühendislik uygulamaları için 35 numaralı denklem yeterlidir. Gerçekten pekçok uygulamada hareket enerjisindeki değişim akan kitle için önemsizdir. Ne var ki bu terim modelin tam olması için tutulmuştur.

Isı transferi terimi Q' nun hesaplanması, teorik temelini

Fourier' in birinci yasasından alır:

$$Q = -\frac{U(\pi d_o \Delta L)}{m} (T_f - T_s) \quad (36)$$

35 numaralı denklemde Q borunun birim uzunluğundaki ısı kayıplarını göstermektedir. İşareti kabul edilmiş kurala göre (genel kural şu şekilde özetlenebilir, çevreden sisteme ısı akışında transfer teriminin işareti '+' pozitifdir) negatifdir. U terimi toplam ısı transfer katsayısını göstermektedir.

Toplam ısı transferi katsayısı borunun konumuna ve ısı transfer şekline bağlı olarak birçok katsayının birleşimi olabilir. Yüzezdaki boruhatları için, akan gaz ile boru çeperi arasında konvektif ısı kaybı; boru duvarı boyunca ve yalıtım malzemesi ya da kaplama malzemesi boyunca dokunma-ısı kaybı; ve çevreye doğru dokunma-ısı kayıpları sözkonusudur. Genel olarak toplam ısı aktarım (transfer) katsayısı tek tek ısı transfer dirençlerinin toplamının tersidir. Yaratılarda bir boruhatta düşünülürse:

$$U = \frac{1}{R_g + R_p + R_f} \quad (37)$$

burada

R_g = borudan yüzeye dokunma ile ısı aktarım direnci,

R_p = boru çeperi ve yalıtım malzemeleri boyunca dokunma ile ısı aktarımı direnci,

R_f = akışkan gaz kütleleri ile boru çeperi arasında taşıma (konvektif) ısı aktarımı direncidir.

Pratikte genellikle ortalama bir ısı aktarım katsayısı kullanılır.

Enerji denklemi (35) süreklilik ve hareket denklemleri birleştirilirken bu üçüncü denklem sonlu sayıda farklar kullanılarak açılması gerekir. Doğrusal forma getirilmiş şekli ile yeni enerji denklemi, E aşağıdaki şekli alır:

$$E_i = V \frac{g_c}{B^2} \left[\frac{P_{i+1}^{n+1} + P_i^{n+1}}{2} \frac{H_{i+1}^{n+1} + H_i^{n+1} - H_{i+1}^n - H_i^n}{2\Delta t} + \frac{H_{i+1}^{n+1} + H_i^{n+1}}{2} \frac{P_{i+1}^{n+1} + P_i^{n+1} - P_{i+1}^n - P_i^n}{2\Delta t} \right] - \frac{V}{J} \left[\frac{P_{i+1}^{n+1} + P_i^{n+1} - P_{i+1}^n - P_i^n}{2\Delta t} \right] + \left[\left(H_{i+1}^{n+1} + \frac{u_{i+1}^2}{2g_c J} + \frac{g}{g_c J} z_{i+1} \right) m_{i+1}^{n+1} - \left(H_i^{n+1} + \frac{u_i^2}{2g_c J} + \frac{g}{g_c J} z_i \right) m_i^{n+1} \right] - \left[\frac{m_{i+1}^{n+1} - m_i^{n+1}}{2} \right] Q_{i+1,0} \quad (38)$$

burada

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 \Delta x \quad (39)$$

$$Q_{i+1,0} = - \frac{2U(\pi d_o \Delta x)}{m_{i+1}^{n+1} + m_i^{n+1}} \left(\frac{T_{i+1}^{n+1} + T_i^{n+1}}{2} - T_s \right) \quad (40)$$

38 numaralı denklem 18 ve 19 numaralı denklemlerle ortak olarak her bir nokta için çözümlenlidir (bkz. 2.c) Ancak bu kez bilinmeyenler P_i^{n+1} , P_{i+1}^{n+1} , T_i^{n+1} , T_{i+1}^{n+1} , m_i^{n+1} , ve m_{i+1}^{n+1} parametreleridir.

Çözümün anılan hesaplama nokta-bloğunda iki yeni parametreyi (sıcaklıklar) daha ortaya çıkarması gerektiğine dikkat edilmelidir. Buna bağlı olarak, geliştirilen benzetim paketi bir önceki sürüm olan TRANFLOW programı esas alınarak izotermal olmayan durumda doğal gaz akışının modellenmesi için yazılmıştır. Tanımlayıcı denklemlerdeki (18,19 ve 38) doğrusal olmayan terimlerden dolayı bir dögü tekniği olan Newton-Raphson yöntemi kullanılmıştır. Daha önce söylendiği gibi denklem 20 ardışık iki deneme dögüsü içinde bilinmeyenlerin yeni değerlerini bulmak için kullanılmaktadır. Ancak izotermal olmayan hesaplamalar 21 ve 22 numaralı denklemlere sıcaklık türevlerinin eklenmesini gerektirmektedir. Delta değerleri yine her boru noktasında aşağıda yazılı olan denklem setini gözerek elde edilmektedir:

$$\frac{\partial C_i}{\partial m_i^{n+1}} \Delta m_i^{n+1} + \frac{\partial C_i}{\partial p_i^{n+1}} \Delta p_i^{n+1} + \frac{\partial C_i}{\partial T_i^{n+1}} \Delta T_i^{n+1} + \frac{\partial C_i}{\partial m_{i,11}^{n+1}} \Delta m_{i,11}^{n+1} + \frac{\partial C_i}{\partial p_{i,11}^{n+1}} \Delta p_{i,11}^{n+1} + \frac{\partial C_i}{\partial T_{i,11}^{n+1}} \Delta T_{i,11}^{n+1} = -C_i \quad (41)$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial m_i^{n+1}} \Delta m_i^{n+1} + \frac{\partial M_i}{\partial p_i^{n+1}} \Delta p_i^{n+1} + \frac{\partial M_i}{\partial T_i^{n+1}} \Delta T_i^{n+1} + \frac{\partial M_i}{\partial m_{i,11}^{n+1}} \Delta m_{i,11}^{n+1} + \frac{\partial M_i}{\partial p_{i,11}^{n+1}} \Delta p_{i,11}^{n+1} + \frac{\partial M_i}{\partial T_{i,11}^{n+1}} \Delta T_{i,11}^{n+1} = -M_i \quad (42)$$

$$\frac{\partial E_i}{\partial m_i^{n+1}} \Delta m_i^{n+1} + \frac{\partial E_i}{\partial p_i^{n+1}} \Delta p_i^{n+1} + \frac{\partial E_i}{\partial T_i^{n+1}} \Delta T_i^{n+1} + \frac{\partial E_i}{\partial m_{i,11}^{n+1}} \Delta m_{i,11}^{n+1} + \frac{\partial E_i}{\partial p_{i,11}^{n+1}} \Delta p_{i,11}^{n+1} + \frac{\partial E_i}{\partial T_{i,11}^{n+1}} \Delta T_{i,11}^{n+1} = -E_i \quad (43)$$

38 numaralı denklemde de görüldüğü gibi bu yöntemde, ilgili nokta entalpileri verilen sıcaklık ve basınçta hesaplanmalıdır. Bu işlemden PVT korelasyonları kullanılmaktadır. Çözüm tekniğini geliştirmek için ses hızı 3 numaralı denklem kullanılarak her blokta tahmin edilir. Bununla beraber sürtünme katsayısı Reynolds sayısına (ayrıca akamazlık-vizkosite-, yerçekimi ve

akış hızına da bağlıdır) ve göreceli pürüzlülüğe de bağlı olduğu düşünülerek, korelasyonlarla ilgili parametreler yardımıyla hesaplanabilir. Ayrıntılı bilgi için korelasyonlar Ek-A ile Ek-D arasında anlatılmıştır.

Ortaya çıkan doğrusal denklemleri çözmek için bağlantılı listeleme yöntemi uygulayan bir spars matris çözücüsü kullanılmış ve bu teknique bağlı olarak 'L-U ayrıştırma' metodu kullanılmıştır.

Pratiğe uygulanabilir çözümleri 6, 11 ve 35 numaralı denklemlere sağlayabilmek için başlangıç ve sınır koşulları öncelikle tanımlanmalıdır. Boruhattı boyunca başlangıç koşulu olarak ilk basınç, hız, yoğunluk ve sıkıştırılabilirlik gibi diğer özelliklerin konuma (x' e) bağlı olarak dağılımı gereklidir. Literatürde başlangıç koşulu olarak kararlı durum yoğunlukla kullanılmaktadır. Kararlı durum hesabı yapabilmek için model-denklemler yeniden gözden geçirilmelidir. Kararlı akışta zamana bağlı türevler 0 (sıfır) değerini alacağı için süreklilik ve hareket denklemleri ile enerji dengesi denklemini aşağıdaki basitleşmiş formları alırlar:

$$m = \frac{Ag_c}{B} \sqrt{\frac{(P_i^2 - e^s P_i^2) d}{\beta L_e}} \quad (44)$$

burada

$$s = \frac{2g\Delta z}{B^2} \quad (45)$$

$$L = \left(\frac{e^s - 1}{s} \right) L, \quad s \neq 0 \quad (46)$$

ve

$$H_{i,n} = H_i + Q_{i,n} \frac{g}{g_c} \Delta z - \frac{\Delta n^2}{2g_c} \quad (47)$$

44 numaralı denklem Δw uzunluğundaki boru parçasında çıkış basıncını hesaplamak için yeniden düzenlenebilir:

$$P_{i+1} = e^{-sL/2} \sqrt{P_i^2 - \left(\frac{mB}{Ag_c} \right)^2} \frac{f \Delta x^2}{d} \quad (42)$$

Döngülu bir yöntem, ikili akış denklemi (48) ve enerji dengesi denklemi (49) sisteminin içerdiği basınç ve sıcaklık değişimlerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Birçok durumda basınç değişimi göreceli olarak sıcaklık değişiminden etkilenmez. Bu yüzden model, enerji denklemini sağladıktan sonra basınç için yaklaşım kontrolü yapmaktadır. Bunu yapmak içinse 47 ve 48 numaralı denklemler Δw boru parçası için birleştirilir. Isı kayıpları Δw için entalpiyle verilir. Basınç kaybı temel olarak Δx tarafından kontrol edilir. Sonuçta basınç ve entalpi sıcaklık düzeyini belirler.

Aşağıdaki yöntem sırası döngülu olarak yaklaşımın nasıl sağlandığı vermektedir:

1. Uzunluk ve yüzey sıcaklığını gir.
2. Boru parçasının çıkış basıncını gir (deneme).
3. 48 numaralı denklemi kullanarak çıkış basıncını hesapla.
4. 40 numaralı denklemden yararlanarak ısı kaybını, 47 numaralı denklemi kullanarak $(i+1)$ noktasındaki H_{i+1} değerini hesapla.
5. $(i+1)$ noktasındaki P ve T değerlerini kullanarak H^* deneme değerini PVT korelasyonları yardımıyla bul.
6. Daha önceden tanımlanan tolerans değeri ile $\left| \frac{H_{i+1} - H^*}{H^*} \right|$ oranını kontrol et.
7. Yaklaşım yeterli değilse ikinci basamağa geri dön.

8. Yaklaşım sağlanmışsa yeni kontrol-hacime geç ve bu işlemi boruhattının sonuna kadar sürdür.

Bu algoritma sadece başlangıç koşullarını belirlemek için kullanılmaktadır. Konunun fonksiyonu şeklinde başlangıç özellikleri belirlendikten sonra, 41, 42 ve 43 numaralı denklemler bir bütün olarak, basınç, sıcaklık ve debi için delta değerleri bulunarak (sınır koşullarını da her yeni zaman düzeyinde işleme koyarak) ele alınırlar. Dönü delta değerleri verilen tolerans değerinden küçük kalana kadar devam ettirilir. Dönü yöntemi ardışık olarak her yeni zaman düzeyinde tekrar uygulanır. Kısaca, bir basamakta elde edilen benzetim değerleri diğer bir düzeydeki benzetim hesaplamaları için köprü görevi görmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Burada iki ayrı bölümde geliştirilen benzetim tekniklerinin sonuçları verilmektedir. Her bir bölümde, benzetim programları (TRANFLOW, PIPESIM ve TRNONISO) A' dan H' ye kadar çok çeşitli örnek problemlerde değişik boruhattı şekilleri için incelenmiştir.

3.a. İzotermal Benzetimler

Yukardaki bölümlerde açıklanan izotermal benzetimler bundan önceki (bkz üçüncü gelişme raporu - Rashidi, 1993) çalışmalarda Osadacz (Osadacz, 1983) ve Rachford (Rachford ve Dupont, 1974)' dan alınan örneklerle test edilmiştir. Geliştirilen sayısal yaklaşımların kararlılığını daha iyi kavrayabilmek için literatürdeki çok iyi bilinen makalelerden çeşitli farklı özellikte pekçok boruhattı üzerinde çalışılmıştır. Bundan sonraki bölümler anılan örnekleri açıklayıp incelemektedir.

Örnek A.

Birinci örnekte Eskişehir ile Ankara arasındaki taşıma hattı BOYAŞ' tan alınan 24 saatlik akış verileri yardımıyla benzetilmiştir. Ulaşılabilen boruhattı özellikleri şunlardır:

Uzunluk = 191.5 km

Çap = 24 inç

Ankara' nın yüksekliği = 894 m

Eskişehir' in yüksekliği = 800 m

Ankara ucundaki basınç davranışı her iki benzetimci tarafından da modellenmiştir. Sonuçlar şekil 1.a ve şekil 1.b'

de gösterilmektedir. Benzetimcilerin sonuçları arasındaki küçük farklar BOTVAŞ' tan elde edilen verilerin tam ve kesin olmayışından dolayıdır (örneğin sürtünme katsayısı elde edilemediği için hesaplamalarda 0.015 olarak alınmıştır ki bu değer gerçekçi olmadığı zaman çok hatalı sonuçlar elde edilebilmektedir.

Örnek B.

Bu örnekte Stoner' ın bir çalışmasından alınan boruhattı sistemi incelenmiştir (Stoner, 1968). 42.7 MMcf/gün taşıma debisine sahip bir boruhattı giriş ve çıkış noktalarında aynı anda ve birden bire akışa kapatılmaktadır. 240 saniyelik bir zaman dilimi içerisinde her iki uçta basınç davranışı istenmektedir. EK veri aşağıdadır::

Uzunluk = 13.73 mi1

Çap = 12.25 inç

İlk giriş basıncı = 420 psi

Benzetimcilerin sonuçları şekil 2.a, 2.b, 2.c, ve 2.d' de verilmektedir.

Örnek C.

Sıradaki örnek yine Stoner' ın aynı çalışmasından alınmıştır. Kararlı akış durumundaki bir boruhattı birden bire tranzient akış fazlarının etkisinde kalmaktadır. Giriş basıncı ve çıkış debisi zamanla dalgalandırılmakta ve bir süre sonra tekrar kararlı bir düzeyde tutulmaya devam edilmektedir. Bu dalgalanma süresince giriş akışı ve çıkış basıncı davranışı sunulmaktadır. EK veri aşağıdadır:

Uzunluk = 15.95 mil
Çap = 19.5 inç
Sıcaklık = 70 F
Ses hızı = 1270 ft/saniye
Gazın molekül ağırlığı = 20.3 lb/mol
İlk giriş basıncı = 660 psi
Benzetilmcilerin sonuçları 3.a, 3.b, 3.c, ve 3.d' de
verilmektedir.

Örnek D.

Yeni örnek Wylie ve Streeter' in çalışmasından alınmıştır
(1970): 50 Mcf/gün debiye sahip bir taşıma hattı, zamanın
sürekli ve düzgün fonksiyonu olan bir talep yükünün etkisi
altındadır:

$$m_M(t) = 50 \left[1 - 0.7 \sin \left(\frac{2\pi t}{60} \right) \right]$$

burada t saniye cinsinden zamanı göstermektedir. Transient akış
boyunca, giriş hızı ilk düzeyinde sabit bir şekilde
tutulmaktadır. Giriş ve çıkış noktalarındaki basınç davranışı
istenmektedir. Diğer boru özellikleri aşağıdadır:

Uzunluk = 25 mil
Çap = 1.25 ft
Ses hızı = 1100 ft/saniye
Sürtünme faktörü = 0.02
İlk giriş basıncı = 400 psia
Benzetim sonuçları şekil 4.a ve 4.b' de gösterilmektedir.

Son üç örnekte elde edilen sonuçlar geliştirilen
algoritmaların orjinal çalışmalarla çok iyi uyum sağladığını

göstermektedir. Bunun gibi, Eskişehir-Ankara arasındaki BOTPAŞ taşıma hattı için veri azlığına rağmen benzetim sonunda gerçeğe oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Küçük farklılıklar genellikle yetersiz verilerden doğmaktadır. Örneğin, örnek C'de sürtünme katsayısı ilgili referans kaynaktan verilmemektedir. Bu yüzden basınç davranışlarındaki küçük aykırılıkların bu faktörden ötürü doğduğu sanılmaktadır. C, D örneklerinde iyi sonuçlar elde edilmiş ve sınır koşullarındaki kararsız dalgalanmaların büyüklüğü ne kadar olursa olsun sonuçlar literatüre uymaktadır.

3.b. İzotermal Olmayan Benzetimler

İkinci bölümde izotermal olmayan modelin güvenilirliğini göstermek için benzetim programı TRNONISO literatürden alınan sistemlerin benzetiminde denemiştir. Uygunluğunu göstermenin yanında hayali olarak yaratılmış bir sistem için aynı yazılım ilgili sınır ve ilk durum koşulları ile çalıştırılmıştır.

Örnek E.

Geliştirilen TRNONISO programı ilk olarak basit bir boruhattına uygulanmış ve kararlı durumda verdiği sonuçların güvenilirliği test edilmiştir. Literatürde aynı anda hem kararlı hem de kararsız akış verisi bulunamadığı için aşağıdaki veriler karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır.

Bu örnekte boruhattının sıcaklık profili bulunmaktadır. Veriler Gould' un çalışmasından alınmıştır (Gould, 1979). Ancak izotermal olmayan akışın modellenmesi için bu veriler ilk olarak Scherre ve Gould tarafından kullanılmıştır.

Yatay boruhatlı 30 inç çapında ve 78.9 mil uzunluğundadır. Gazın gravitesi 0.6' dır. Giriş basıncı ve sıcaklığı 794 psi ve 129°F' dir. Kararlı akış debisi 563.2 MMscf/gün' dür. 760 mikroinçlik pürüzlülük değeri kullanılarak 0.01' lik sürtünme faktörü, Swanee ve Jain denklemleri ve Moody sürtünme grafiği yardımıyla bulunmuştur. Bu katsayı kullanılarak çıkış basıncı 452.6 psi bulunmuştur ki bu değer ölçülen değerle (453 psi) aynıdır. Sabit Yeryüzeyi sıcaklığı ise 62°F' dir.

Şekil 5 hesaplanan sıcaklık profili ile Gould' un sonuçlarını karşılaştırmaktadır (Gould, 1979). Görüldüğü gibi geliştirilen model hassas ve doğru bir sıcaklık dağılımını sağlamaktadır.

Dikkat edilirse model yer sıcaklığının 5°F altında ölçülen çıkış sıcaklığı ile iyi uyumaktadır. Bu durum Joule-Thompson 'Soğuma etkisi' denen ve basınç düşüşünden kaynaklanan bir Fiziksel olaydan dolayı ortaya çıkmaktadır.

Örnek F.

İzotermal olmayan akış koşulları için ilk incelenen sistem aşağıda verilenleri verilen yatay bir taşıma hattıdır:

Uzunluk = 80 mil

İç çap = 29.3 inç

Dış çap = 30.0 inç

Toprak sıcaklığı = 62°F

Toplam ısı aktarımı katsayısı = 0.6 Btu/ft²-sa-°F

İlk giriş basıncı = 794 psi

İlk kararlı akış debisi = 550 MMscf/gün

İlk giriş sıcaklığı = 70°F

Bu sistem debi kontrollü ve hayali bir örnek olduğundan keyfi olarak giriş sıcaklığı bir süre için düzenli olarak arttırılmıştır (giriş ve çıkışta akış hızı ilk değer olan 550 Mmscf/gün' de sabit tutulmuştur) -bkz. şekil 6.a). Yüksek sıcaklık düzeyinde benzetim süresince bir soğutucu arızası tasarlanabilir. Bu benzetimin sonuçları ise şekil 6.b ile 6.e arasında verilmektedir.En kısa ve en uzun zaman basamak-boyutu 0.1 ve 5 dakikadır. Bunun yanında, boruhattında akan gaz içindeki ısı yayılımını gösterebilmek için sıcaklık profilleri verilmektedir (bkz. şekil 6.e).

Örnek G.

Sıradaki örnekte bir önceki sistem tekrar ele alınmış ancak bu kez giriş noktasında basamak şeklinde değişen debi, sınır koşulu olarak alınmıştır. Diğer noktada talep düzeyi ilk değerinde aynı tutulmuştur. Benzer şekilde uygun bir termo-cihaz yardımıyla giriş sıcaklığı 70°F' ta sabit bırakılmıştır (ilk değer). Benzetim sonuçları şekil 7.b ile 7.3' de gösterilmektedir. Sıcaklık profilleri de ayrıca verilmektedir.

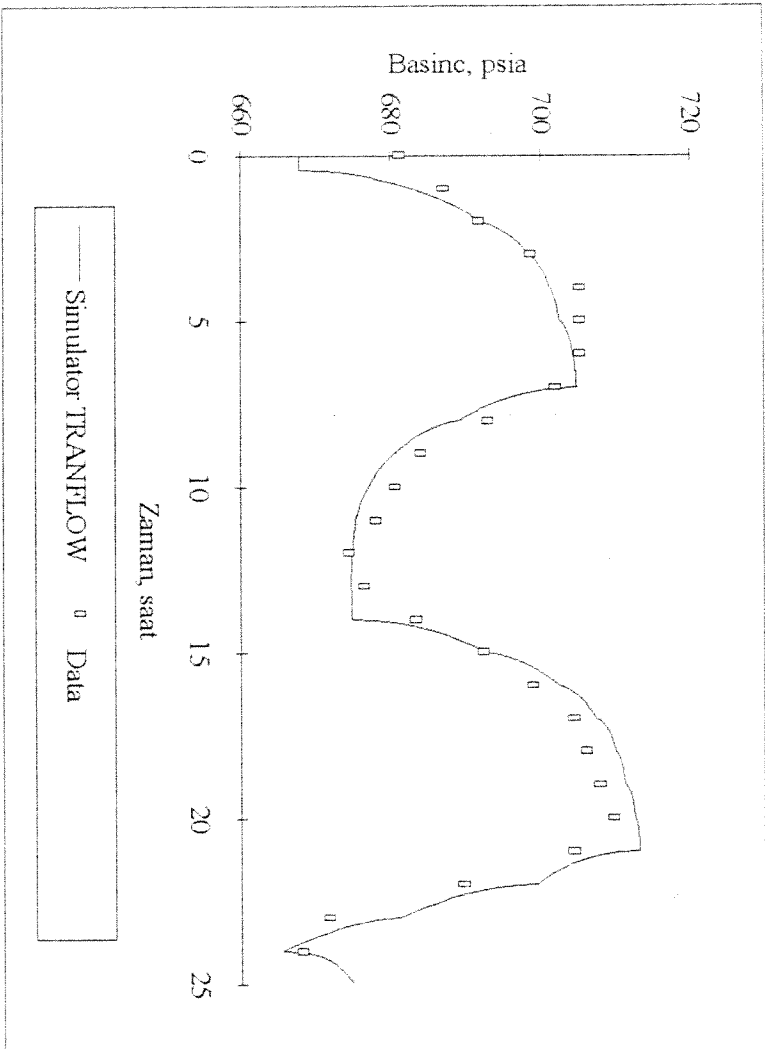
Örnek H.

Son örnekte ilk iki durumda olduğu iki sistem aynı taşıma hattıdır. Giriş ve çıkış debileri sabittir. Sisteme değişmeyecek bir fazda 70°F' ta gaz verilmektedir. Ancak, çevreleyen toprak sıcaklığı sinuzoidal bir formda zamana karşı değişmektedir (bkz. şekil 8.a). Benzetim sonuçları şekil 8.a ile 8.c arasında verilmektedir.

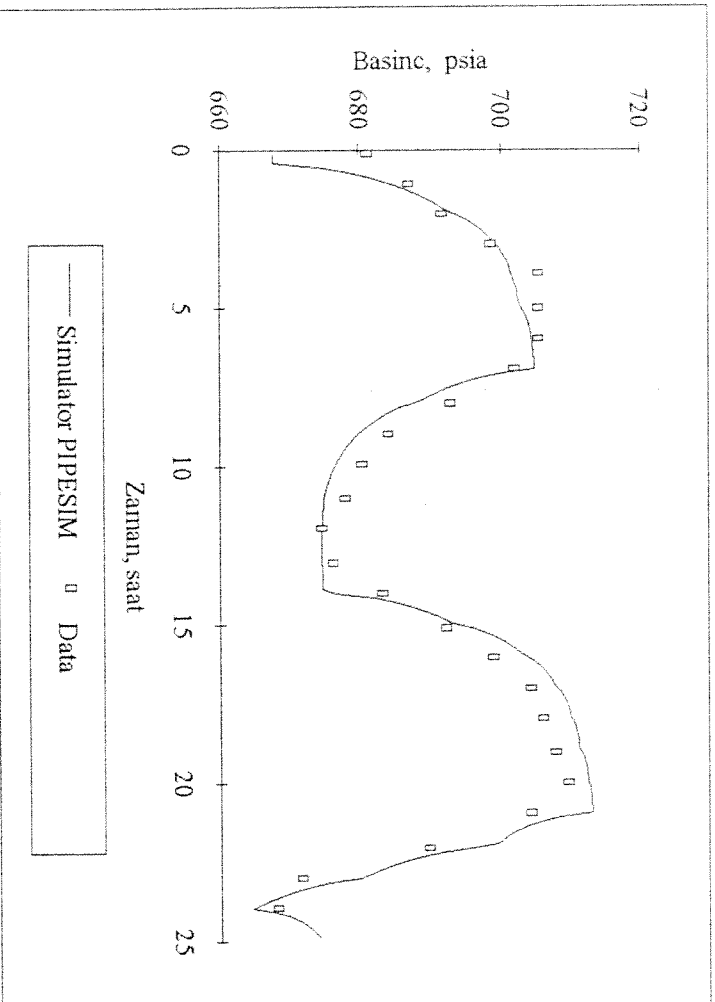
Benzetim sonuçlarının güvenilirliği kontrol edilemez olsa da eğer basınç ve sıcaklık davranışları tanımlanan tranzientler için mantıklı bir şekilde açıklanabilirse, sistemin fiziksel lopkisini açıklamak için geliştirilen benzetimcinin kullanılabilirliği ortaya çıkabilecektir.

Örnek F' de giriş sıcaklığındaki artış, FOS' nin de belirlediği gibi boruhattının girişindeki basıncın artışını beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte bu sıcaklık artışı gaz için toplam sıcaklık artışında hızlanma yaratır böylece basınç düşümü daha da artar ve çıkış basıncı daha fazla düşer (bkz. şekil 6.d). Buna benzer bir şekilde şekil 8.b ve 8.c' de aynı davranışı görmek olasıdır.

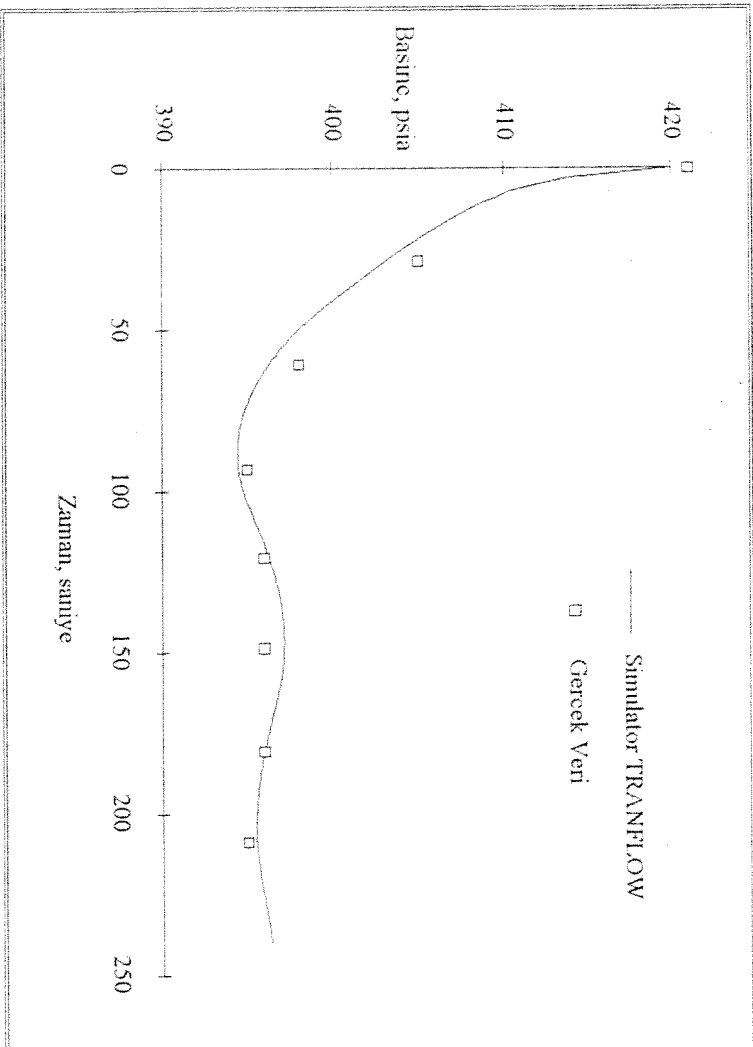
Debi (örnek G), sıcaklık (örnek F) ve basınç değerlerinde her ne zaman bir farklılaşma olursa, ardı sıra bağımlı parametrelerde dalgalanmalar ortaya çıkmaktadır. Şekil 6.e ve 7.e, böyle durumlarda sıcaklık kayışının nasıl yayıldığını boruhattlı boyunca göstermektedir.



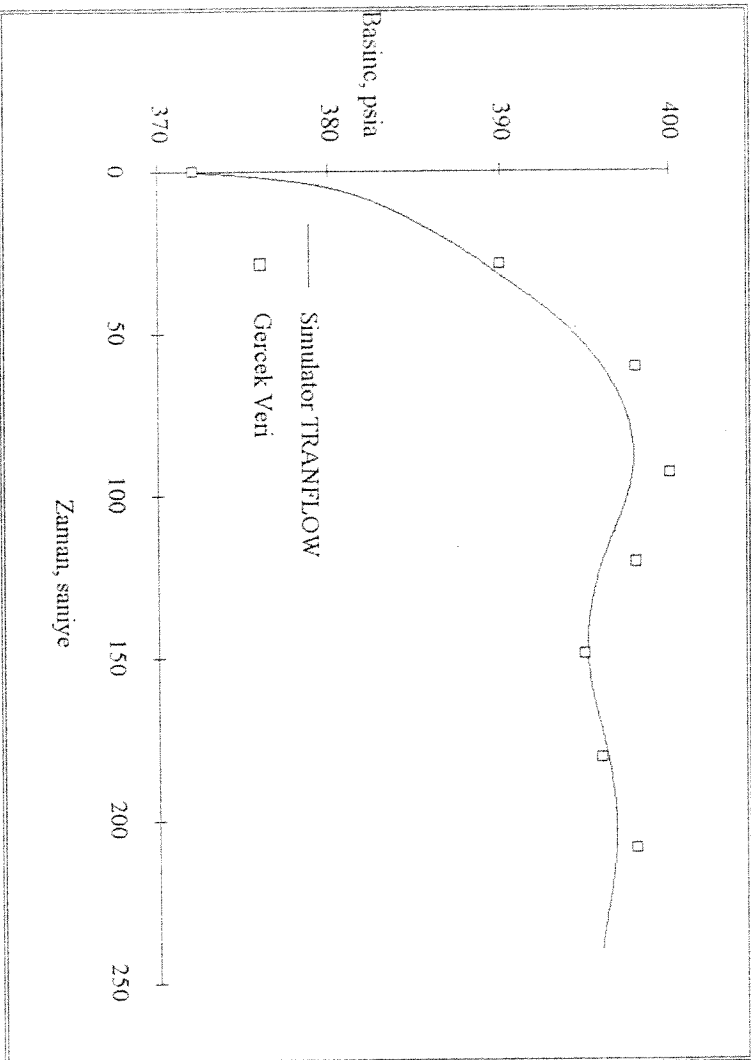
Şekil 1.a. Eskişehir-Ankara Hattının Ankara Ucundaki Basınç Davranışı



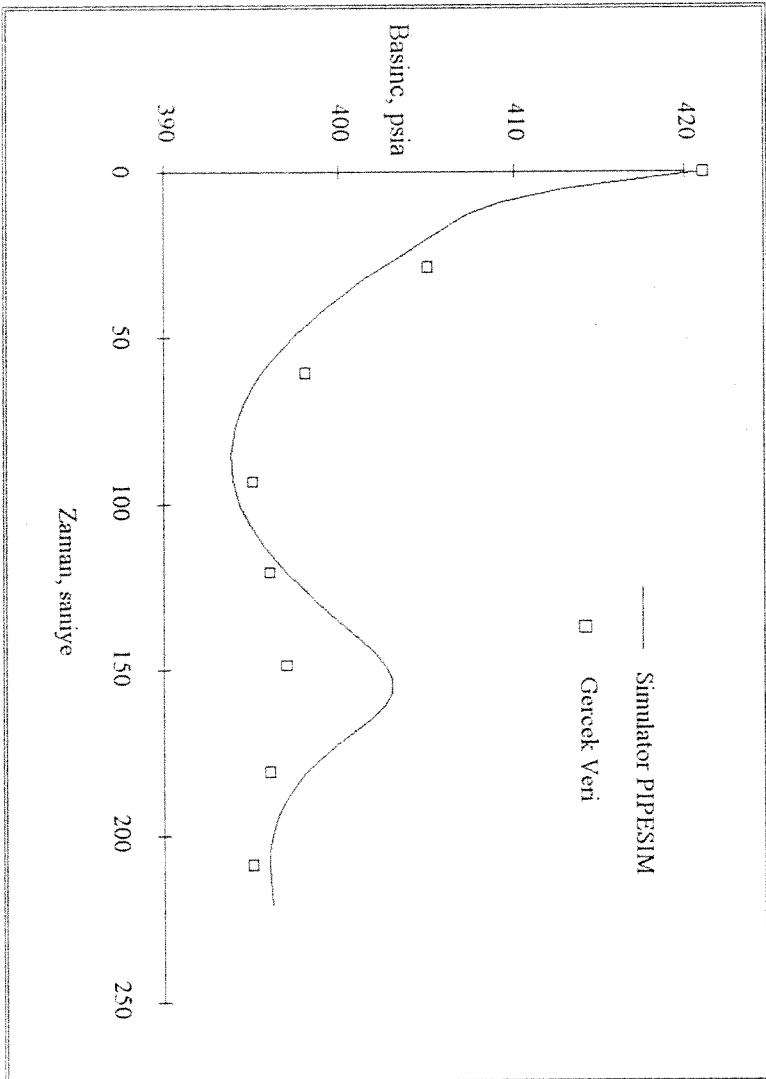
Şekil 1.b. Eskişehir-Ankara Hattının Ankara Ucundaki Basınç Davranışı



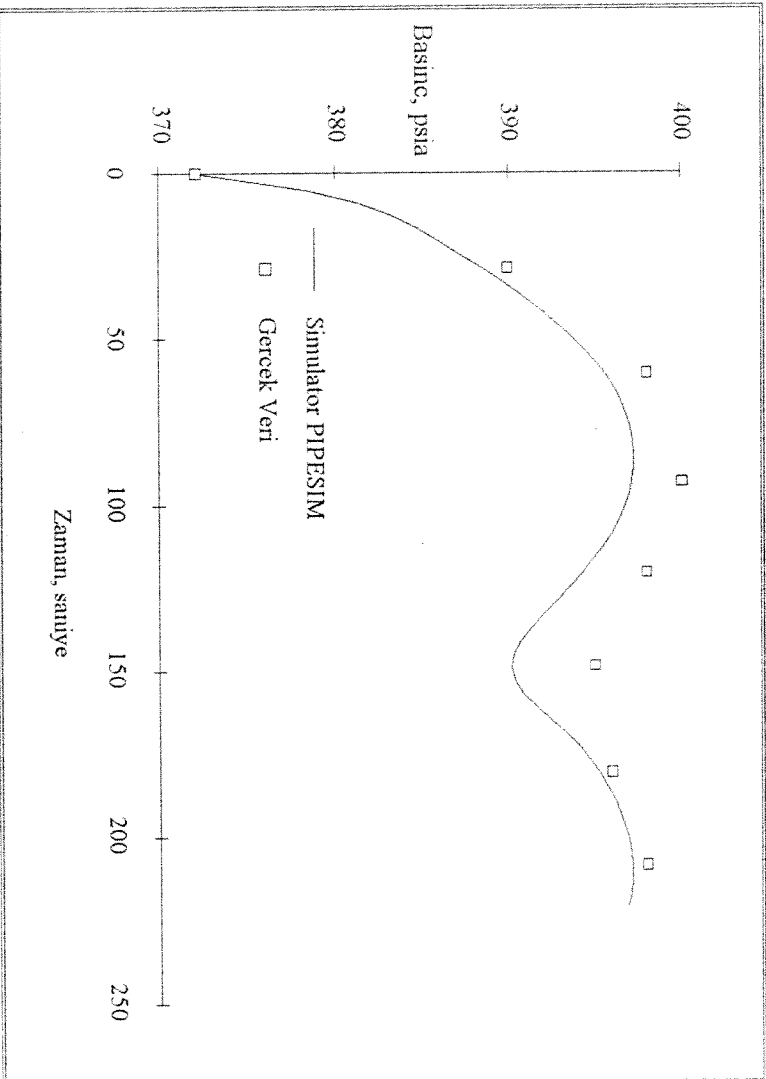
Şekil 2.a. Giriş Basıncı-Zaman Grafiği, Örnek B



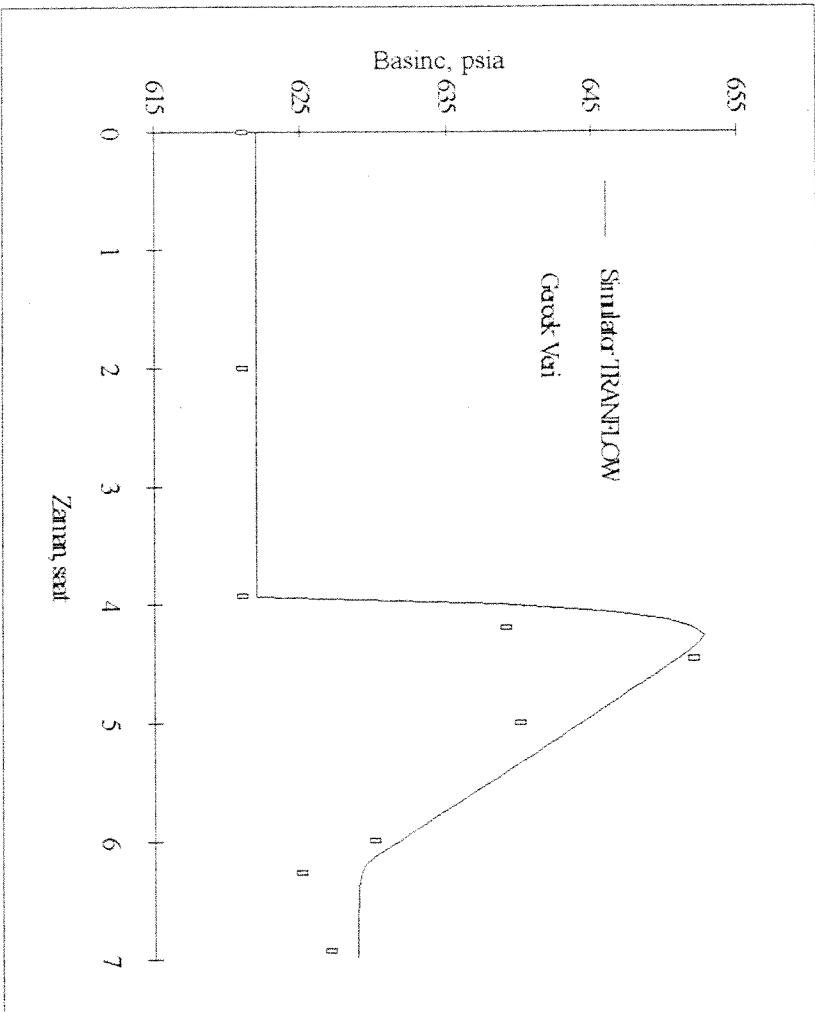
Şekil 2.b. Çıkış Basıncı-Zaman Grafiği, Örnek B



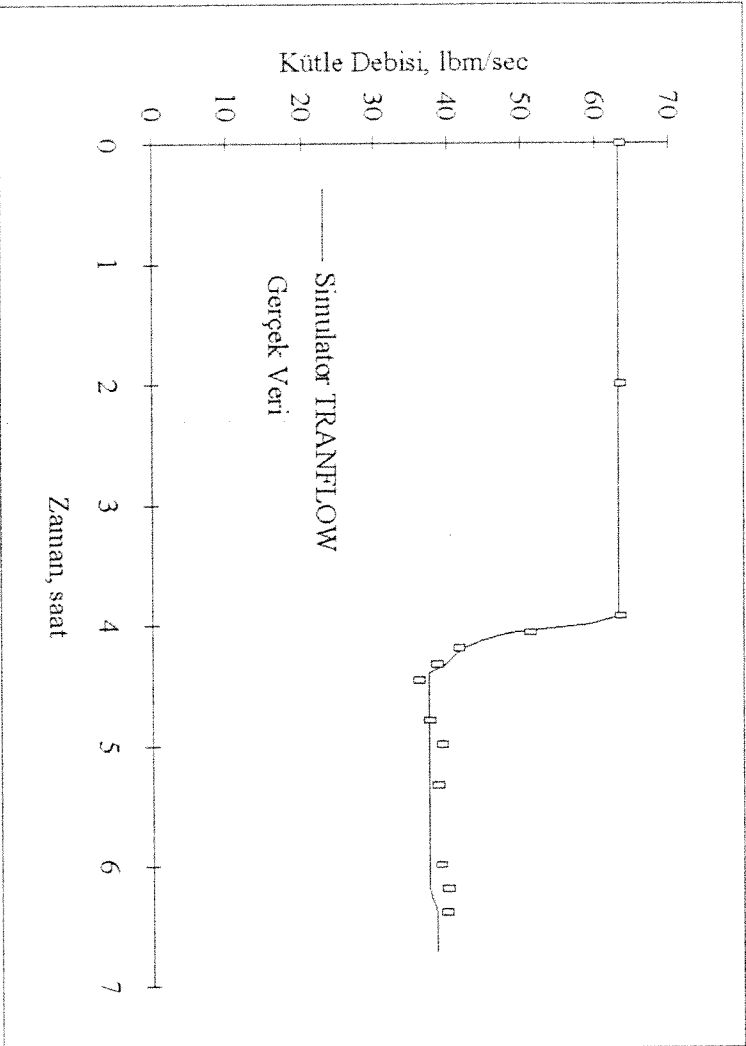
Şekil 2.c. Giriş Basıncı-Zaman Grafiği, Örnek B



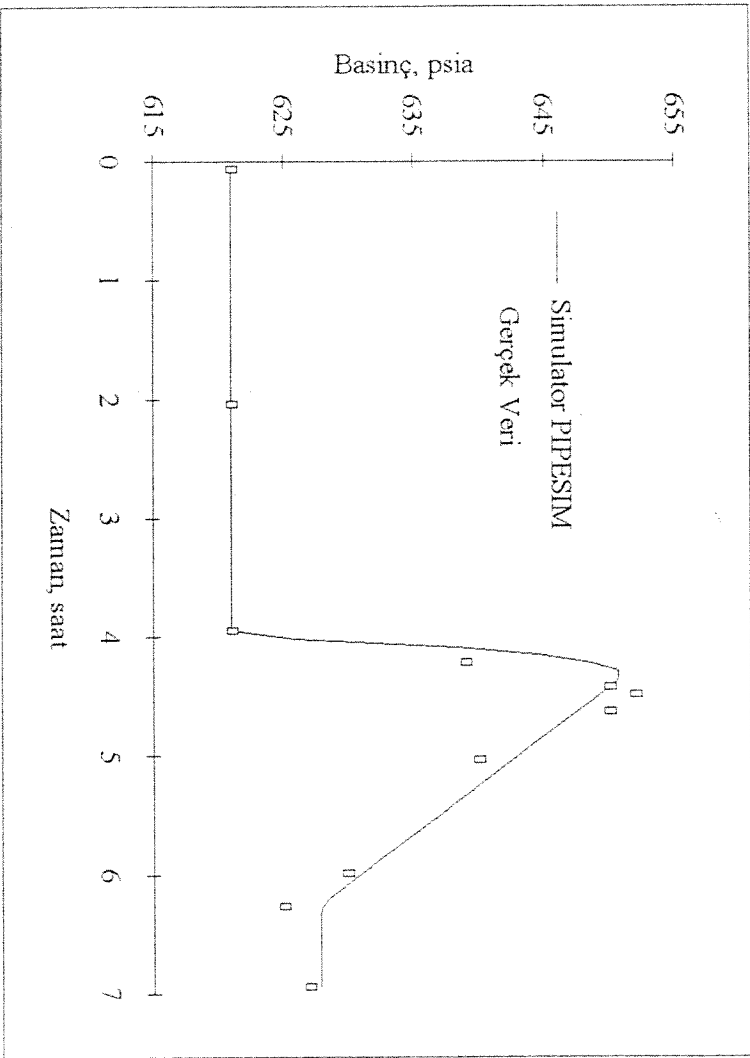
Şekil 2.d. Çıkış Basıncı-Zaman Grafiği, Örnek B



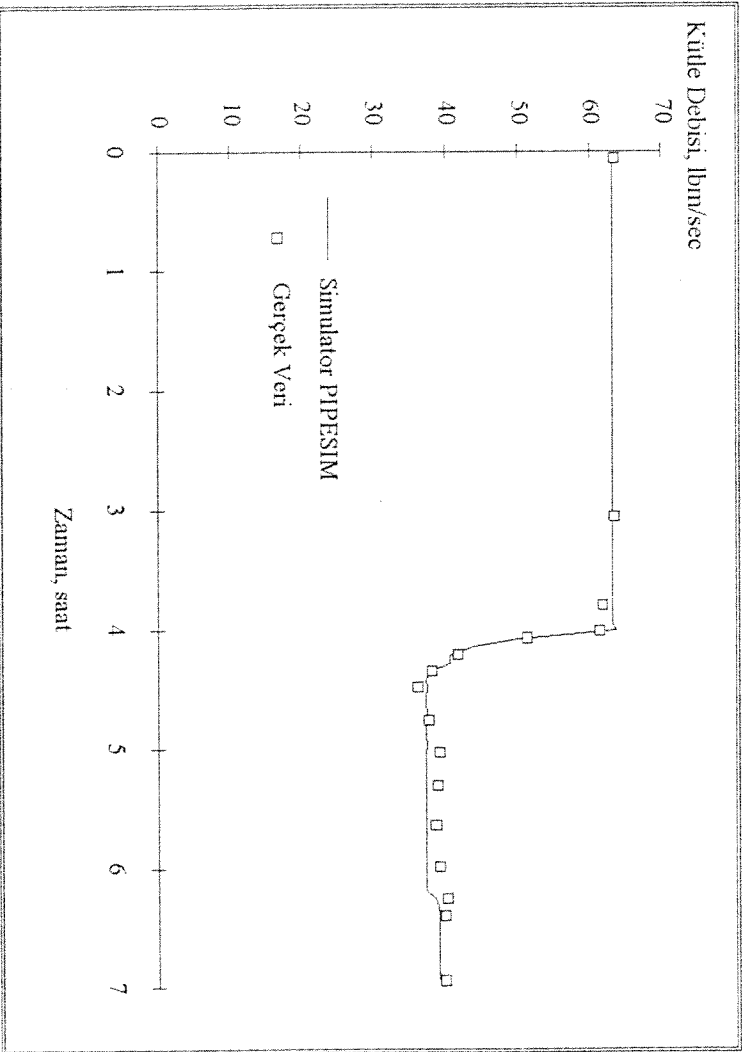
Şekil 3.a. Çıkış Basıncı-Zaman Grafiği, Örnek C



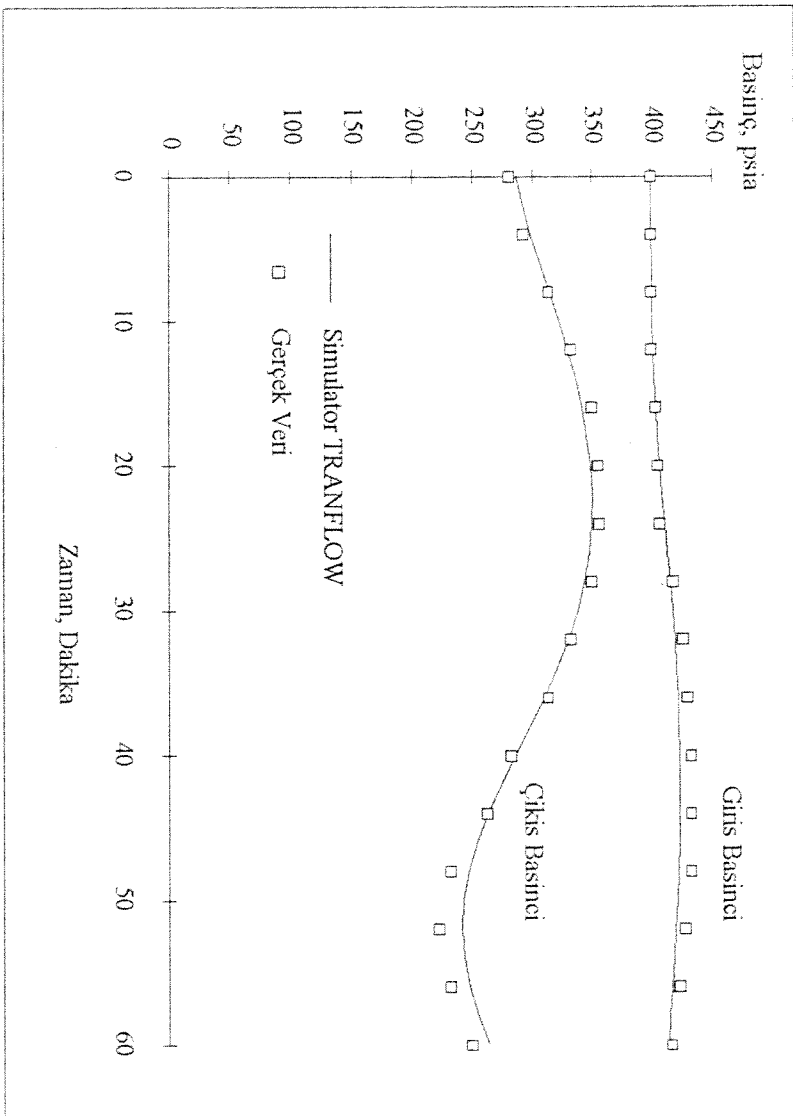
Şekil 3.b. Giriş Debisi-Zaman Grafiği, Örnek C



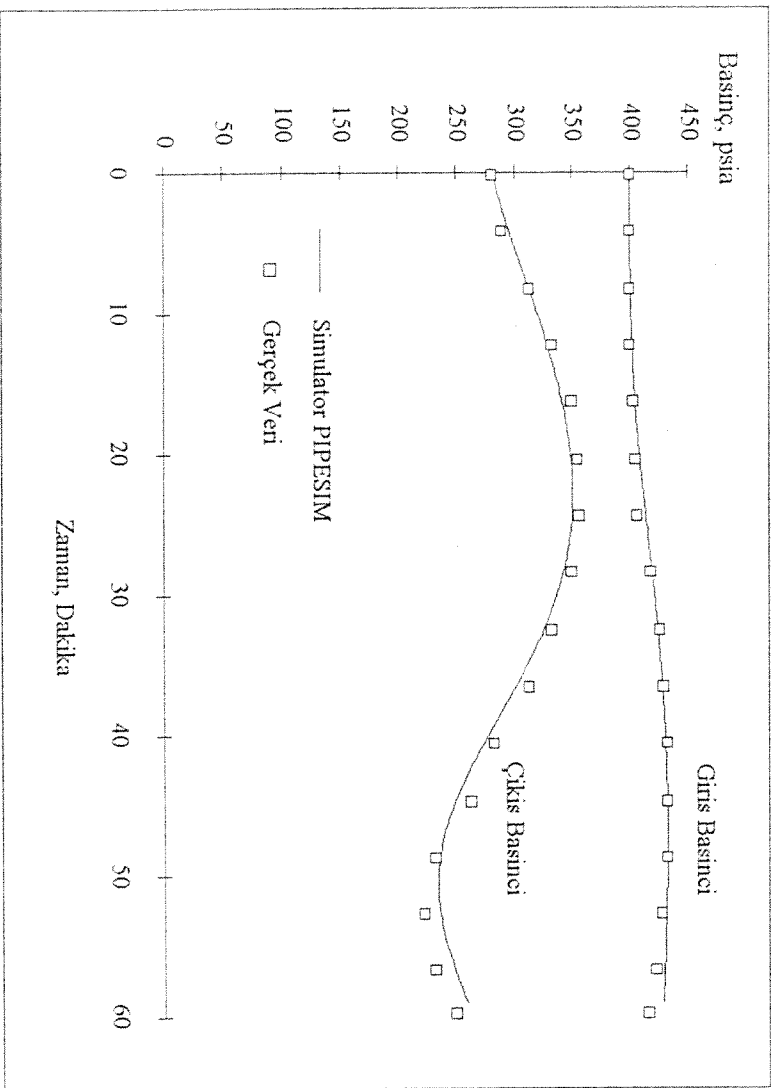
Şekil 3.c. Çıkış Basıncı-Zaman Grafiği, Örnek C



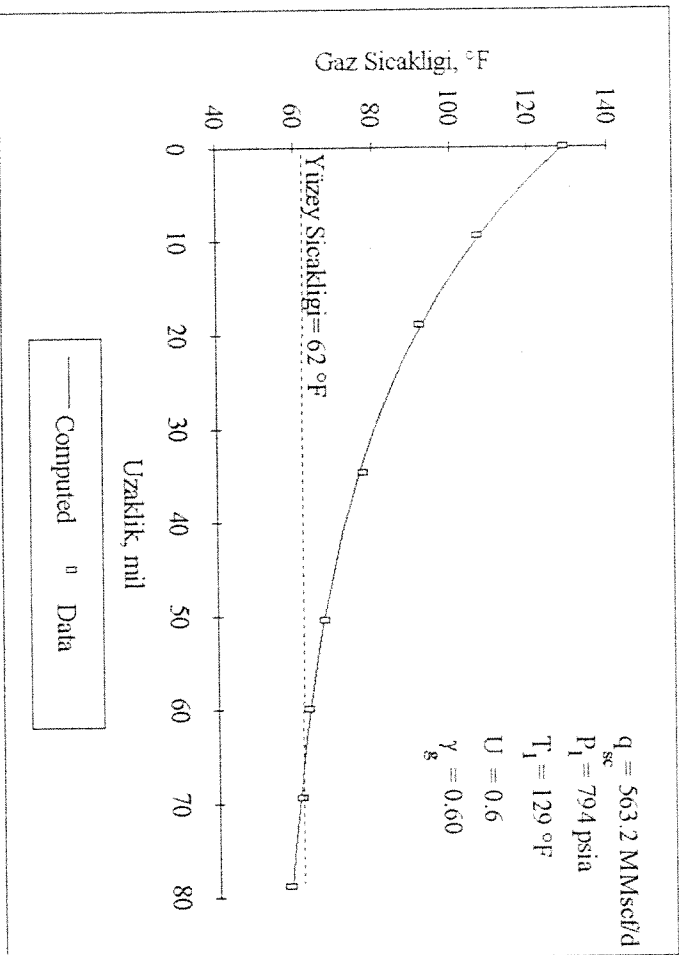
Şekil 3.d. Giriş Debisi-Zaman Grafiği, Örnek C



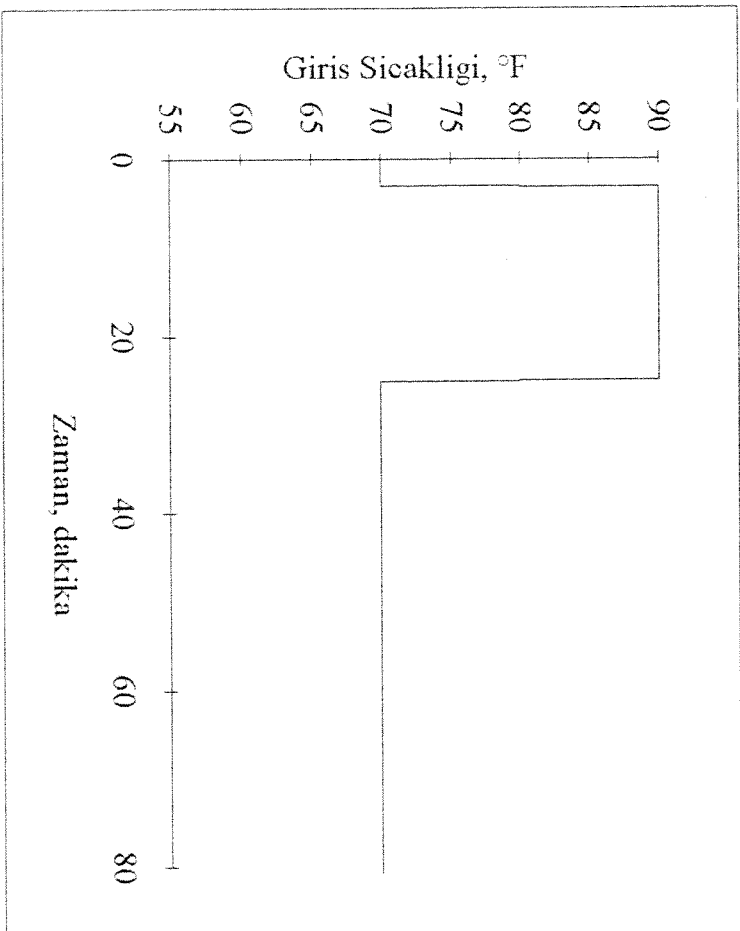
Şekil 4.a. Giriş ve Çıkış Basıncı-Zaman Grafiği, Örnek D



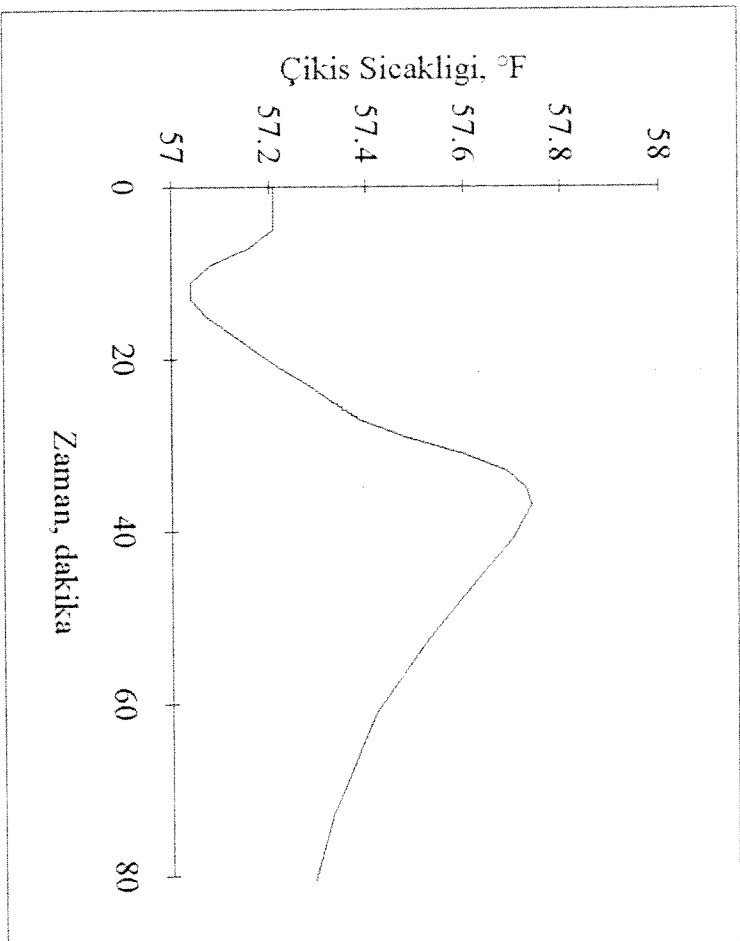
Şekil 4.b. Giriş ve Çıkış Basıncı-Zaman Grafiği, Örnek D



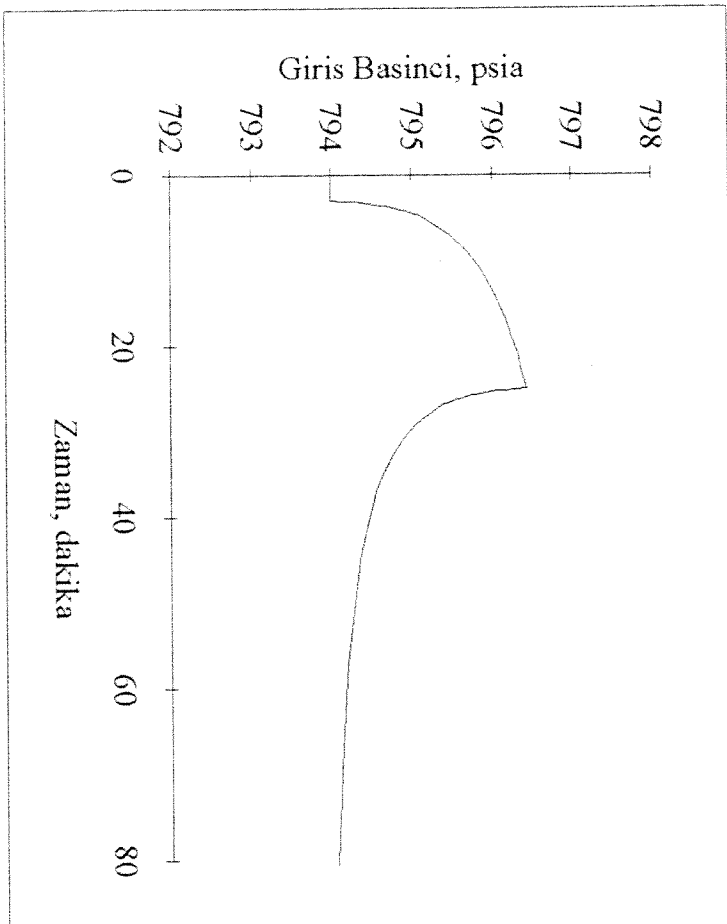
Şekil 5. Hesaplanan ile Literatürden Alınan Sıcaklık Dağılımının Karşılaştırılması (Gould)



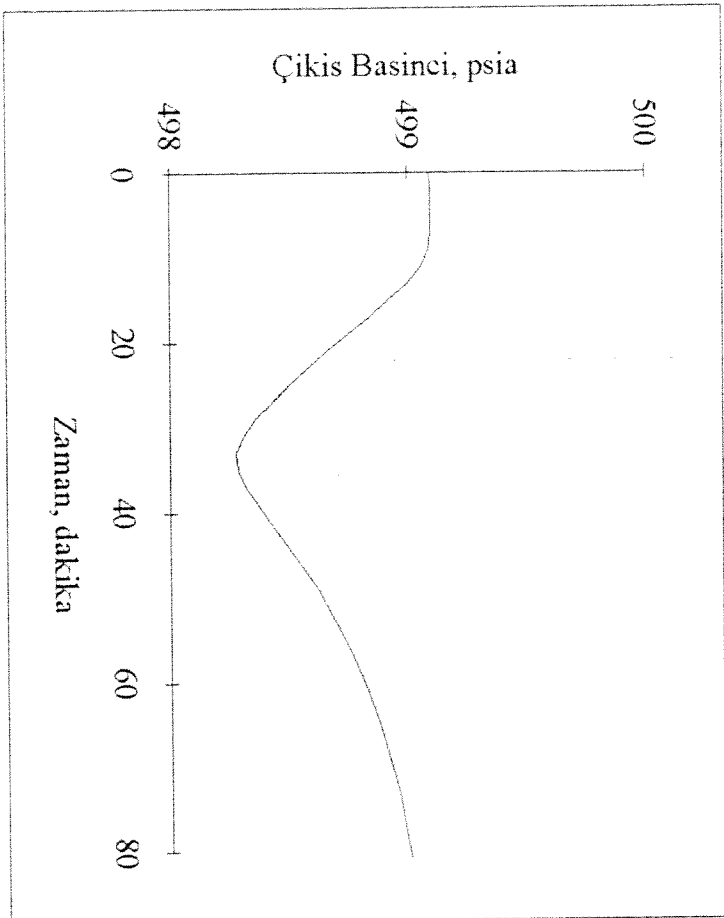
Şekil 6.a. Tanımlanan Sınır Koşulu, Örnek F



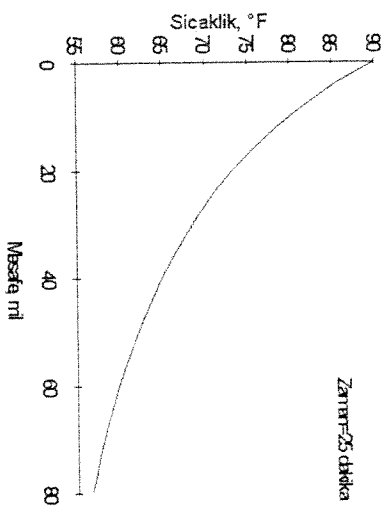
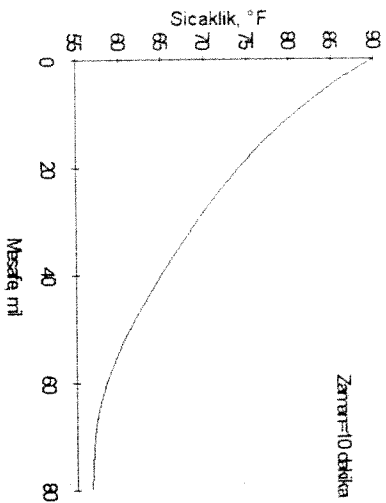
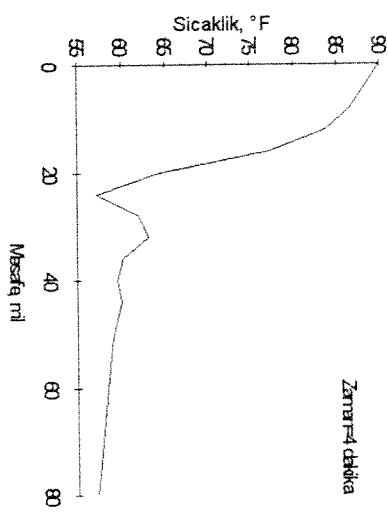
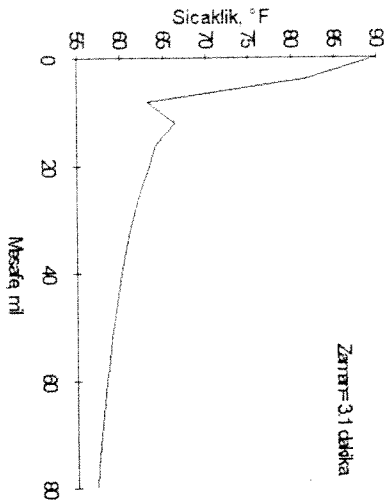
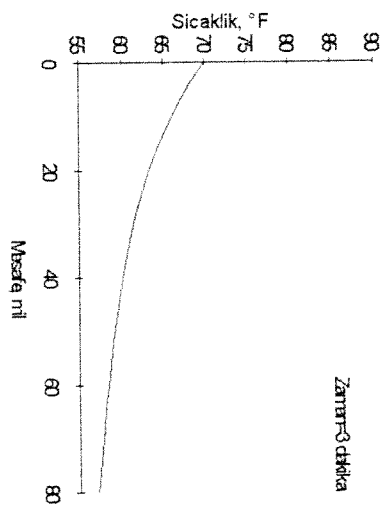
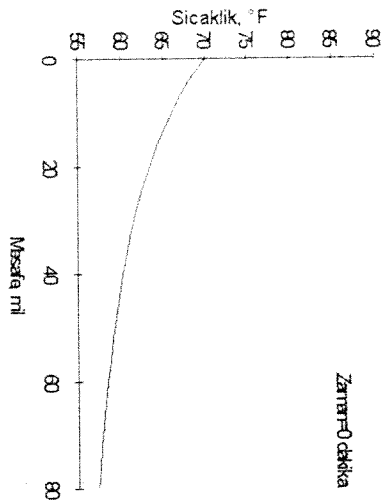
Şekil 6.b. Hesaplanan Çıkış Sıcaklığı, Örnek F



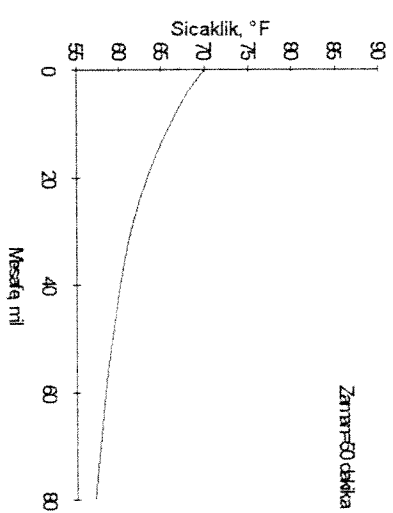
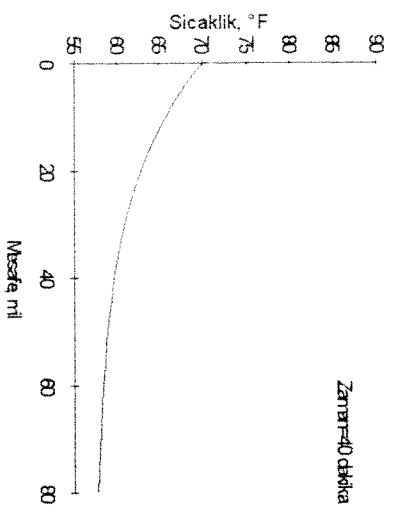
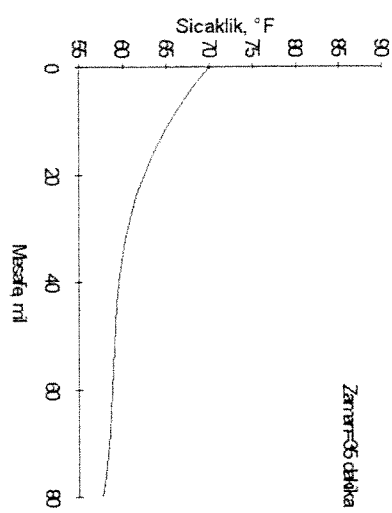
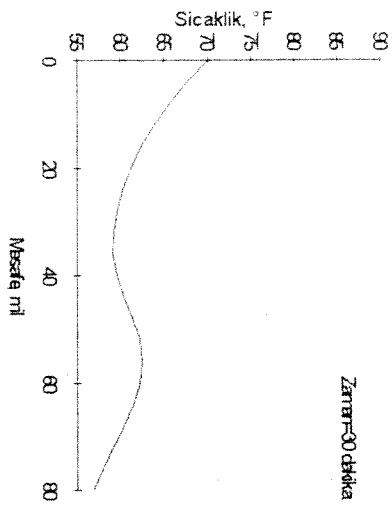
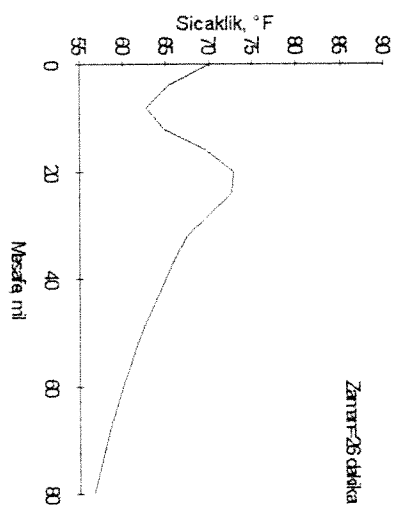
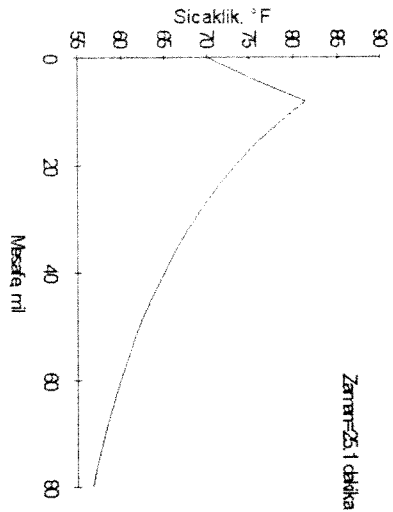
Şekil 6.c. Giriş Basıncı-Zaman, Örnek F



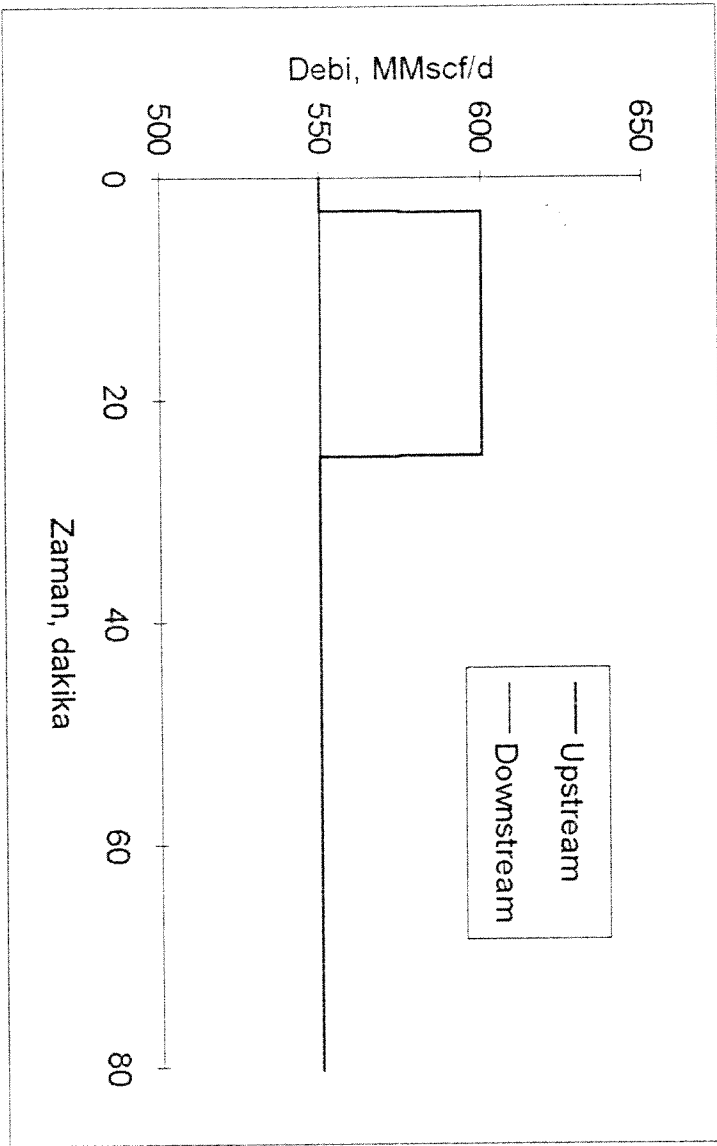
Şekil 6.d. Çıkış Basıncı-Zaman, Örnek F



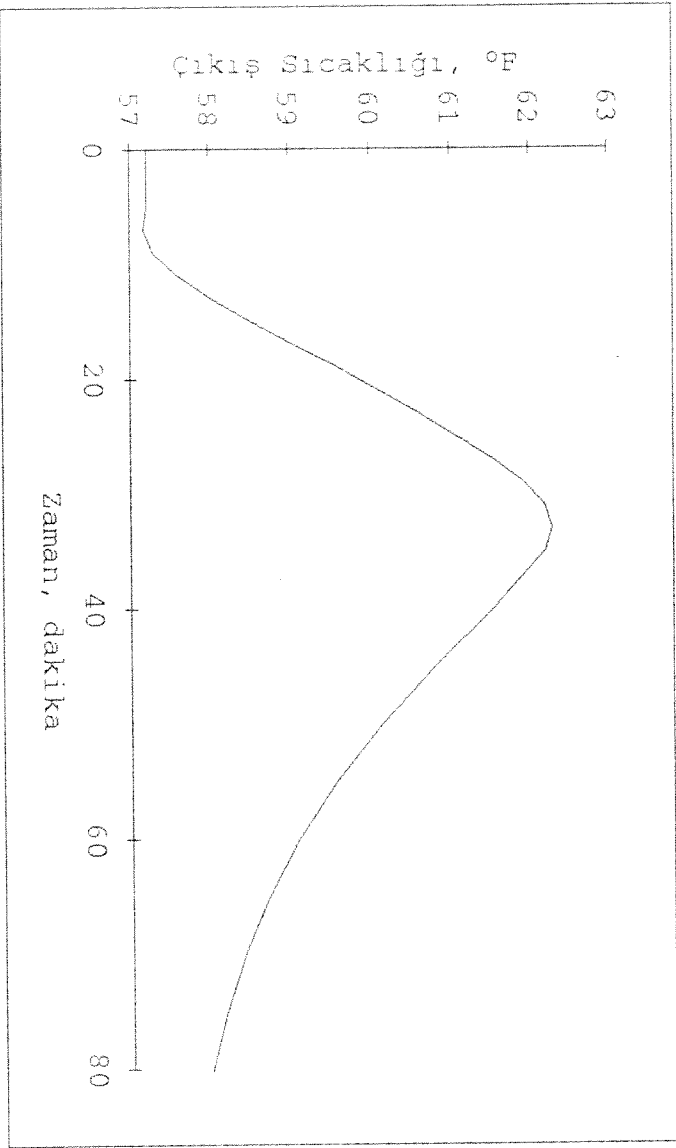
Şekil 6.e. Değişik Zaman Basamaklarında Sıcaklık Dağılımları,
Örnek F



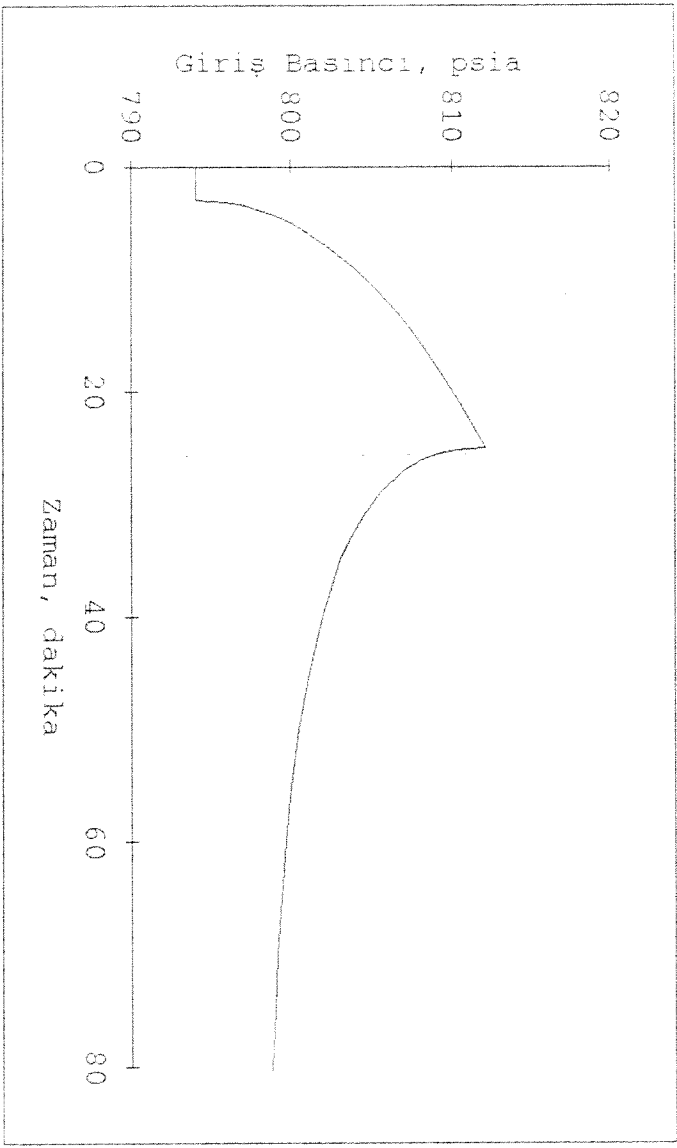
Şekil 6.e. (Devam)



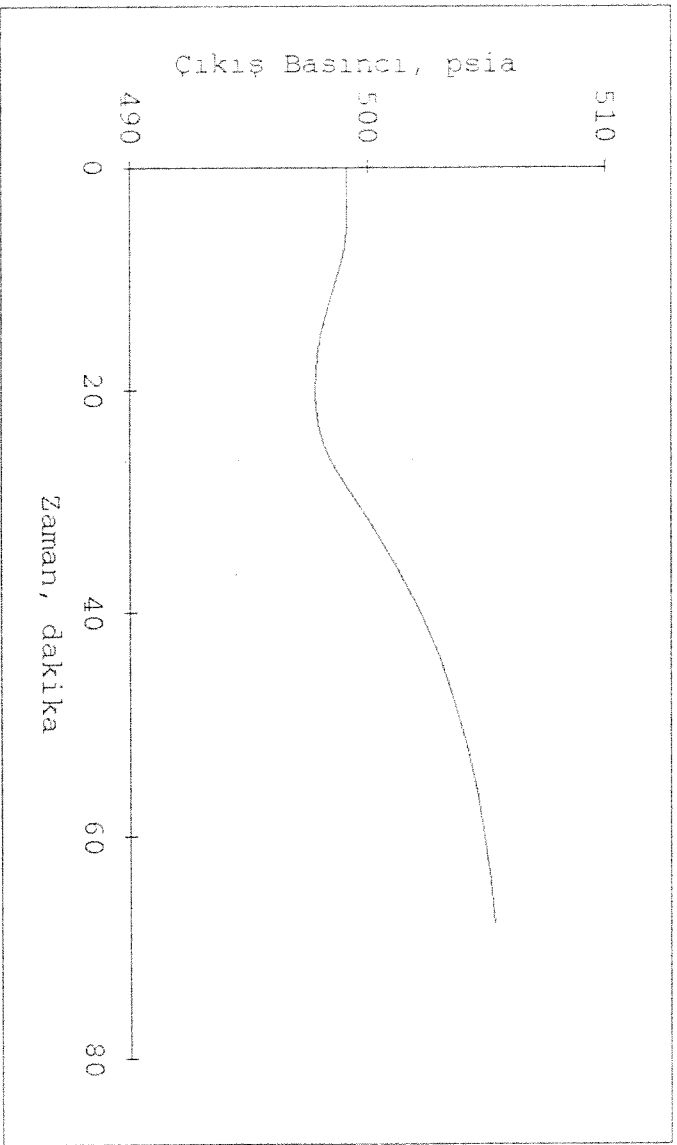
Şekil 7.a. Tanımlanan Sınır Koşulu, Örnek G



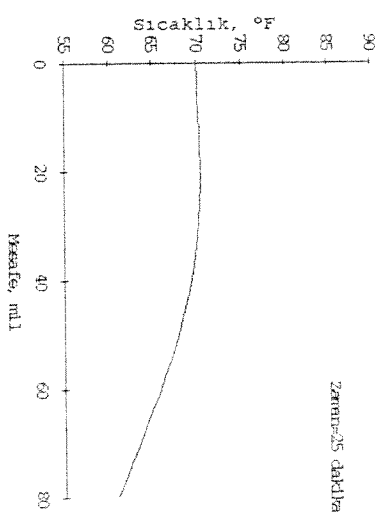
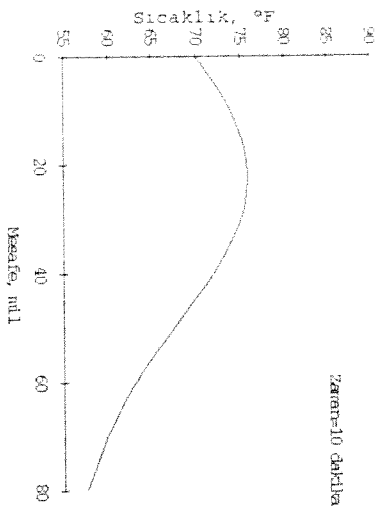
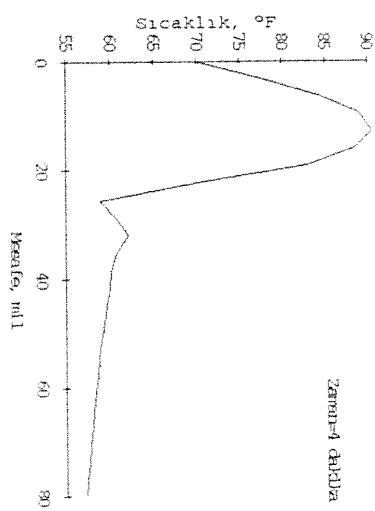
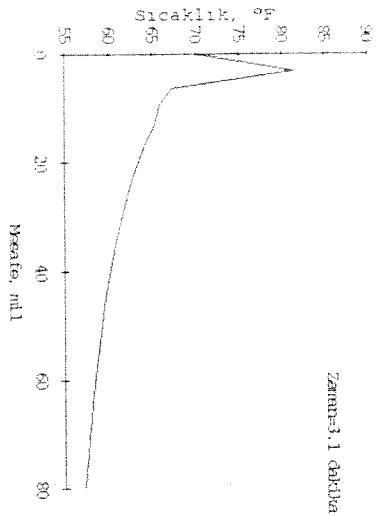
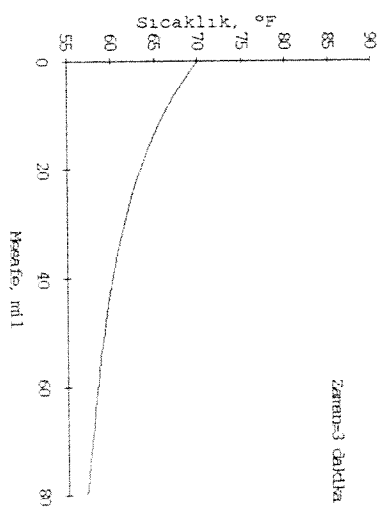
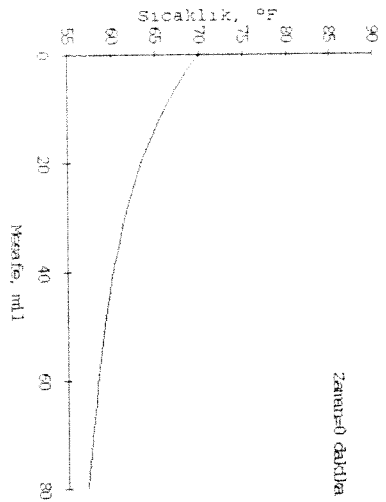
Şekil 7.b. Hesaplanan Çıkış Sıcaklığı, Örnek G



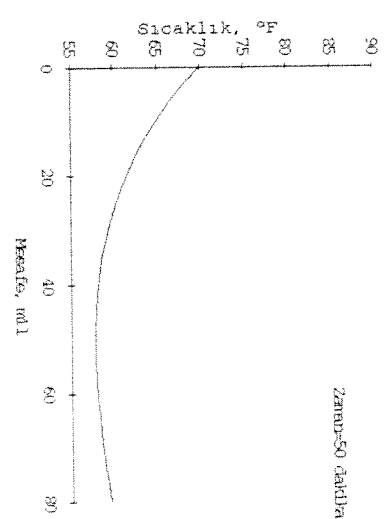
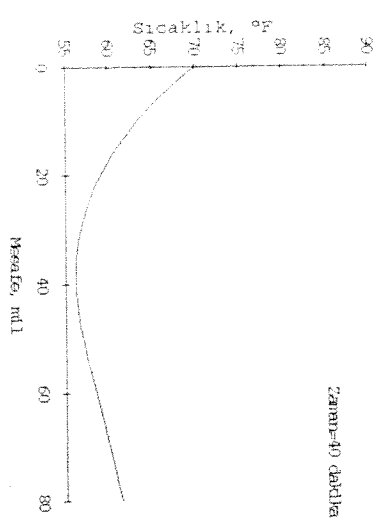
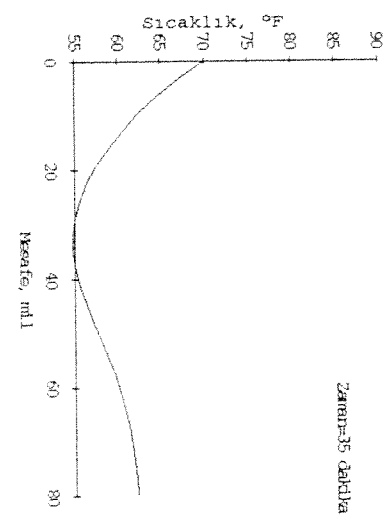
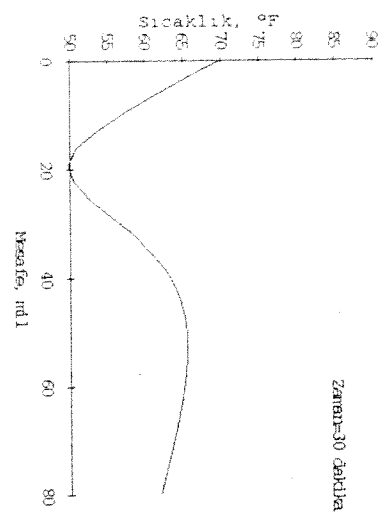
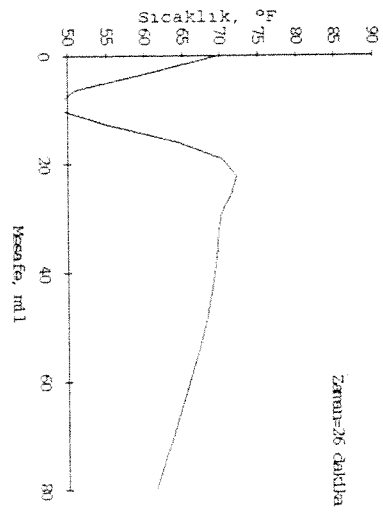
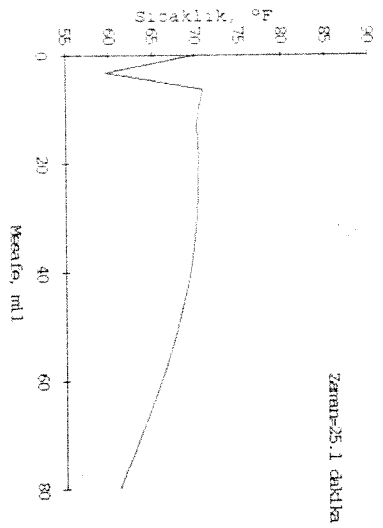
Şekil 7.c. Giriş Basıncı-Zaman Grafiği, Örnek



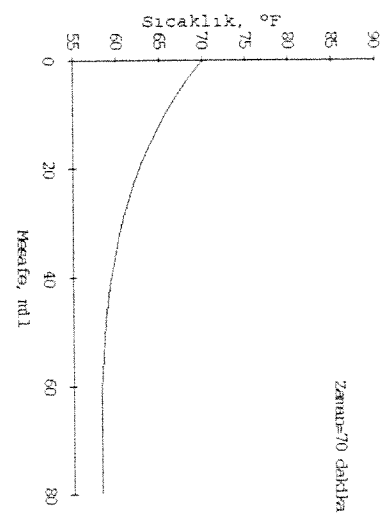
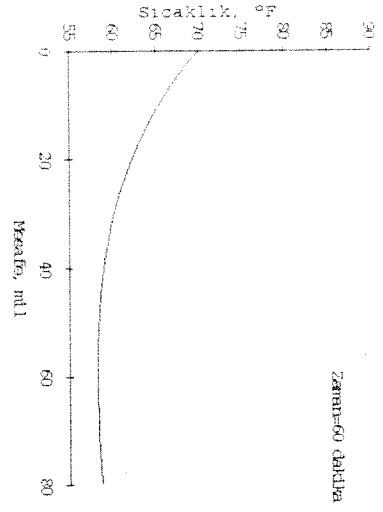
Şekil 7.d. Çıkış Basıncı-Zaman, Örnek G



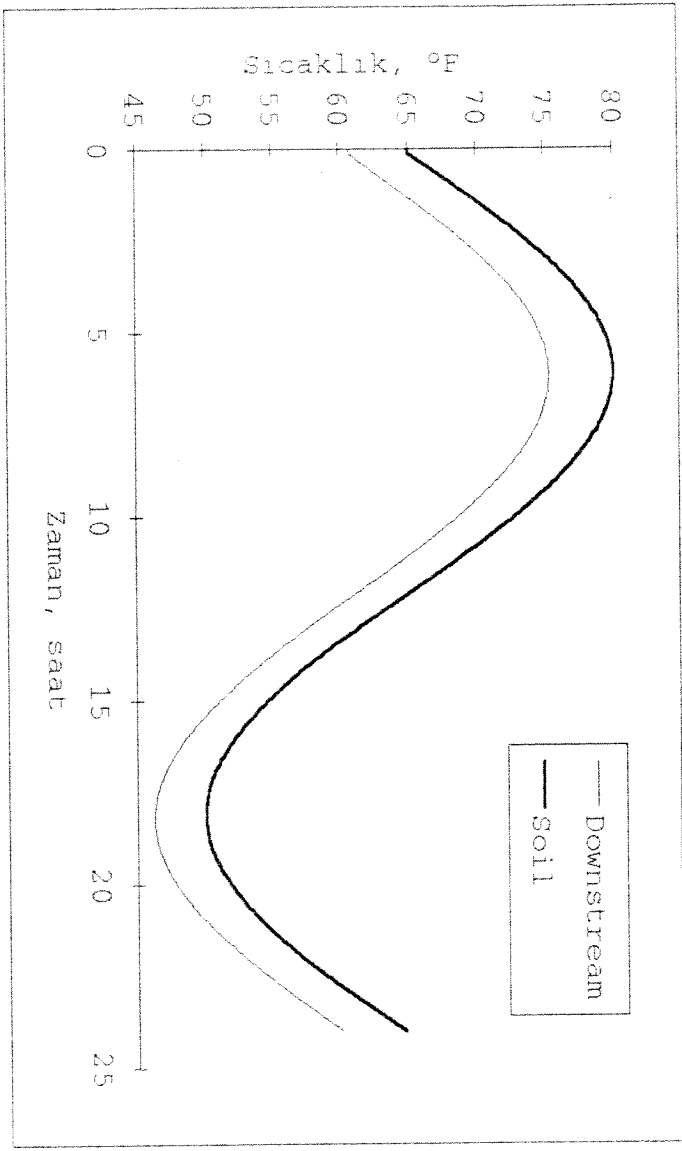
Şekil 7.e. Değişik Zaman Basamaklarında Sıcaklık Dağılımları,
Örnek G



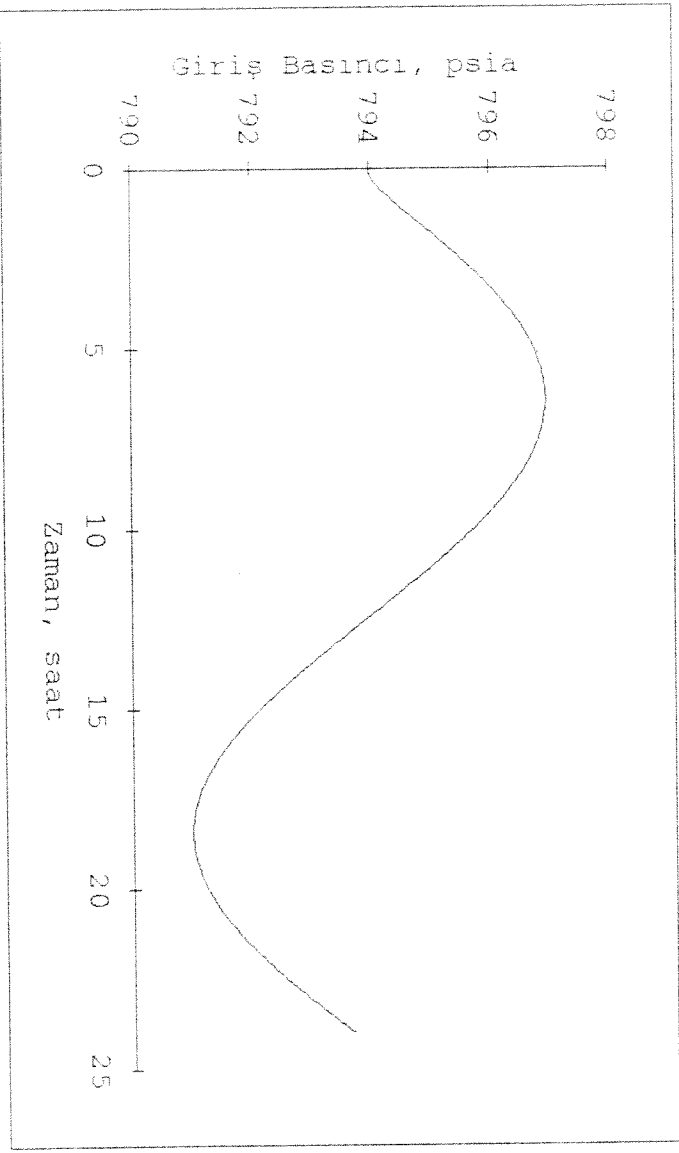
Şekil 7.e. (Devam)



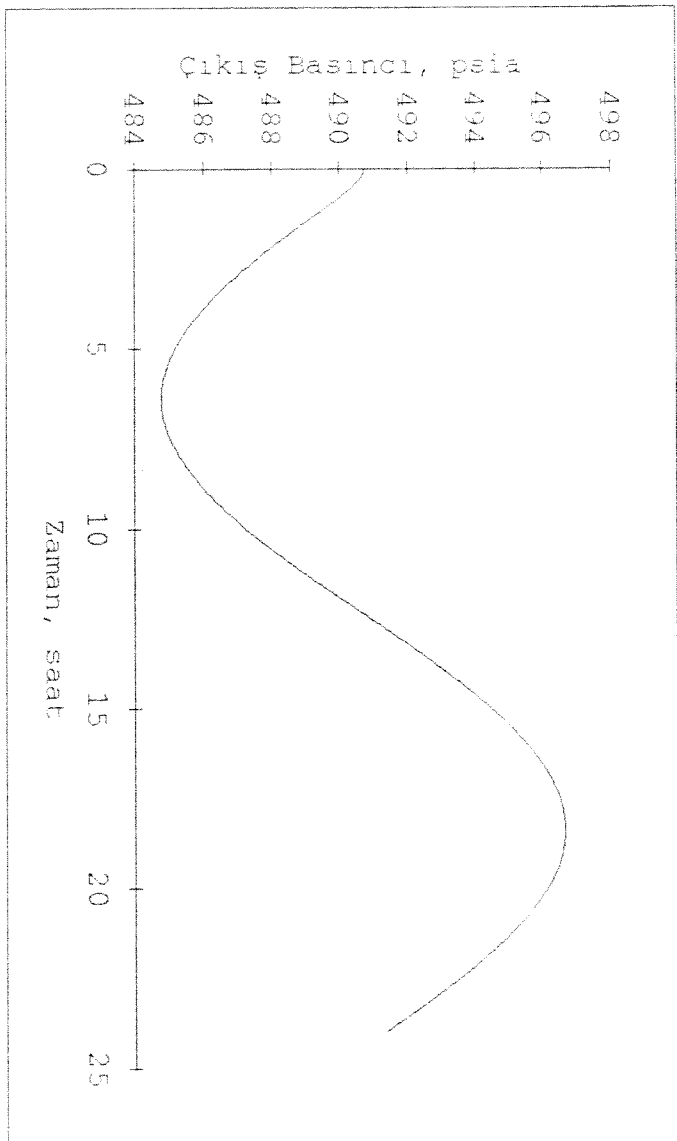
Şekil 7.e. (Devam)



Şekil 8.a. Toprak ve Çıkış Sıcaklıkları, Örnek H



Şekil 8.b. Giriş Basıncı-Zaman, Örnek G



Şekil 8.c. Çıkış Basıncı-Zaman, Örnek G

4. SONUÇLAR

Bu proje gelişmesi bütününde izotermal olan ve olmayan durumlarda boruhattındaki doğal gazın kararsız akışı modellenmiş ve üç tane benzetim paketi geliştirilmiştir. TRNANFLOW, PIPESIM ve TRNONISO isimli üç yazılım, raporun devamına eklenmiştir. Eskişehir ile Ankara arasındaki taşıma boruhattını da içeren bir dizi örnek problem ele alınmış ve incelenmiştir. İnanıyoruz ki gerek tasarım aşamasında olsun gerekse yapılandırma evresinde olsun bu programlar doğal gaz boruhattı endustrisindeki çalışanlara oldukça yararlı olacaktır.

5. GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

Bir ülkenin endüstrileşme düzeyi ile varolan doğal gaz boruhatları sayısı arasındaki yakın ilişki geliştirmekte olan ülkeler için tartışılmaz bir gerçektir. Bu nedenle Türkiye açısından doğal gaz taşıma ve dağıtım konularındaki araştırmalar önemli bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Ayrıca, Türkiye bu alandaki bilgi birikimini kendi bilimadamları, bilimkadınları ve tasarımcılarından yola çıkarak oluşturmalı ve yabancı teknoloji bağımlılığını en aza indirmelidir.

Kararsız doğal gaz akışının analizinden ayrı olarak aşağıdaki konularda da gelecekte çalışmalar yapılması zorunludur:

- 1.) Optimal Tasarım
- 2.) Değişken Tüketici Talebini Karşılama

6. REFERANSIAR

1. IKOKU, C. U., Natural Gas Production Engineering, John Wiley and Sons, New York, (1984)
2. KUMAR, S., Gas Production Engineering, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, (1987)
3. OSIADACZ, A., Optimal Numerical Method for Simulating Dynamic Flow of Gas in Pipelines, *Int. Journal of Numerical Methods in Fluids*, 3, 125-135, (1983)
4. RASHIDI, F., AKIN, S., A New Approximation Technique for Simulation of Gas Flow in Pipelines, to be published in *Int. Journal of Numerical Methods in Fluids*
5. RASHIDI, F., AKIN, S., ARIKAN, A. M., DURGUT, I., Simulation of Flow of Natural Gas in Pipelines under Transient and Non-Isothermal Conditions, (First Report), MAG 974-YBAG 0027, (1992)
6. RASHIDI, F., AKIN, S., ARIKAN, A. M., DURGUT, I., Simulation of Flow of Natural Gas in Pipelines under Transient and Non-Isothermal Conditions, (Second Report), MAG 974-YBAG 0027, (1992)
7. RASHIDI, F., AKIN, S., ARIKAN, A. M., DURGUT, I., Simulation of Flow of Natural Gas in Pipelines under Transient and Non-Isothermal Conditions, (Third Report), MAG 974-YBAG 0027, (1993)
8. STONER, M., Analysis and Control of Unsteady Flows in Natural Gas Piping Systems, *Journal of Basic Engineering*, ASMEJ (1968)

9. STREEFER, V., WYLIE E., "Natural Gas Pipeline Transients", SPEJ 357-364, Dec. (1970)
10. WYLIE, E., STONER, M., STREEFER, V., "Network System Transient Calculations by Implicit Methods", SPEJ 356-362, Dec. (1971)
11. RACHFORD, H. H., DUPONT, T., "A Fast, Accurate Means of Modeling Transient Flow in Gas Pipeline Systems by Variational Methods", SPEJ 165 -186, April (1974)
12. Gould, L. T., "Compositional Two-Phase Flow in Pipelines", JPT 373-384, (March 1979)
13. Edmister, W. C., Lee, B. I., Applied Hydrocarbon Thermodynamics Volume 1, Gulf Publishing Company, Houston, (1984)
14. Lee, B. I., Kesler, M. G., "A Generalized Thermodynamic Correlation Based on Three-Parameter Corresponding States", AIChE Journal 510-526, (May 1975)
15. Dranchuk, P. M., Abou-Kassem, J. H., "Calculation of Z-Factors for Natural Gases Using Equations of State", JCPP 51-56, (July-September 1975)

EK A

DOĞAL GAZIN TERMODİNAMİK ÖZELLİKLERİ

Termodinamik özellik hesaplarında sıkıştırılabilirlik faktörü temel alınır. Bu faktör, basit akışkan sıkıştırma faktörü, $Z^{(0)}$ ve bir referans akışkanın sıkıştırma faktörü, $Z^{(r)}$ türünden

ifade edilir:

$$Z = Z^{(0)} + \frac{\omega}{\omega^{(r)}} (Z^{(r)} - Z^{(0)}) \quad (A.1)$$

Bu yaklaşım Lee-Kesler tarafından önerilmiştir, (Lee-Kesler, 1975). 'B-W-R' kullanılarak durum denklemindeki $Z^{(0)}$ ve

$Z^{(r)}$ terimlerini aşağıdaki indirgenmiş forma ulaşılmıştır:

$$Z = \left(\frac{P_r'}{T_r} \right) = 1 + \frac{B}{V_r} + \frac{C}{V_r^2} + \frac{D}{V_r^3} + \frac{c_a}{T_r^3 V_r^2} \left(\beta + \frac{\gamma}{V_r^2} \right) \exp \left(-\frac{\gamma}{V_r^2} \right) \quad (A.2)$$

burada

$$B = b_1 - \frac{b_2}{T_r} - \frac{b_3}{T_r^2} - \frac{b_4}{T_r^3} \quad (A.3)$$

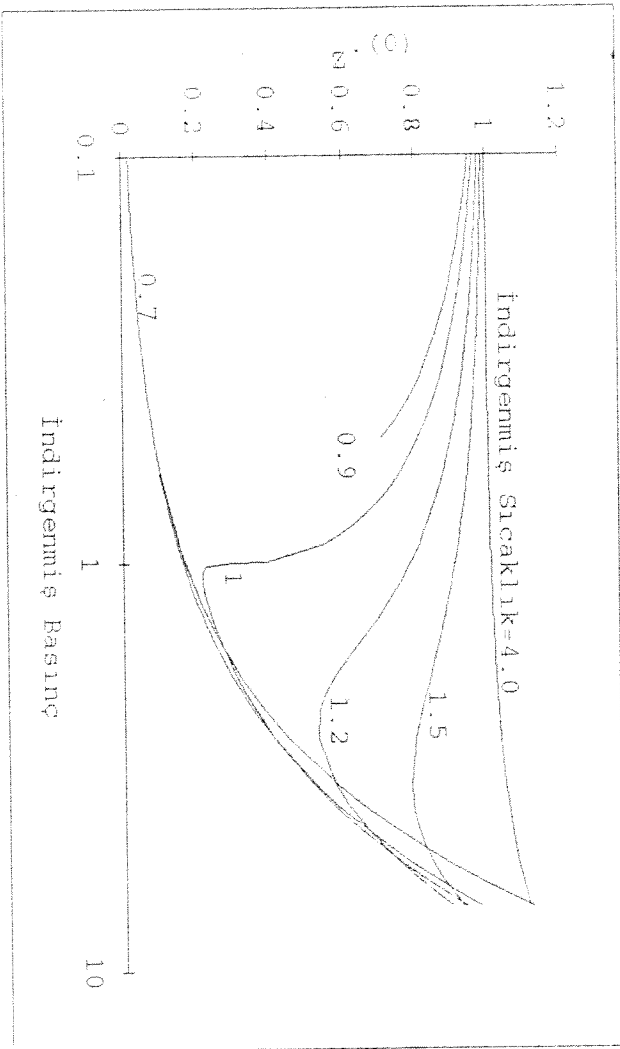
$$C = c_1 - \frac{c_2}{T_r} + \frac{c_3}{T_r^3} \quad (A.4)$$

$$D = d_1 + \frac{d_2}{T_r} \quad (A.5)$$

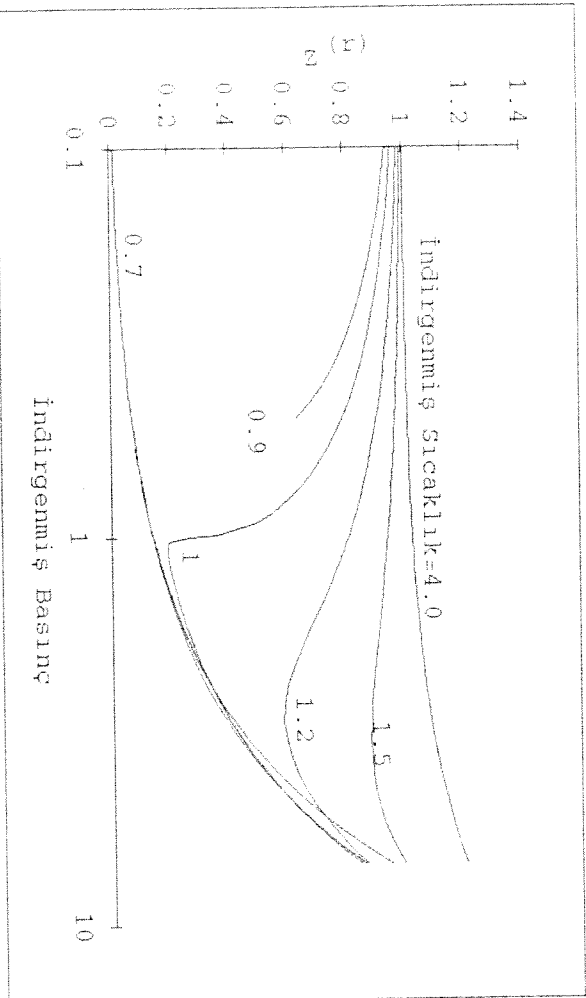
ve

$$V_r = VP_r^c / RT_r^c \quad (A.6)$$

Yukarıdaki denklemlerde iki tür sabit kullanılmaktadır, birincisi grupta basit akışkanlar için $\omega=0$ ve diğer grupta ise referans akışkan olan 'n-oktan' için $\omega^{(r)}=0.3978$ (bkz. Tablo A1). Şekil A1 ve Şekil A2' de bu denklemin grafiksel gösterimi her iki grup akışkan için verilmiştir.



Şekil A1. Basit Akışkan için Sıkıştırılabilirlik Faktörü



Şekil A2. Referans Akışkan için Sıkıştırılabilirlik Faktörü

Denklem A.2' deki termodinamik fonksiyonların türetilmesi

ise aşağıdaki şekilde olur:

Entalpi sapması:

$$\frac{H-H^*}{RT_c} = T_r \left\{ Z - 1 - \frac{b_2 + 2b_3/T_r + 3b_4/T_r^2}{T_r V_r} c_2 - \frac{3c_3/T_r^2}{2T_r V_r^2} + \frac{d_2}{5T_r V_r^5} + 3E \right\} \quad (A.7)$$

burada

$$E = \frac{c_a}{2T_r^3 \gamma} \left\{ \beta + 1 - \left(\beta + 1 + \frac{\gamma}{V_r^2} \right) \exp \left(-\frac{\gamma}{V_r^2} \right) \right\} \quad (\text{A. 8})$$

ISI SIFASLI, C_v SAPMASI :

$$\frac{C_v - C_v^*}{R} = \frac{2(b_1 + b_4/T_r)}{T_r^2 V_r} - \frac{3c_3}{T_r^3 V_r^2} - \frac{6E}{6E} \quad (\text{A. 9})$$

ISI SIFASLI, C_p SAPMASI :

$$\frac{C_p - C_p^*}{R} = \frac{C_v - C_v^*}{R} - 1 - T_r \left(\frac{\partial P_r}{\partial T_r} \right)_{V_r} / \left(\frac{\partial P_r}{\partial V_r} \right)_{T_r} \quad (\text{A. 10})$$

burada

$$\left(\frac{\partial P_r}{\partial T_r} \right)_{V_r} = \frac{1}{V_r} \left\{ 1 + \frac{b_1 + b_3/T_r^2 + 2b_4/T_r^3}{V_r} + \frac{c_1 - 2c_3/T_r^3}{2V_r^2} + \frac{d_1}{5V_r^5} \right.$$

$$\left. - \frac{2c_4}{T_r^3 V_r^2} \left[\left(\beta + \frac{\gamma}{V_r^2} \right) \exp \left(-\frac{\gamma}{V_r^2} \right) \right] \right\} \quad (\text{A. 11})$$

$$\left(\frac{\partial P_r}{\partial V_r} \right)_{T_r} = -\frac{T_r}{V_r^2} \left\{ 1 + \frac{2B}{V_r} + \frac{3C}{V_r^2} + \frac{6D}{V_r^5} \right. \\ \left. + \frac{c_4}{T_r^3 V_r^2} \left[3\beta + \left\{ 5 - 2 \left(\beta + \frac{\gamma}{V_r^2} \right) \right\} \frac{\gamma}{V_r^2} \right] \exp \left(-\frac{\gamma}{V_r^2} \right) \right\} \quad (\text{A. 12})$$

Sabit	Basit Referans		Sabit Basit Referans	
	Akışkan	Akışkan	Akışkan	Akışkan
b_1	.11812	.20265	c_3	.0
b_2	.26573	.33151	c_4	.04272
b_3	.15479	.02766	$d_1 \times E + 4$.48736
b_4	.03032	.20349	$d_2 \times E + 4$.07403
c_1	.02367	.03134	β	.65392
c_2	.01869	.05036	γ	.06017
				.03754

Tablo A.1. Denklem A.2-A.12' deki Sabitler

Z faktörünü hesaplamak için A.2 numaralı denklemin uygulanmasında, Tablo 1' deki sabitlerin yanısıra kritik sıcaklık, T_c ve kritik basınç P_c ve ilgili akışkanın 'asentrik' Faktörü, ω ' ye gereksinim vardır (saf ya da karışım olmasa bunu değiştirmemektedir). Hesaplanan sözd-kritik özellikler

'Bağıntılı Durumlar' ilkesinden yararlanarak elde edilir. Karışımlar için kritik özellikler aşağıdaki tanımlardan yola çıkılarak bulunur. Kay'ın karışım kuralından daha iyi sonuç veren tanımlar bu çalışmada kullanılmışlardır:

$$V_g = Z_g RT_g / P_g \quad (\text{A.13})$$

$$Z_g = 0.2905 - 0.085\omega_g \quad (\text{A.14})$$

$$V_g = \frac{1}{8} \sum_j Y_j Y_k (V_g^{1/3} + V_k^{1/3})^3 \quad (\text{A.15})$$

$$T_g = \frac{1}{81 V_g} \sum_j Y_j Y_k (V_g^{1/3} + V_k^{1/3})^3 \sqrt{T_g T_k} \quad (\text{A.16})$$

$$\omega = \sum_j Y_j \omega_j \quad (\text{A.17})$$

$$P_g = Z_g RT_g / V_g = (0.2905 - 0.085\omega) RT_g / V_g \quad (\text{A.18})$$

Verilen bir sıcaklık ve basınçta denklem A.7 ile A.12 arasındaki herhangi bir terimi hesaplayabilmek için aşağıdaki yöntem sırası izlenmelidir:

1. T_r ($=TT_g$), P_r ($=P/P_g$) ve ω 'yi hesapla.
2. $Z^{(0)}$ 'i hesaplamak için A.2 denklemi, T_r ve P_r ile basit akışkan sabitlerini kullanarak $V_r^{(0)}$ 'i bul.
3. Aynı denklemi, $Z^{(r)}$ 'yi bulmak için, T_r ve P_r değerlerini ve referans akışkan sabitlerini kullanarak $V_r^{(r)}$ için çöz.
4. A.1'i kullanarak, birinci basamaktaki $Z^{(0)}$ ve $Z^{(r)}$ ve ω 'yi yerine koyarak Z 'yi hesapla.
5. Termodinamik fonksiyonları hesaplamak için A.7'den A.12'ye kadar olan grupta uygun ifadeyi kullan. Örneğin, entalpi sapması A.7'den elde edilebilir: Önce basit akışkan sabitleri ve $V_r^{(0)}$, $Z^{(0)}$ ikilisini kullanarak $[(H-H^*)/RT_g]^{(0)}$ bulunabilir; sonra üçüncü basamakta anlatıldığı gibi $[(H-H^*)/RT_g]^{(r)}$ hesaplanabilir. Z hesabında olduğu gibi entalpi sapması aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilir: :

$$\frac{H-H^*}{RT_c} = \left(\frac{H-H^*}{RT_c} \right)^{(0)} + \left(\frac{\omega}{\omega^{(j)}} \right) \left[\left(\frac{H-H^*}{RT_c} \right)^{(j)} - \left(\frac{H-H^*}{RT_c} \right)^{(0)} \right] \quad (\text{A.19})$$

Aranan ilgili özelliklerin değerleri, ideal gaz durumu temel alınarak ve sıcaklık-basınç etkilerini birleştirerek bulunur. Entalpi için:

$$H = (H-H^*) + (H^*-H_0^*) + H_0^* \quad (\text{A.20})$$

burada

$H = T$ sıcaklığında ve P basıncındaki entalpi

$(H-H^*) =$ Denklem A.17' den elde edilen entalpi sapması

$(H^*-H_0^*) =$ ideal gaz durumundaki entalpi

$H_0^* = \Delta H_{f0}^*$ = ideal gaz için 0°R' de oluşma entalpisi

$H_0^* = 0$, temel alınan ideal gaz durumunda bileşiğin 0°R'

de entalpisi 0 alınır.

Aynı kural özel ısı hesaplamalarında da geçerlidir.

izobarik ve izokorik ısı kapasiteleri aşağıdaki formüllerden

bulunabilir:

$$C_p = (C_p - C_p^*) + C_p^* \quad (\text{A.21})$$

$$C_v = (C_v - C_v^*) + C_v^* \quad (\text{A.22})$$

burada $C_p =$ izobarik ısı kapasitesi (T ve P' de)

$C_v =$ izokorik ısı kapasitesi (T ve P' de)

$C_p - C_p^* =$ izobarik ısı kapasitesi kalanı, denklem A.10

$C_v - C_v^* =$ izokorik ısı kapasitesi kalanı, denklem A.11

İdeal gaz durumundaki özellikler sıcaklığın monotonik fonksiyonu olduğundan, alışlagelmiş hesaplamada bu ısı kapasite değerlerini analitik denklemler yardımıyla göstermek yerinde olur. Passut ve Danner (Edmister ve Lee, 1984) $(H^*-H_0^*)$ ve C_p^* için aşağıdaki ilişkileri önermiştir:

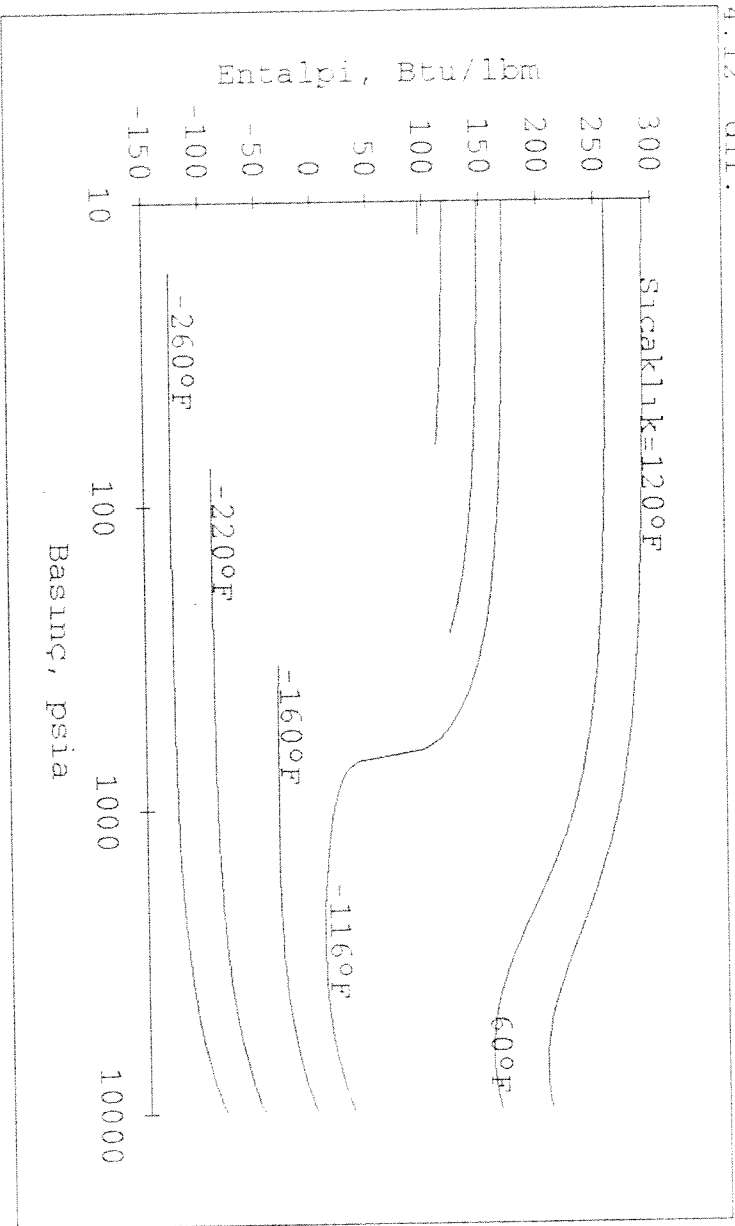
$$(H^* - H_0^*) = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 + FT^5 \quad (\text{A.23})$$

$$C_p^* = B + CT + DT^2 + ET^3 + FT^4$$

(A.24)

C_p^* tanım gereği $C_p^* \cdot R'$ ye eşittir. Yukarıdaki denklemlerde görülen sabitler başka bir kaynakta da kolaylıkla bulunabilir (Edmister ve Lee, 1984).

Veri, denklem ve yöntem sırası yardımıyla metan için $H-P$ grafiği örnek olarak oluşturulmuştur. Bilinen ortalama mutlak sapma değeri metan için 1.12 Btu/lbm' dir, (Lee ve Kesler, 1975). Bu çalışma ayrıca değişik bileşen ve bileşik için sıkıştırılabilirliği karşılaştıran bir tablo sunmaktadır. H_2S ile doymuş subuharı için en büyük ortalama sapma değeri yüzde 4.12' dir.



Şekil A3. Metan için Entalpi-Basınç Grafiği

EK B

DOĞAL GAZ İÇİN Z-FAKTÖRÜ

Entalpi ve özel ısı oranı hesaplamalarının gerekli olmadığı izotermal durum için Z-faktörü Dranchuk ve Abou-Kassem yöntemi ile bulunur (Dranchuk ve Abou-Kassen, 1975). Bu yöntem Lee-kesler yönteminden çok daha hızlıdır.

Z-faktörü hesaplaması genelleştirilmiş Starling EOS yaklaşımını temel alır. Z faktörü göstermesi için bu anılan

denklem aşağıdaki gibi yazılır:

$$Z = 1 + \left(A_1 + \frac{A_2}{T_r} + \frac{A_3}{T_r^2} + \frac{A_4}{T_r^3} + \frac{A_5}{T_r^4} \right) P_r + \left(A_6 + \frac{A_7}{T_r} + \frac{A_8}{T_r^2} \right) P_r^2 - A_9 \left(\frac{A_7}{T_r} + \frac{A_8}{T_r^2} \right) P_r^3 + A_{10} (1 + A_{10} P_r^2) \frac{P_r^2}{T_r^3} \exp(-A_{10} P_r^2) \quad (\text{B.1})$$

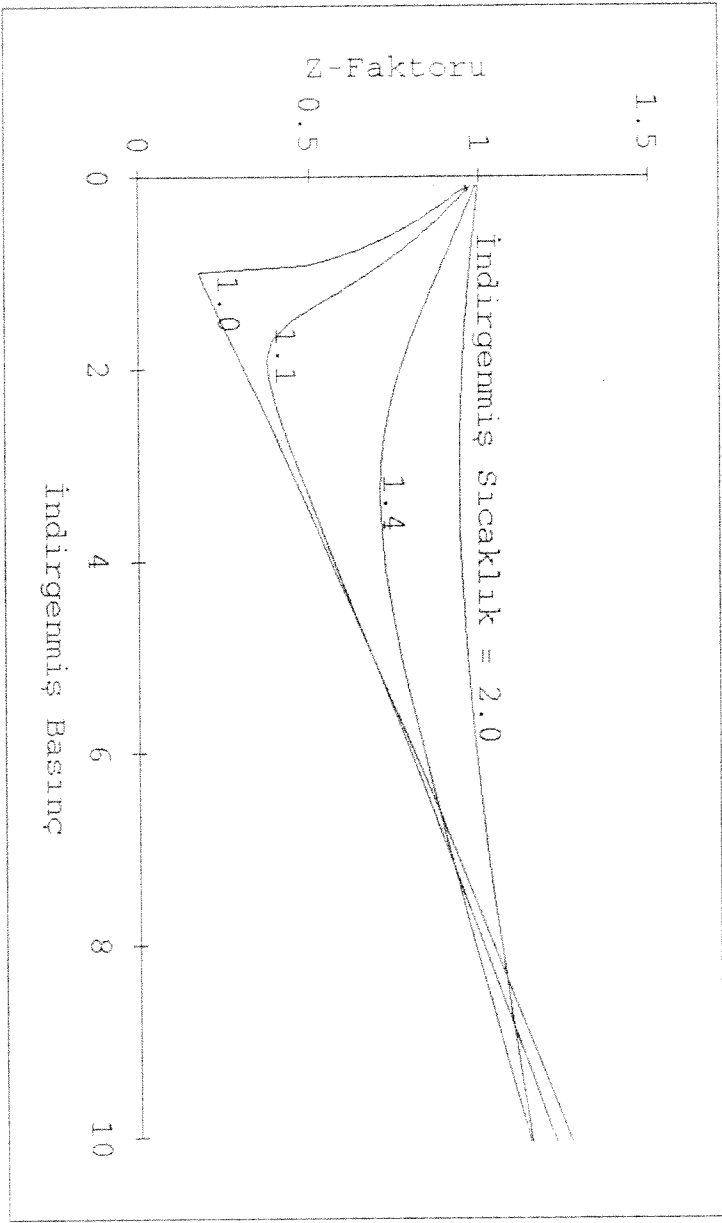
ve indirgenmiş yoğunluk da:

$$P_r = \frac{Z_c P}{Z T_r} \quad (\text{B.2})$$

şeklinde yazılabilir, burada $Z_c = 0.27$ ve

$$A_1 = 0.2365, \quad -1.07, \quad -0.5339, \quad 0.1569, \quad -0.05165 \\ 0.5475, \quad -0.7361, \quad 0.1844, \quad 0.1056, \quad 0.6134, \quad 0.721$$

Bu iki denklem Newton-Raphson döngü tekniği ile çözülebilir. Yazarlar Z faktörü değerlerini Standing ve Katz korelasyon verileriyle karşılaştırdıklarında ortalama mutlak hatanın yüzde 0.307 olduğunu rapor etmektedirler. Şekil B.1' de değişik T_r değerleri için Z- P_r grafiğini vermektedir. Z değerleri bu yöntem kullanılarak yeniden üretilmiştir.



Şekil B.1 Doğal Gaz için Değişik İndirgenmiş Sıcaklık ve Basınçlarda Sıkıştırılabilirlik Faktörü, Z.

EK C

SÜRTÜNME FAKTÖRÜ

Boru akışı problemlerinde basınç düşümü hesapları bir sürtünme faktörünün eklenmesi gerekliliğini doğurur.

Sürtünme faktörü pürüzlülüğü ve akış karakteristiklerine bağlıdır. Bu nedenle bu faktör Reynolds sayısının ve görelî pürüzlülüğün fonksiyonudur:

$$f = f(N_{Re}, \epsilon/d) \quad (C.1)$$

burada verilen Reynolds sayısı saha birimleri kullanılarak şu

şekilde verilebilir:

$$N_{Re} = 710.39 \frac{P_{sc} q_{sc} l \epsilon}{T_{sc} d u} \quad (C.2)$$

Laminar tek fazlı akış için:

$$f = 64 / N_{Re} \quad (C.3)$$

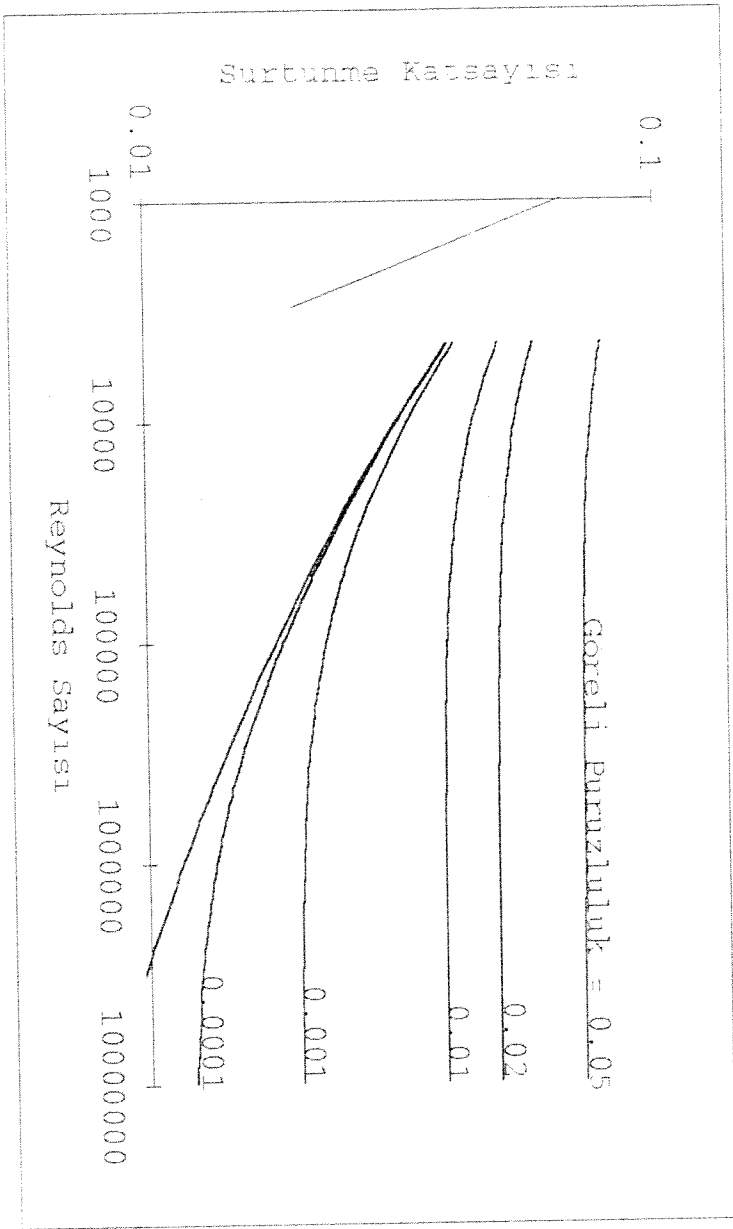
Ancak kısmi ya da tam 'turbulent' tek fazlı akışta sürtünme Faktörü N_{Re} ve ϵ/d ' ye bağlıdır. Literatürde bu bağıntı için birçok korelasyon vardır, (Ikoku, 1984). Örneğin, düzgun (pürüzsüz) borular için Prandtl' in ya da Blasius' un formülü uygulanabilir. Ayrıca, pürüzlü borular için Colebrook' un denklemleri uygundur. Swamee ve Jain tarafından sürtünme faktörü için açık bir korelasyon verilmiştir, (Ikoku, 1984):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{\epsilon}{d} + \frac{21.25}{N_{Re}^{0.9}} \right) \quad (C.4)$$

Bu denklem $10^{-6} < \epsilon/d < 10^{-2}$ aralığında ve $5000 < N_{Re} < 10^8$ arasında yüzde 1 hata ile uygulanabilir. Bu çalışmada sürtünme faktörünün değiştiği durumlar gözönüne alındığında yukarıdaki denklem kullanılmıştır.

Ortalama sürtünme faktörüne alternatif olarak, birazdan anlatılacak olan yöntem sırası bu faktör için kullanılabilir:

İlk olarak Re_c akış rejimine karar vermek için hesaplanmalıdır. Eğer 2000' den küçükse laminar akış formülasyonu kullanılır (C.3); diğer durumda 'turbulent' akış korelasyonu (C.4) uygulanır. Şekil C.1 bu denklemleri kullanarak Moody sürtünme faktörünü Re_c ve ϵ/d ' nin fonksiyonu olarak göstermektedir.



Şekil C.1 Boru Akışı için Moody Sürtünme Faktörü

DOĞAL GAZIN AKMAZLIĞI

Ek C'de belirtildiği gibi, ortalama bir değer yerine bağımlı değişken olarak sürtünme kuvveti düşünüldüğünde, doğal gazın akmazlığı da bilinmelidir. Petrol ve doğal gaz endustrisinde , gaz akmazlığı genel olarak Carr, Kobayashi ve Burrows korelasyonları uygulanılarak belirlenir, (Kumar, 1987). Carr korelasyonlarının akmazlığın belirlenmesi için sadece gazın gravitesine (ya da moleküler ağırlığına) gereksinimini vardır. Korelasyonlar grafiksel olarak ifade edilmektedir. Yöntem basitçe iki basamağı içermektedir. Birincil olarak gazın görünür ağırlığı ve akmazlığın istendiği sıcaklık kullanılarak atmosferik basınçta ve istenen sıcaklıkta gaz akmazlığı, μ_1 bulunmalıdır. Eğer gaz N_2 , H_2S ya da CO_2 içeriyorsa bulunan μ_1 değeri her yabancı bileşen için doğal gaz içerisinde o bileşenin konsantrasyonuna ve gazın gravitesine bağlı olarak düzeltilmelidir. İkinci basamakta ise istenen sıcaklık ve basınçta gaz akmazlığının μ_1 e oranı bulunmalıdır.

Bu yöntem grafiksel çözümü kullandığı için makine hesaplamalarında ilk şekliyle kullanılamamaktadır. Bu sorunu çözmek için Dranchuk (Dranchuk, 1986) μ_1 ve μ/μ_1 değişkenlerinin grafiksel davranışlarını polinomik ifadelerle belirlemiştir. Hesaplamalar aşağıda özelleştirilmiştir:

Dranchuk ve diğerleri (yazarlar) μ_1 ve μ/μ_1 değerlerini yeniden üretmek için ortogonal polinomlar kullanmışlardır. μ_1

şu şekilde yazılabilir:

$$\mu_1 = (\mu_{1 \text{ uncorrected}}) + (N_2 \text{ correction}) + (CO_2 \text{ correction}) + (H_2S \text{ correction}) \quad (D.1)$$

burada

$$(\mu_1 \text{ uncorrected}) = [1.709 \cdot 10^{-5} - 2.062 \cdot 10^{-6} \gamma_g] T + 8.188 \cdot 10^{-3} - 6.15 \cdot 10^{-3} \log \gamma_g \quad (\text{D.2})$$

$$(N_2 \text{ correction}) = Y_{N_2} [8.48 \cdot 10^{-3} \log \gamma_g + 9.59 \cdot 10^{-3}] \quad (\text{D.3})$$

$$(CO_2 \text{ correction}) = Y_{CO_2} [9.08 \cdot 10^{-3} \log \gamma_g + 6.24 \cdot 10^{-3}] \quad (\text{D.4})$$

$$(H_2S \text{ correction}) = Y_{H_2S} [8.49 \cdot 10^{-3} \log \gamma_g + 3.73 \cdot 10^{-3}] \quad (\text{D.5})$$

μ/μ_1 , yüzeyini A, B, C isimli üç bölgeye ayırılmışlar ve bu bölümleri ortogonal polinomlar yardımıyla aşağıdaki gibi benzetmişlerdir:

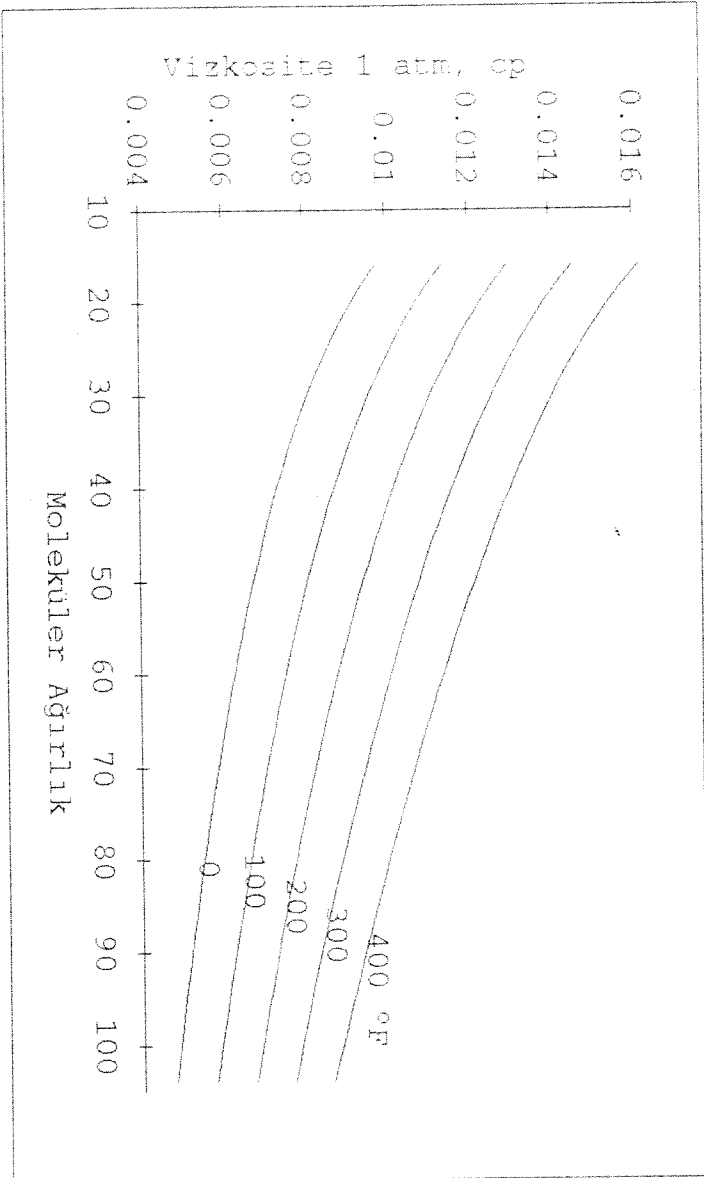
$$\log(\mu/\mu_1) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^{i+1} \alpha_j (\log P)^{j-1} (\log T)^{i-j+1} \quad (\text{D.6})$$

burada

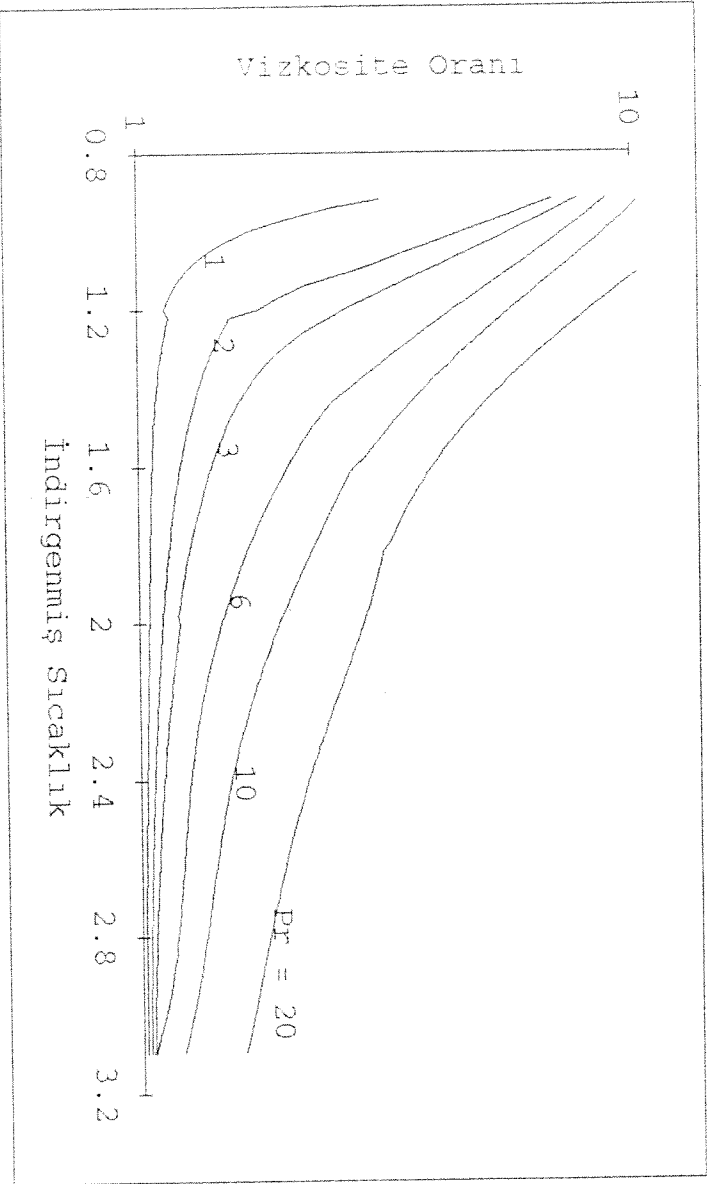
$$\log P = \frac{\log(P) - \log(P_{r,\min})}{\log(P_{r,\max}) - \log(P_{r,\min})} \quad (\text{D.7})$$

$$\log T = \frac{\log(T) - \log(T_{r,\min})}{\log(T_{r,\max}) - \log(T_{r,\min})} \quad (\text{D.8})$$

Bu düzeltme ile akma zıllık değeri ortalama mutlak olarak yüzde 0.95' lik bir yanılığı payı ile yeniden üretilebilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde Carr ve diğerlerinin yarattığı grafikler yeniden üretilmiş ve bu yeni yöntemin uygunluğu incelenmiştir, (bkz Şekil D.1 ve D.2).



Şekil D.1 Parafinik Hidrokarbon Gazlar için 1 atm' de Akmaçlık



Şekil D.2 Akmaçlık Oranı - İndirgenmiş Sıcaklık Grafiği

EK E
PIPESİM KULLANIM KILAVUZU
GİRİŞ

Pipesim doğal gazın bir boru hattındaki akışını modelleyen, sonlu farklar tekniği kullanılarak geliştirilmiş bir paket programdır. Programın çalışması için AT uyumlu, 640KB hafızalı ve matematik işlemcili bir bilgisayar gerekmektedir. Pipesim kullanıcıya kolaylıklar sağlayan niteliklere sahiptir. Program fare (mouse) yada klavye kullanımını desteklemektedir. Programın kolaylıkla işletilebilmesini sağlamak için menüler ve fonksiyon tuşları programlanmıştır.

PROGRAMIN ÇALIŞTIRILMASI

Pipesim DOS işletim sistemi ile çalışmaktadır. Program sabit diskten yada disketten çalıştırılabilir. Bunun için "pipesim" komutunu girmek yeterlidir. Bu komut girildikten sonra ekranda bir menu sistemi görülecektir. Aşağıdaki bölümde menu sisteminin kullanımını açıklanmıştır.

ANA MENÜ

Program çalıştırıldığında ekranda görülen menu sistemi ana menüdür. Ana menu üç bölümden oluşmaktadır:

- i) Üst menu satırı
 - ii) Pencere bölümü
 - iii) Klavye komut satırı
- Üst menu satırında dört alt menüden oluşan bir alt menüler grubu bulunmaktadır. Eşitlik simgesi ile belirtilen alt menude programın yazılım tarihi ve yazarı ile ilgili bilgiler bulunmaktadır. "File" (Dosya) alt menüsünde ise sırası ile aşağıda belirtilen alt menüler bulunmaktadır;

- i) "Open" : Bu alt menu ile programa gerekli verilerin sağlandığı dosyalar değiştirilir. "F3", yani üçüncü fonksiyon tuşuna basılarak aynı işlem yapılabilir.

ii) "Save" : Veri dosyasının kaydedilmesini sağlar. "F?" tuşu aynı işlemin klavyeden yapılmasını sağlar.

iii) "Save as..." : Bu komut ile işlenen dosya değişik bir isimle kaydedilebilir.

iv) "Change dir..." : Çalışılan dizinin değiştirilmesini sağlar.

v) "DOS shell" : Bu komut ile belirli bir süre DOS işletim sistemine geçilir ve DOS işlemleri yapılabilir. İşlemler bittikten sonra "exit" komutu ile programa geri döndür.

vi) "Exit" : Bu komut ile programdan çıkılır ve DOS işletim sistemine döndür. Aynı işlem ALT ve x tuşlarına aynı anda basılarak da yapılır.

Ana menüde bulunan üçüncü alt menü olan "Pipesim" açıldığında ise iki alt menü görünür;

i) "Parameters" : Bu alt menü kullanılarak programa gerekli diğer bilgiler sağlanır. Ekranda gösterilen pencerede gözüm metodu "Solution Method" Gauss-Seidel veya Gauss Elimination olarak seçilir. Çözüm metodu ile birlikte veri dosyası, "Input Data File" ve çıktı dosyası, "Output Data File" girilir. "Enter" tuşuna veya "OK" butonuna basılarak ana menü sistemine döndür.

ii) "Run!" : Bu komut çalıştırıldığında program bir üstte seçenekten seçilen çözüm metodu ve dosyalarını kullanarak çalışır. Bu komutun çalışması için bir üst seçeneğin muhakkak değiştirilmesi gerekmektedir.

Ana menüde bulunan son alt menü ise "Windows", pencereler alt menüsüdür. Bu alt menü sekiz komut içermektedir;

i) "Size/move" : Ekrandaki pencerenin boyutunun değiştirilmesini yada hareket ettirilmesini sağlar. CTRL ve F5 tuşlarına aynı anda basılarak aynı işlemin yapılması mümkündür.

ii) "Zoom" : Ekrandaki pencerenin boyutlarının ekran boyutuna getirilmesini sağlar. Aynı işlev F5 tuşuna basılarak da sağlanabilir.

iii) "Tile" : Bu komut ile ekranda bulunan pencereler ekrana sıgacak şekilde aynı anda gösterilir.

iv) "Cascade" : Bu komut ile ekranda bulunan pencereler arka arkaya sıralanır.

v) "Next" : Bu komut ile ekranda bulunan pencerelerden bir sonraki görüntülenir. F6 tuşuna basılarak da aynı işlem yapılabilir.

vi) "Previous" : Bir önceki ekran görüntülenir. SHIFT F6 tuşları aynı işlevi görür.

vii) "Close" : Ekranda görüntülenen pencere kapanır. Bu komut ALT F3 tuşlarına basılarak da yapılabilir.

viii) "Calculator" : Bu komut ile basit bir hesap makinesi geliştirilir.

Ana ekranda alt satırda bazı menü komutlarına kısa olarak nasıl ulaşılabileceği belirtilmiştir. Menüler haricinde ekranın sağ üst köşesinde saat ve sağ alt köşesinde ise serbest hafıza miktarı görüntülenir. Serbest hafıza miktarı nekadardayıkse okunabilecek dosya boyutu da o kadar büyüür.

VERİ DOSYASI

Pipesim programının çalışması için bazı verilerin bir dosya aracılığıyla girilmesi gerekmektedir. Bu veriler serbest yazı formuyla girilebilir. Örnek olarak "osiadm.dat" dosyası görüntülediğinde ekranda bir rakam dizisi görülür. Bu rakamlar girilmesi gereken verilerdir ve sırası ile şunlardır;

benzetim zamanı : saniye
sürtünme katsayısı : birimsiz
kütle debisi : lpm/cuft
boru çapı : ft
ses hızı : ft/saniye
benzetim zaman boyu : saniye
boru uzunluğu : ft
benzetim nokta sayısı : birimsiz
ilk basınç : psf
sınır koşulu : 1 (giriş basınç - çıkış debi), 2
(giriş debi-çıkış debi)

Yukarıda tanımlanan veriler, veri dosyasının ilk satırını oluşturur. İkinci satıra ve sonrasına ise sınır koşulları ile ilgili veriler girilmelidir. İkinci satırda girilen tek veri kaç tane zamana bağımlı sınır koşulu girileceğini belirtir. Örnek olarak bu alana 5 girilirse bu satırdan sonra 5 adet zamana bağımlı sınır koşulu girilmelidir. Sınır koşulu at+b şeklinde lineer olarak tanımlanmıştır. İlk girilen veri "a" parametresi, ikinci girilen ise "b" parametresidir. Üçüncü girilen ise bu sınır koşulunun hangi zamana kadar geçerli olacağını belirten zaman değeridir. Örnek olarak bütün simülasyon boyunca girişte basınç sabit olarak 102729 psf. de sabit tutulacaksa, ikinci satıra 1 yazılır ve onu izleyen satıra 0.0 102729.0 ve 86400.0 yazılır. Girişteki sınır koşulu tanımlandıktan sonra çıkıştaki sınır koşulu yukarıdaki gibi tanımlanır. Sınır koşulları tanımlandıktan sonra benzetim yapılacak nokta sayısı kadar eğim değeri girilir. Eğim değeri olarak sıfır verilirse yatay borular ile benzetim yapılır.

HATA MESAJLARI

Programın işlemesi sırasında bazı durumlarda hata mesajı alınabilir. Bu hata mesajları aşağıda özetlenmiştir:

- i) Programın hiç çalışmama durumu : Bu duruma yeterli hafıza olmaması yada matematik işlemci olmaması durumunda rastlanır. Bu durumda çalışılacak olan PC'nin değiştirilmesi gerekmektedir.
- ii) Program çalışırken DOS işletim sistemine atılma durumu : Çözüm metodu olarak Gauss-Seidel metodu seçilirse ki iteratif bir methodur, ve zaman değişim boyutu ortaya çıkan sistemin çözümünü gerçek çözümden uzaklaştırırsa bu durumla karşılaşılabilir. Hernekadar program otomatik zaman boyutunu ayarlama özelliğine sahipse de bazen bu durumla karşılaşılabilir. Bu durumda veri dosyasında benzetim zaman boyutunun azaltılması gerekmektedir.

SONUÇLAR

Program başarı ile benzetimi bitirdiğinde sonuçlar ekranda görüntülenir. Sonuçların ilk bölümünde başlangıç koşulu olarak girilen kararlı akış durumu için hesaplanan basınç değerleri ve bu basınçların boru hattındaki yerleri görüntülenir. Daha sonraki bölümlerde ise giriş ve çıkış basıncı ve/veya debisi görüntülenir. Bu görüntülenen dosya "Parameters" alt menüsünde belirtilen adla saklanır. Elde edilen veri "Excel", "Qpro", "Lotus" ve benzeri yazılımlar kullanılarak grafiksel olarak görülebilir.

EK F

TRANFLOW KULLANIM KLAVUZU

Doğal gaz boru hattında kararsız akış benzetimi yordamı TRANFLOW'u çalıştırmak için TRANFLOW adlı rehberle yönelip TRANS komutunu vermek gerekir. Bu kütük öncelikle zamana göre değişimlerin (basınç ve/veya akış hızı) kaydedildiği kütüğü benzetim yordamının anlayacağı hale dönüştürmekte ve sonra kontrolü asıl yordama bırakmaktadır.

Gerekli bütün veriler kütükler ile benzetim yordamına aktarılır. Bu kütükler ve yapıları aşağıda ayrıntılı açıklanmıştır.

TRANFLOW.DAT

Birinci satır: Sınır durumu tipi (anlamı daha önce aktarılmıştır bkz. sayfa 12). Formatsız.

İkinci satır (n): Boru hattını meydana getiren bölüm sayısı. Formatsız.

Üçüncü satırdan (n+3)'e kadar (bu satır dahil): Boru hattının o bölüm ile ilgili bilgileri. Format 14, 4F10.x. Bu bilgiler sırasıyla; grid sayısı, boru çapı (ft), boru uzunluğu (ft), sürtünme katsayısı ve giriş ile çıkış arasındaki yükseklik farkıdır.

(n+4)'üncü satır: İlk andaki giriş basıncı (psia) ve akış hızı (10⁶ standart ft³/Gün). Format 2F12.x.

TRNTIME.ARA

Birinci satır (n): Hat girişindeki değişkenin (basınç veya akış hızı) zaman içinde toplam değişim sayısı. Formatsız.

İkinci satırdan (n+1)'e kadar: Hat girişinde değişimin meydana geldiği zaman (dakika), değişken ve bir sonraki

değişime kadar inceleme sırasında kullanılacak en küçük zaman aralığı (dakika). Format 3F8.X.

(n+2)'nci satır (m): Hat çıkışındaki değişkenin (basınç veya akış hızı) zaman içinde toplam değişim sayısı. Formatsız.

(n+3)'ncü satırdan itibaren m satır: Çıkış ile ilgili bilgiler. Yapısı ve formatı girişinki ile aynıdır.

Basınç birimi psia, akış hızı birimi 10^6 standart ft³/gün olarak girilmelidir.

Diğer kütüklerde herhangi bir değişikliğe gerek yoktur.

EK G

TRNONISO KULLANIM KILAVUZU

Doğal gaz boru hattında kararsız ve sıcaklığa bağlı akış benzetimi yordamı, TRNONISO'yu çalıştırmak için TRNONISO adlı rehberle yönelip NONISO komutunu vermek gerekir. Bu kutuk öncelikle zamana göre değişimlerin (basınç, akış hızı ve sıcaklık) kaydedildiği kutuğu benzetim yordamının anlayacağı hale dönüştürmekte ve sonra kontrolü asıl yordama bırakmaktadır. Gerekli bütün veriler kutukler ile benzetim yordamına aktarılır. Bu kutukler ve yapıları aşağıda ayrıntılı açıklanmıştır.

TRNONISO.DAT

Birinci satır: Sınır durumu tipi. Formatsız.

İkinci satır (n): Boru hattını meydana getiren bölüm sayısı. Formatsız.

Üçüncü satırdan (n+3)'e kadar (bu satır dahil): Boru hattının o bölüm ile ilgili bilgileri. Format I4, 7P9.x. Bu bilgiler sırasıyla; grid sayısı, uzunluk (mil), iç boru çapı (inç), dış boru çapı (inç), boru uzunluğu (ft), giriş ile çıkış arasındaki yükselik farkı (ft), göreceli pürüzlük, toprak sıcaklığı (°R), genel ısı transferi katsayısıdır (Btu/ft²-saat-°R).

(n+4)'üncü satır: İlk andaki giriş basıncı (psia), akış hızı (10⁶ standart ft³/Gün) ve sıcaklığı (°R). Format 3F12.x.

TRRNTIME.ARA

Birinci satır (n): Hat girişindeki değişkenin (basınç veya akış hızı) zaman içinde toplam değişim sayısı. Formatsız.

ikinci satırdan (n+1)'e kadar: Hat girişinde değişimin meydana geldiği zaman (dakika), değişken, sıcaklık ve bir sonraki değişime kadar inceleme sırasında kullanılacak en küçük zaman aralığı (dakika). Format 4F8.x.

(n+2)'nci satır (m): Hat çıkışındaki değişkenin (basınç veya akış hızı) zaman içinde toplam değişim sayısı. Formatsız. (n+3)'ncü satırdan itibaren m satır: Çıkış ile ilgili bilgiler. Yapısı ve formatı girişinki ile aynıdır.

Basınç birimi psia, akış hızı birimi 10^6 standart ft³/gun olarak girilmelidir.

GASCOMP.DAT

Birinci satır (n): Gaz içerisindeki temel hidrokarbon bileşiklerin sayısı.

İkinci satırdan (n+1)'e kadar: Bileşik index sayısı ve o bileşiğin mol oranı. Format I4, F12.x. Bileşik index sayısı gaz içerisinde bulunan bileşiğin GASPROP.DAT adlı kutükte yer aldığı satır sayısıdır.

Son satır: CO₂, N₂ ve H₂S'in gaz içerisindeki mol oranlarıdır. Format 3F12.x

Diğer kutüklerde herhangi bir değişikliğe gerek yoktur.

BİBLİYOGRAFİK BİLGİ FORMU	
1- Proje No: MAG 974-YBAG 0027	2- Rapor Tarihi: 1.4.1994
3- Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 1.9.1992 - 31.8.1993	
4- Projenin Adı: Doğal Gazın Boru Hatları İçerisinde Geçici ve İzotermal Olmayan Şartlardaki Akışının Simülasyonu	
5- Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar: Y.Doc.Dr.Fariborz Rashidi Araş.Gör.Serhat Akın Araş.Gör.Murat Arıkan Araş.Gör.İsmail Durgut	
6- Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Petro1 Mühendisliği Bölümü ODTÜ, ANKARA	
7- Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: TÜBİTAK	
8- Öz (Abstract): Sabit olmayan (unsteady) veya geçici (transient) durumlar göz önüne alınarak planlanmış doğal gaz taşıma sistemleri etkin ve verimli bir işletme ortamı doğurur. Optimum planlamada herne kadar dikkat değişiklik göstermeyen, sabit (steady) yükleri destekleyecek şekilde yapılsa bile, bu çeşit ortamlar ancak teorik durumlarda karşılaşılar. Oysa, gerçek işletme ortamlarında, zaman içerisinde doğal gaz iletim sisteminin herhangi bir noktasında geçici olarak oluşabilecek bir değişiklik bu sabitlik kavramını geçersiz kılar. Herhangi bir gaz kompresörünün arızalanıp bir süre için devre dışı kalması, şebekenin satış ve dağıtım noktalarında ani olarak arz veya talepte meydana gelebilecek değişimler veya müşterinin zaman içerisinde değişken miktarlarda doğal gazı ihtiyaç duyması veya sistem sıcaklığında oluşabilecek değişken veya geçici ortamları hazırlayan birkaç örnektir. Bu nedenle, doğal gaz taşıma sistemlerinde muhtemelen oluşabilecek geçici durumların analiz edilmesi ekonomik açıdan önem taşır. Bu proje çerçevesinde doğal gaz taşıma sistemlerinde oluşabilecek sabit veya geçici olmayan durumların ve izotermal olmayan durumların söz konusu olduğu doğal gaz taşıma sistemlerini benzeten bilgisayar paket programları geliştirilmiş ve değişik sınır koşullarını içeren örneklerle birlikte sunulmuştur. Geliştirilen programların hızlı ve etkili olduğu ve doğru sonuçlar verdiği literatürde sunulan örneklerle doğrulanmıştır. Anahtar Kelimeler: Doğal Gaz, Boru hattı, Geçici durum, İzotermal olmayan akış Simülatör	
9- Proje ile ilgili Yayın/Tebliğlerle ilgili Bilgiler Serhat Akın ve Fariborz Rashidi "Simulation of Transient Natural Gas Flow in Pipelines", İstanbul 1.Uluslararası Doğal Gaz Kullanımı ve Dönüşümü Sempozyumu, 26-29 Kasım 1992, İSTANBUL	
10- Bilim Dalı: Doçentlik B. Dalı Kodu: Uzmanlık Alanı Kodu:	ISIC Kodu:
11- Dağıtım (*) : <input checked="" type="checkbox"/> Sınırlı BOTAS	<input type="checkbox"/> Sınırsız
12- Raporun Gizlilik Durumu :	<input type="checkbox"/> Gizli <input checked="" type="checkbox"/> Gizli Değil

(*) Projenizin Sonuç Raporunun ulaştırılmasını istediğiniz kurum ve kuruluşları ayrıca belirtiniz