

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK DEBİLİ SİSTEMLERDE HİDROSTATİK
BASINÇ TEST DÜZENİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Mak. Müh. Ümit DEMİREL

**F.B.E Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ahmet KOYUN

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1 GİRİŞ	1
2 KOMPOZİT MALZEME	4
2.1 Kompozit Malzemenin Tarihsel Gelişimi	4
2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	8
2.3 Cam Elyaflar	9
2.3.1 Takviye Amaçlı Cam Elyafı Biçimlerine Göre Sınıflandırılması	12
2.3.1.1 Keçe	13
2.3.1.2 Fitol	13
2.3.1.3 Kumaş (Dokuma)	14
2.3.1.4 Kırılmış Cam Elyafı	15
3 CAM ELYAF TAKVİYELİ TERMOSET PLASTİK KOMPOZİTLER	17
3.1 CTP Malzeme	17
3.2 CTP Malzemenin Tarihsel Gelişimi	18
3.3 CTP'nin Avantajları	20
3.4 CTP Üretiminde Kullanılan Malzemeler	20
3.4.1 Polyester Reçineler	21
3.4.2 Hızlandırıcılar	21
3.4.3 Dolgu Maddeleri	21
3.4.4 Boyalar	22
3.4.5 Katalizörler	22
3.4.6 Kalıp Ayrıcılar	23
3.4.7 Takviye Malzemeleri	23
3.5 CTP Üretim Yöntemleri	23
3.5.1 El Yatırması Yöntemi	24
3.5.2 Püskürtme Yöntemi	25
3.5.3 Reçine Enjeksiyonu Yöntemi	27
3.5.4 Soğuk Pres Yöntemi	28
3.5.5 Elyaf Sarma Yöntemi	29
3.5.6 Savurma Döküm Yöntemi	30
3.5.7 Devamlı Levha Üretim Yöntemi	31

3.5.8	Hazır Kalıp Bileşimleri.....	31
3.5.9	Profil Çekme Yöntemi.....	32
3.6	CTP'nin Kullanım Alanları.....	33
3.7	CTP borular.....	34
4	CTP BORU HİDROSTATİK BASINÇ TEST CİHAZININ TASARIMI.....	36
4.1	İlgili Standartlar.....	37
4.2	Test Senaryosu.....	38
4.3	Basınç Test Cihazının Gelişim Aşamaları.....	38
4.3.1	İki Valfli Basınç Test Cihazı.....	39
4.3.2	Dört Valfli Basınç Test Cihazı.....	41
4.4	Cihaz Tanıtımı.....	42
4.5	Cihazın Elemanları.....	43
4.5.1	Sabit Kafa.....	46
4.5.2	Hareketli Kafa Sabit.....	47
4.5.3	Hidrolik Ünitesi.....	48
4.5.4	Hareketli Kafa Hareketli.....	49
4.5.5	Hidrolik Kaldırma Sistemi.....	50
4.5.6	Su Sistemi Alanı.....	52
4.5.7	Boru Sıkma Pistonları.....	53
4.5.8	Kilitleme Pistonu Yuvası.....	54
4.6	Sistemin Kullanılması.....	54
4.6.1	Ana ekran Açıklamaları.....	58
5	SU DARBELERİ.....	63
5.1	Su Darbesinin Tanımı.....	63
5.2	Önceki Çalışmalar.....	64
5.3	Su Darbelerini İdare Eden Diferansiyel Denklemlerin Elde Edilmesi.....	69
5.3.1	Süreklilik Denklemi.....	69
5.3.2	Hareket Denklemi.....	87
5.4	Karakteristikler Yöntemi İle Çözüm.....	94
5.5	Sınır Şartları.....	98
5.5.1	Doldurma Durumu İçin Boru Ucunda Sınır Şartı.....	98
5.5.2	Boşaltma Durumu İçin Boru Ucunda Sınır Şartı.....	99
5.6	Su Darbelerini Hesaplayan Programın Yazılması.....	102
5.7	Programın Çıktıları ve Yorumlanması.....	106
6	SONUÇLAR.....	112
	KAYNAKALAR.....	113
	ÖZGEÇMİŞ.....	115

SİMGE LİSTESİ

\forall_g	Karışımdaki gaz hacmi
\forall_s	Karışımdaki sıvı hacmi
\forall	Sıvı gaz karışımı toplam hacmi (m^3)
A	Boru kesit alanı (m^2)
a	İvme
C	Basınç dalgası yayılma hızı (m/s)
D	Boru çapı (m)
e	Boru et kalınlığı (m)
E	Malzeme elastiklik modülü
F1	Sürtünme kuvveti (N)
g	Yer çekimi ivmesi
H	Boru eksenini esas alınarak borunun herhangi bir en kesitindeki mutlak basınç yükü (mSS)
K	Hacimsel elastiklik modülü
K_g	Karışımdaki gazın hacimsel elastiklik modülü
K_s	Karışımdaki sıvının hacimsel elastiklik modülü
L	Boru boyu (m)
m	Kütle (kg)
$M_{\text{borudaki su miktarı}}$	Test burusundaki su kütlesi
N	Boru parçası sayısı
p	Basınç (bar)
P	Borunun ıslak çevresi
q	Dış basınç (atmosfer basıncı)
Re	Reynould sayısı
s	Hacimsel gaz miktarı konsantrasyonu
t	Zaman (s)
t_k	Vana kapanma zamanı (s)
V	Akış hızı (m/s)
V_{boru}	Boru hacmi (m^3)
$V_{\text{borudaki su miktarı}}$	Test borusundaki su hacmi (m^3)
x	Başlangıç noktasından itibaren boru eksenini boyunca ölçülen uzaklık(m)
Δh	Düz boruda basınç kayıpları
δx	Seçilen birim eleman boyu (m)
ϵ_c	Çevresel birim deformasyon
ϵ_x	Eksenel birim deformasyon
θ	Boru eksenini yatayla yaptığı açı
λ	Basınç kayıp kat sayısı
μ	Possion oranı
v	Suyun özgül hacmi (m^3/kg)
ρ_g	Karışımdaki gazın yoğunluğu
ρ_s	Karışımdaki sıvının yoğunluğu
ρ_{su}	Su yoğunluğu (kg/m^3)
τ	Kayma gerilmesi
ψ	Boru mesnetleme durumuna bağlı boyutsuz parametre

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ALPT-1200	Test Cihazının Adı
BMC	Hazır Kalıplama Hamuru
CTP	Cam Elyaf Takviyeli Termoset Plastik
FEM	Finite Elements Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
HKB	Hazır Kalıp Bileşimleri
MEKP	Metil Etil Keton
PLC	Programlanabilir Lojik Kontrol
RTM	Resin Transfer Moulding (Reçine Enjeksiyonu Yöntemi)

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Cam elyafının üretim aşamaları	11
Şekil 2.2 Cam elyaf keçe	13
Şekil 2.3 Sürekli cam elyaf fitil ve iplik	14
Şekil 2.4 Cam elyaf dokuma	15
Şekil 2.5 Cam elyaf kırılmış demetler	15
Şekil 2.6 Tek yönlü cam elyafı tipinin şekli	16
Şekil 2.7 İki yönlü cam elyafı tipinin şekli	16
Şekil 2.8 Çok yönlü cam elyafı tipinin şekli	16
Şekil 3.1 El yatırması yönteminin genel gösterimi	25
Şekil 3.2 Püskürtme yöntemi uygulama	26
Şekil 3.3 Püskürtme yöntemi uygulama sistemi	26
Şekil 3.4 Reçine enjeksiyonu uygulaması	28
Şekil 3.5 Soğuk pres uygulanması	29
Şekil 3.6 Elyaf sarma yöntemi makine ekipmanları	30
Şekil 3.7 HKB üretim prosesi ve ekipmanları	32
Şekil 3.8 CTP kullanım alanları	34
Şekil 3.9 CTP Borular	35
Şekil 4.1 CTP borunun boyutlandırılması	36
Şekil 4.2 İki Valfli sistemin çalışma prensibi	39
Şekil 4.3 Dört valfli sistemin çalışma prensibi	41
Şekil 4.4 Basın test cihazı ve elemanları	44
Şekil 4.5 Sabit kafanın mukavemet analizi	46
Şekil 4.6 Hareketli kafanın sabitinin mukavemet analizi	47
Şekil 4.7 Hidrolik sistem şeması	48
Şekil 4.8 Hareketli kafa hareketli parçasının mukavemet analizi	49
Şekil 4.9 Kaldırma sehparlarının yüksekliğinin piston hareketi ile değişimi	50
Şekil 4.10 Su sistemi elemanları ve bağlantı şeması	52
Şekil 4.11 Boru sıkma pistonu	53
Şekil 4.12 Sistemin çalıştırılması	55
Şekil 4.13 Sisteme kullanıcı adı ve şifre girilmesi	55
Şekil 4.14 Test parametrelerini sisteme girilmesi	56
Şekil 4.15 Ana ekran görüntüsü	57
Şekil 4.16 Grafik ekranı	60
Şekil 4.17 Test değerlerini Excel dosyasına atılması	61
Şekil 5.1 Yatayla θ açısı yapan bir boru üzerinde akım şartlarının gösterilmesi	69
Şekil 5.2 Karakteristik eğriler	96
Şekil 5.3 Karakteristikler Ağı	97
Şekil 5.4 Farklı boru çapları için oluşan su darbeleri	111

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Cam elyaf çeşitleri	12
Çizelge 4.1 Testi yapılmak istenen CTP boruların ölçüleri.....	37
Çizelge 4.2 Cihazın teknik özellikleri	62
Çizelge 5.1 Farklı boru çaplarında oluşan su darbeleri	110

ÖNSÖZ

Kompozit malzemeler giderek artan ve sürekli geliştirilmeye çalışılan günümüz sanayisinin önemli malzemeleridirler. Günümüzde malzeme ve makinelere talepteki artış performans açısından çok daha güvenilir ekipmanların üretimine neden olmaktadır. Cam Elyaf Takviyeli Termoset Plastikler (CTP) son zamanlarda çok fazla kullanılmaya başlanan kompozit malzemelerdir. Özellikle CTP malzemedan yapılmış borular üstün özelliklerinden dolayı çok fazla tercih edilmektedirler. Bu çalışmada CTP boru için hidrostatik basınç test cihazı geliştirilmiş ve uygulaması yapılmıştır.

İlgili standartlara (TS EN 1447) göre test basıncının $\pm\%2$ doğrulukla test numunesine uygulanması gerekmektedir. Test sırasında oluşan su darbeleri test basıncının bu aralıkta kalmasını çok fazla zorlaştırmaktadır. Bu basınç test cihazı geliştirilirken oluşacak su darbeleri detaylı bir şekilde incelenmiş ve basıncın istenilen aralıkta kalması sağlanmıştır.

Öncelikle aileme, sonra bana bu alanda çalışma fırsatı veren değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ahmet KOYUN'a, ALARGE LTD. ŞTİ. firması ve çalışanlarına, çalışmalarım esnasında benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Recep YILMAZ,a Abdulkadir SARIALTIN'a ve Oğuzhan BOZDEMİR'e sonsuz teşekkürler ederim.

Saygılarımla
Ümit DEMİREL
2008

ÖZET

Cam elyaf takviyeli plastikler (CTP) günümüzde yaygın olarak kullanılan ve ilk modern polimer esaslı kompozit malzemedir. CTP malzemelerin otomotiv sektöründen inşaat sektörüne, karayolları uygulamalarından denizcilik sektörlerine, şehir mobilyalarından elektronik sektörüne kadar bir çok alanda uygulamaları mevcuttur ve uygulama alanları hızla artmaktadır. CTP boru sektörü de bunların en önemlilerinden bir tanesidir.

Bu çalışmanın amacı CTP malzemedeki yapılmış boruların, ilgili standartlara uygun olarak hidrostatik basınç test cihazını tasarlamaktır. Aynı zamanda; çalışmanın CTP için bir doküman olması da amaçlanmıştır.. İlgili standartlara (TS EN 1447) göre test basıncının $\pm\%2$ doğrulukla test numunesine uygulanması gerekmektedir. Test sırasında oluşan su darbeleri test basıncının bu aralıkta kalmasını zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada, test cihazı geliştirilirken, oluşacak su darbeleri detaylı bir şekilde incelenmiş ve basıncın istenilen aralıkta kalması sağlanmıştır. Sınır şartları olarak küresel vana açılma kapanma karakteristiği ve pistonlu pompa değerleri kullanılmıştır. Su darbelerini idare eden diferansiyel denklemler karakteristikler metodu kullanılarak sonlu farklar notasyonunda yazılmıştır. Daha sonra C++ programlama dilinde test cihazında oluşması muhtemel su darbelerini hesaplayan bir bilgisayar programı da geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: CTP, boru, hidrostatik basınç testi, su darbesi, sınır şartları.

ABSTRACT

The glass fiber reinforced polyesters (GRP) is first modern polymer based composite material used extensively nowadays. GRP materials has a varrious and widely application area. Automotive, construction, traffic signs, marine application, city furniture, electronics sectors can be given as example. These aplications are rapidly increasing. GRP pipe sector is one of most significant applications

The aim of this study is designing a hydrostatic pressure test machine, for testing GRP materials, consisted with corresponding standarts. On the other hand, it is aimed that this study to be a knowledge. According to corresponding standarts (TS EN 1447), testing pressure applied on the sample must be precision between $\pm 2\%$. Occuring water hammer during the test is forcing testing pressure interval. In this study a detailed search has conducted about occuring water hammer during the test and provided that test pressure stabilizing precision between $\pm 2\%$. Globe valve characteristics and reciprocating pump characteristics used as boundary conditions. The differantial equations expressed water hammer, solved using method of characteristics. After then a programme improved which determines possible water hammers in testing machine by using C++.

Keywords: GRP, pipe, hydrostatic pressure testing, water hammer, boundary condition.

1 GİRİŞ

Günümüzde oldukça gelişmiş olan kompozit malzemeler, aslında binlerce yıldan beri kullanılmaktadır. Örneğin, çamur içine karıştırılan saman çöpleri ile yapılan kerpiç, bir kompozit malzemedir. Ok yayı yapılırken üst üste konulan, özellikleri ve lif yönleri farklı ağaç levhalar kompozit bir malzeme oluştururlar. Ayrıca ahşap, kemik gibi malzemeler, tabiatta bulunan doğal kompozitlerdir. İki veya daha fazla malzemenin, üstün özelliklerini tek bir malzemede toplamak ya da yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmeleri ile oluşturulan malzemeler, kompozit malzeme olarak adlandırılır. Örneğin Mezopotamya’da Babiller ve Asurlar çok farklı türde harç kullanmışlardır. Özellikle ilk uygulamaları M.Ö 3000’li yıllar da her türlü yapıda kerpiç ve tuğla kullandıkları görülmüştür. M.Ö 2800’lü yıllarda tabakalar halinde birleştirilmiş tahta parçaları, bunların dışında kil hamurunun içerisine katılan keçi kılları, saman içerisine karıştırılan saman çöpleri baslıca kullanılan kompozit malzemelerdir. Her aşamada insanlar günün koşulları ve ihtiyaçları doğrultusunda malzeme arayışı içinde oldukları görülmüştür. Bu arayış neticesinde 1868 yılında J.Hyatt tarafından polimer malzeme olarak selüloit bulundu. Ancak modern plastik endüstrisi L.Baekeland tarafından 1909’da geliştirilmeye başlanmıştır. 1930’lu yıllarda plastik malzemeler önemli bir konuma gelmiştir (Akkurt S. 1991). Kolay şekil verilebilmesi, korozyon direnci, hafif olması gibi nedenler plastiğin ön plana çıkmasına neden olmuştur. Yalnız sert olmaları, dayanıklılıklarının düşük olması gibi dezavantajlar plastiğin inşaat sektöründe birincil malzeme olarak kullanılmasını engellemiştir. Bu eksikliklerin giderilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. 1950’li yıllarda plastik malzemenin içerisine katkı maddeleri katılarak güçlendirme yoluna gidilmiştir. Daha sonra istenilen düzeyde matris ve takviye malzemeleri kullanılarak çeşitli yapılarda kompozit malzeme üretilmiştir. Polimer matrisli kompozit iki ana bileşenden oluşmuştur. Bunlar yük aktarımını sağlayan takviye kısmı ve takviye elemanlarını çep çöpe çeviren matris kısmıdır. Günümüzde en çok kullanılan polimer matrisli kompozitler; Cam elyaf takviyeli termoset plastikler (CTP) ve karbon elyaf takviyeli plastiklerdir. CTP hammaddesinin %32 ise boru imalatında kullanılmaktadır.

CTP boru üretiminde ilgili standartlar gereği üretimden çıkan her boru hidrostatik basınç testine tabi tutulmalıdır. Dünyada ve ülkemizde boru üreticileri tarafından DIN 4229, BS CP 2010 ve TS286’ e göre yapılması zorunlu olan “Basınçlı Su İleten Boru Hatlarına İç Basınç Deneyi Uygulanması Kuralları”na göre cihaz tasarımı yapılmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu basınç test cihazına ALPT-1200 adı verilmiştir.

ALPT-1200 üzerinde bulunan hidrolik pnömatik ve mekatronik aksamlar sayesinde ileri seviyede basınç kontrolü sağlamaktadır. Sistemin tasarımı esnasında tüm elemanları Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Elements Method – FEM) ile, ilgili konuda kullanılan yazılımlar ile dijital ortamda analize tabi tutulmuştur. Makinanın her bir elemanı 3 Boyutlu (3D) olarak dijital ortamda tasarlanmış olup her elemanın ölçüleri sabittir.

Sistemin herhangi bir noktasında bir kontrol elemanı ile, akım hızında ani bir değişiklik yapılması sonucu, akım zamanla değişen türden akıma dönüşür. Kontrol vanalarının açılıp kapanması ALPT-1200’de bu kararsız akıma sebep olur. Pompa-boru-vana sistemlerinde boru ucundaki bir vananın kapatılması veya açılması, pompaj sistemlerinde pompanın çalıştırılması veya durdurulması, hidroelektrik tesislerde yük ihtiyacı veya yük atımı sırasında türbin ayar vanasının ani kapatılması veya açılması sırasında akımda meydana gelen ivmelenme şiddetli basınç dalgalarının gelişmesine sebep olur. Basınç dalgasının yayılması esnasında akım hızı yavaşlar, sıvı sıkışmaya ve boru ise genişmeye maruz kalır. Basınç dalgasının hızı, sıvının sıkışabilirliğine, boru malzemesinin elastikiyetine ve borunun bağlantı şekline bağlıdır. Su darbesi olarak adlandırılan bu olay sonucu, oluşacak basıncın analizi sistemin güvenli ve ekonomik olarak projelendirilmesi bakımından önemlidir. Sistemin projelendirilmesi için, öncelikle sistemin genel yerleşimi ve parametreleri seçilir ve muhtemel işletme şartları sonucu oluşacak değişken akım durumları için analiz edilir. Şayet, analiz sonucu elde edilen maksimum ve minimum basınçlar kabul edilebilir sınırlar içinde değilse, sistemin yerleşimi veya parametreleri değiştirilir, ya da değişik önleyici elemanlar ilave edilerek sistem tekrar analiz edilir. Bu işlem sistem istenen duruma gelene kadar tekrarlanır.

Su darbesi olayını idare eden eşitlikler nonlinear kısmi diferansiyel denklemlerdir ve analitik çözümleri mümkün olmamaktadır. Ancak, bazı kabuller yapılarak sayısal yöntemler yardımı ile yaklaşık çözümleri yapılabilmektedir. Bu yöntemler arasında karakteristikler yöntemi, su darbesi analizinde en çok kullanılan yöntemdir. Karakteristikler yöntemi ile su darbesini ifade eden kısmi diferansiyel denklemler, birinci mertebe yaklaşımı ile sonlu farklar formunda tanımlanarak, karakteristik doğrular boyunca geçerli adi diferansiyel denklemlere dönüştürülür. Bu denklemlerin başlangıç değerleri ve sınır şartları yardımı ile sayısal çözümü yapılarak akımın hız ve basınç değerleri elde edilir.

Bu çalışmada, su darbesi olayını idare eden nonlinear kısmi diferansiyel denklemlere karakteristikler yöntemi uygulanmış ve değişik sınır şartlarının içeren matematiksel bir model

oluşturulmuştur. Borunun doldurma durumu için sınır şartı; sabit seviyeli bir pompa, boşaltma durumu için ise küresel vanaların kapanma kanunu esas alınarak bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Geliştirilen bilgisayar programı yardımı ile örnek bir pompa-boru-vana sisteminde, basınç dalgasının boru boyunca yayılması, sınırlardan yansıması ve borunun belirli bir noktasında basınç değişimi incelenmiştir.

2 KOMPOZİT MALZEME

2.1 Kompozit Malzemenin Tarihsel Gelişimi

İki veya daha fazla malzemenin, üstün özelliklerini tek bir malzemede toplamak ya da yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmeleri ile oluşturulan malzemeler, kompozit malzeme olarak adlandırılır. Kompozitler yapay ve çok fazlı malzemelerdir. Yapıyı oluşturan bileşenler, kimyasal olarak farklıdır ve fazları birbirinden ayıran belirgin bir ara yüzey bulunmaktadır. Kompozit malzemelerin geleneksel malzemelere göre avantajı, bileşenlerinin en iyi özellikleri, bir araya getirmesidir. Mukavemet, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, korozyon dayanımı, kırılma tokluğu, yüksek sıcaklık özellikleri, ısı iletkenlik, rijitlik, ağırlık, fiyat ve estetik görünüm gibi özelliklerinden biri veya birkaçı, kompozit malzeme üretimiyle iyileştirilebilmektedir. Yakın zamanda yapılan araştırmalar göstermiştir ki, yapılarda kullanılan malzemeler yapısal olarak iki gruba ayrılmıştır. Bunlardan ilki, malzemenin iç yapısı üniform olan homojen malzemeler; diğeri ise, genel olarak yeni nesil malzemeler olarak adlandırılan ve içerisinde iki veya daha fazla homojen malzeme bulunan kompozit malzemelerdir. Yapıda kullanılan, homojen malzeme olarak büyük bir oranda demir kastedilmektedir. Yeryüzü kabuğunun % 5'i demirden meydana gelmektedir (Holmes M. 1983). Yaklaşık 3000 yıldır kullanılmakta olan demir, 19. YY'nin başlarındaki endüstri devriminden sonra yapılarda kullanılan temel malzeme olarak yerini almıştır. Endüstri devriminin ardından ortaya çıkan buhar makineleri sayesinde, demirin işlenmesi için gerekli olan ısı ve diğeri ihtiyaçlar sağlanmış oldu. Bu sayede, ucuz ürün elde edilmeye başlandı. Bütün bu gelişmeler doğrudan mühendisliğe yansıdı ve elde edilen gelişmeler büyük bir hızla yayılmaya başladı. İlk yapı malzemeleri olan ham demiri, patlamalı fırınlarda işleyerek dökme demir ve dövme demir elde edildi. Dökme demir ucuz üretim yöntemi sayesinde, 19.YY'da geniş bir kullanım alanı buldu.. Yapı malzemesi olarak kullanılan dökme demirin en büyük sorunu, düşük çekme mukavemeti ve kırılma tokluğu idi. En büyük avantajı ise, isminden de anlaşılacağı gibi döküm yöntemi ile üretildiği için istenilen her şekle sokulabilmesiydi. Ancak, böyle bir işlemi yapabilmek için yüksek ısıya, uygun kalıba ve doğal olarak yetişmiş kalifiye bir elemana ihtiyaç vardı. Bu nedenlerden dolayı, Bessemer ve Siemens dövme ve dökme demir yerine, korozyona nispeten daha dayanıklı olan çeliği keşfettiler (Holmes M. 1983). Bessemer ve Siemens, ergitilmiş demire yabancı maddeler olarak su, karbon ve demirin çekme mukavemetini arttıracak yönde çeşitli alaşımlar ekleyerek, çeliği keşfettiler. Dövme demir üretim yöntemine benzeyen çelik üretimi ile levha ve profil elde ettiler. Bu yeni keşfedilen malzeme, demir yollarında ve gemi imalatında sıkça

kullanılmaya başlandı. Büyük miktarda çeliğin üretilmesi, mühendislik alanında büyük ve olumlu bir yönde etki yaptı. Demir gibi kırılğan malzemeler, yerini yüksek çekme mukavemetine ve esnekliğine sahip, daha güvenli bir malzeme olan çeliğe bıraktı. Çeliğin, yapı malzemelerinden beklenen yüksek çekme ve basınç mukavemetine ek olarak dayanım, yük karşısında yüksek oranda gösterdiği lineer elastik davranış ve ısı karşısında sünme oranının ihmal edilecek kadar az olması; mühendislikte yeni bir çığır açtı. Bütün bunlara ek olarak; yük karşısında ani kırılma yapmaması da büyük bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Çeliğin yapı mühendisliğine girmesi ile yapıların şekilleri büyük bir değişime uğradı. Daha önce hayal bile edilemeyen, geniş açıklıklara sahip yapıları üretmek mümkün oldu. Bu başarıyı, günümüzde de çok büyük açıklıklı köprüler ve çatı makasları gibi yerlerde görmekteyiz. Bunla beraber, yaygın olarak kullanılan çeliğin, aşınmaya eğilimli olduğu ve çeliğin özelliklerinin korunabilmesi için alınacak önlemlerin maliyet açısından büyük yükler getirdiği fark edildi. Ayrıca, çeliğin yoğunluğunun fazla olması da diğer bir dezavantajıydı. Örneğin; 20.YY'da geliştirilmeye başlanan uçakların, sadece yüksek kuvvetlere dayanmayıp, aynı zamanda hafif olma gereklilikleri ortaya çıktı. Buradan çıkarılacak sonuç, yapılarda da kullanılacak olan malzeme çelikten daha az yoğunluğa sahip fakat onun kadar yüksek dayanım ve mukavemete sahip olmalıdır. Bu amaçla, 19.YY'ın sonlarında yapılarda kullanılmak amacıyla çeşitli malzemeler üretilmeye başlandı. Bunlardan biri olan alüminyum yoğunluk bakımından çeliğin dörtte biri olmasına rağmen mukavemeti de aynı oranda düşüktür. Bu yüzden yapıda taşıyıcı olarak kullanılmamaktadır. Alüminyumun tersine, titanyum ve bakır çeşitli yapılarda kullanılmıştır. Temel olarak, bir yapıda kullanılacak malzemelerin gereksinimlerini demir ve çelik karşılmasına rağmen; bu malzemelerin üretimlerinin zor olması, malzemeyi ekonomik olmaktan çıkarmaktadır. Bunların yerine üretimleri daha kolay, yeni nesil malzemeler olan kompozit malzemeler geliştirilmeye başlandı.

Kompozit, temel olarak iki veya daha fazla malzemenin bir arada kullanılması ile oluşan ve meydana geldiği malzemelerden farklı özelliklere sahip, yeni bir malzeme olarak tanımlanır (www.turkcaadcam.net). Kompozit malzemeler binlerce yıldır, insanların farkında olarak ya da olmayarak, sorunlarının çözümü için kullandıkları malzemelerdir. Fakat bu yapay malzemeler üzerindeki araştırmalar son yüz yıl içerisinde büyük bir gelişme göstermiştir. Bu büyük gelişmeye, homojen malzemelerden kalan genel bilgi birikimi, analitik ve dizayn yapabilme becerilerinin katkısı da büyük olmuştur. Kompozit malzemenin tarihi incelendiğinde, Orta Doğuda, fazladan dayanım sağlamak amacıyla, ok yayları üzerine farklı lif yönleri

oluşturacak şekilde konulan malzemeler, kerpiç yapı sistemleri ile MÖ. 2800'lü yıllara ait olduğu tespit edilen lamine edilmiş çeşitli tahta parçalarının Mısır'da bulunması ve buna ek olarak birçok yapıda kaya-çakıl gibi malzemeleri birbirine bağlamak için kireç, kum ve kil karışımından elde edilen bağlayıcı ile yapılmış kompozit malzemeler tespit edilmiştir (Şahin Y. 2000). Bulunan bu yapıştırıcı malzeme, yavaş donması, malzemeleri daha sağlam bir hale getirmesi ve düşük sıcaklıkta kolay şekil verilebilmesi nedeni ile hala en çok kullanılan yapı malzemesidir. Bu tip bağlayıcı karışımlar, yapı malzemelerinin mukavemetini ve dayanımını artırdığı için sürekli araştırma konusu olmuştur. Jhon Smeaton 1756 yılında içerisinde kireç, kalsiyum oksit, aluminat ve silikat bulunan bir karışımı Eddystone Fenerinin yapımında kullanmış ve bu gelişmeden kısa bir süre sonra, 1796'da James Paker kil ve kireç tasının karışımı ile elde edilen Roma Çimentosunun patentini almıştır (Holmes M. 1983). Böylece 19.YY'nin sonlarına doğru çok büyük bir icat olan çimento keşfedilmiş oldu. Joseph Aspdin 1824 yılında, günümüzde de yaygın olarak kullanılan yüksek mukavemetli çimento yapımının ilk adımını atmıştır. Aspdin'in çimentosu, kireç ocağında yakılmış kil ve tebeşirin toz haline getirilmesi ile oluşmaktaydı. Aspdin'in kullandığı temel malzemeleri çok daha yüksek sıcaklıklara kadar yakan Isaac Jhonson, 1845 yılında yeni bulduğu üretim yöntemi ile daha yüksek mukavemete sahip çimentoyu keşfetmiş oldu. Isaac Jhonson bu yeni üretim yöntemini Portland şehri yakınlarında bulduğu için, bu yeni ürüne Portland ismini verdi. Bu icat, günümüzde de beton karışımlarında en çok kullanılan çimentolardan biri olmuştur. Çimento, taş, kum gibi beton karışımlarından beklenen sertlik ve rijitliği su ile sağlanmakta ve bu sayede karışıma çelik gibi kolay şekil verilebilmekteydi. Beton ile çelik arasındaki temel fark; beton, çelikten çok daha büyük alanlarda ve kütleli olarak kullanılabilmekte, ayrıca betona daha kolay şekil verilebilmesi nedeniyle plak veya baraj gibi kütle tarzı yapılarda kolaylıkla uygulanabilmekteydi. Bu yüzden çimento 20.YY'de en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesi olmuştur. Bu kadar yaygın olarak kullanılmaya başlanan beton, tek başına dökme demir gibi basınç mukavemeti çok yüksek fakat çekme mukavemetinin düşük olması nedeniyle, yeni yapı tasarımları için problem olmuştur. Bu sorunu gidermek için, çeliğin yüksek çekme mukavemetini betonun basınç mukavemeti ile birleştirmenin yolları aranmış ve sonunda çelik çubuklarının tek yönlü, temelden çatıya kadar kesintisiz olarak beton içerisine katılmasıyla aranan yüksek basınç ve çekme mukavemetine sahip yeni bir yapı malzemesi bulunmuş oldu. Bulunan bu malzeme günümüzde de kullandığımız güçlendirilmiş betondur. Güçlendirilmiş beton sonraki yıllarda üzerinde yapılan çeşitli çalışmalar sonucunda bir üst üretim yöntemi olan ön germeli beton üretimine kadar gelmiştir. Bu yüzden, günümüzde yaygın olarak kullandığımız beton tam anlamı ile bir kompozit malzemedir.

Bu yüzyılın başından itibaren, hem homojen hem de kompozitlerin üretimi ve geliştirilmesi üzerinde geniş çaplı araştırmalar yapılmakta ve yapılan bu araştırmalar genellikle organik maddeler olan ve yaygın olarak plastik diye tanımlanan süper polimerler üzerine kaymıştır. Bu malzemeler (süper polimerler) özellikle 2. Dünya Savaşından sonra hızlı bir yükseliş içerisinde olmuştur (Holmes M. 1983). İlk termoset plastik, fenol ve formaldehit karışımı olan bakalittir. 1907 yılında Belçikalı kimyager olan Leo Beakeland tarafından üretilmiştir. Silikon, epoksi ve polyester bu grupta yer almaktadır. Bu grupta yer alan ve yapı malzemelerinde en çok kullanılan süper plastik (reçine) ise polyesterdir. Fakat tek basına yapı elemanı olarak kullanılamaz. Çünkü, yük altında kullanım için yapı malzemelerinde aranan dayanım ve mukavemet değerleri nispeten düşüktür ve buna ek olarak da malzemede gözlenen sünme ise ihmal edilemeyecek düzeyde yüksektir. Betonda olduğu gibi, bu malzemenin üzerinde de çekme mukavemetini arttırmak ve yapıda taşıyıcı eleman olarak kullanabilmek için cam liflerinin de arasında bulunduğu birçok malzemeyle çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda, Polyester reçinesinin cam elyafları ile birleşmesinde gösterdiği uyum, bu ikilinin en çok tercih edilen malzemeler arasında yer almasını sağlamıştır. Takviye malzemesi olarak karbon ve boron elyafı gibi çeşitli elyaf cinsleri de denenmiş fakat ekonomik olarak en uygun olanın cam elyafı olduğu tespit edilmiştir. Bu geliştirilen teknolojik yapı malzemesi, yeni yapı tasarımlarında süratle kendisine yer edinmektedir. Örneğin, Londra'daki Merpoth okulunun ve Dubai Havaalanının çatı sistemleri CTP malzemedен yapılmıştır (Holmes M. 1983). Plastiğin yükselmesindeki önemli özellikler; kolay biçim verilebilir olması, metallere oranla düşük yoğunlukta olması, üstün yüzey kalitesi ve korozyona karşı dayanımdır. Bir çok üstün özelliğinin yanı sıra, sertlik ve dayanıklılık özelliklerin düşük olması plastik malzemelerin güçlendirilmesi için çalışmalar yapılmasına neden olmuştur. Bu eksikliğin giderilmesi amacıyla 1950' ilerde polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Kompozitler, özellikle polimerik kompozitler yüksek mukavemet, termal kararlılık, sertlik ve aşınmaya karşı dayanıklılık gibi özellikleriyle pek çok avantajları vardır. Ayrıca kompozit malzemeler dayanıklılık ve sertlik yönünden metallerle yarışmakla birlikte çok daha hafiftirler. Kompozit malzemelerin tüm bu üstün özelliklerinden dolayı inşaat sektöründe birincil (taşıyıcı) eleman olarak kullanılmasının yolları aranmıştır. Bunun bir aşama daha üstü olarak; asma köprüler yapılmaya başlanmıştır. 18 Haziran 1997 yılında Danimarka'nın Kolding şehrinde, tren yolunun üzerine yapılan 40 m açıklığa ve 18,5 m yüksekliğe sahip kulesi ile toplam 12 ton ağırlığındaki CTP köprüdür. Bu köprü, 5 tona kadar araç ve 500 kg/m² yayılı yük taşıma kapasitesine sahip olup, 18,5 m yüksekliğindeki kulesi

ile hava sıcaklığını, rüzgarın yönünü ve şiddetini ölçen bir hava gözlem kulesi işlevi de görmektedir. En önemli özelliklerinden bir tanesi de, bu ebatlarda bir yapının CTP kullanılması durumunda, yerine montajının tamamen bitirilip kullanıma açılması, tren yolu trafiğinin az olduğu 3 hafta sonu (cumartesi ve pazar) gecesi yani sadece toplam 6 gece sürmüştür. Yapım hızı ve uygun maliyeti gibi özelliklerinden dolayı CTP ile imal edilen köprü 1997 yılında Alman Plastik Birliği'nden (German Reinforced Plastic Association) icatlar ödülü ve 1998 yılında da Danimarka Endüstri Birliğinden ürün ödülü almıştır (www.fiberline.com.).

Bir malzemenin kompozit malzeme olabilmesi için;

- İnsan yapısı olması, dolayısıyla doğal bir malzeme olmaması,
- Kimyasal bileşenleri birbirinden farklı ve belirli ara yüzleri ayrılmaz en az iki malzemenin bir araya getirilmiş olması,
- Farklı malzemenin üç boyutlu olarak bir araya getirilmiş olması,
- Bileşenlerinin hiç birinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması, dolayısı ile bu amaçla üretilmiş olması (Broutman, L.J., Krock, R.H., 2001).

Yukarıdaki tanımlarda da yer alan “ malzemenin üç boyut olarak bir araya getirilmiş olması” ifadesi, burada fiziksel anlamda bir araya getirme, heterojen bir malzeme özelliği göstermekte, ancak makroskobik açıdan homojen bir malzeme gibi davranmaktadır. Buna örnek olarak cam takviyeli plastiği verecek olursak, cam lifleri ile plastiğin bileşmesiyle oluşmuş bir kompozit malzemedir. Malzeme ayrıntılı olarak inceleyecek olursa, seçilen her noktası, bileşimi oluşturan malzemelerden hangisine isabet ederse onun özelliğini taşıyacaktır. Ama bütün olarak baktığımızda farklı bir malzemedir.

2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Bir kompozit malzeme, birbirleri arasında ayırt edilebilir farklılıkları olan iki yada daha çok değişik malzemenin birleşimi olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, kompozitler genellikle mekanik özellikleri için kullanıldığından, bu tanım bağlayıcı bir madde ile desteklenen, 'takviye' (lif veya parçacık gibi) ihtiva eden malzemeleri de içermektedir. Kompozitlerin, sürekli bağlayıcı kısımlarından daha sert, mukavim ve süreksiz olan parçacık kısımları vardır. Takviye malzemesini bir arada tutan ve homojen bir hacim yaratan, bağlayıcı bir maddeye ihtiyaç duyulmaktadır.

Kompozitler aşağıdaki gibi sınıflandırılır;

Takviye edilme şekillerine göre,

- a) Parçacık takviyeli kompozitleri,
- b) Elyaf (lif)takviyeli kompozitleri,
- c) Lamine (levha) kompozitleri.

Matris elemanlarına göre,

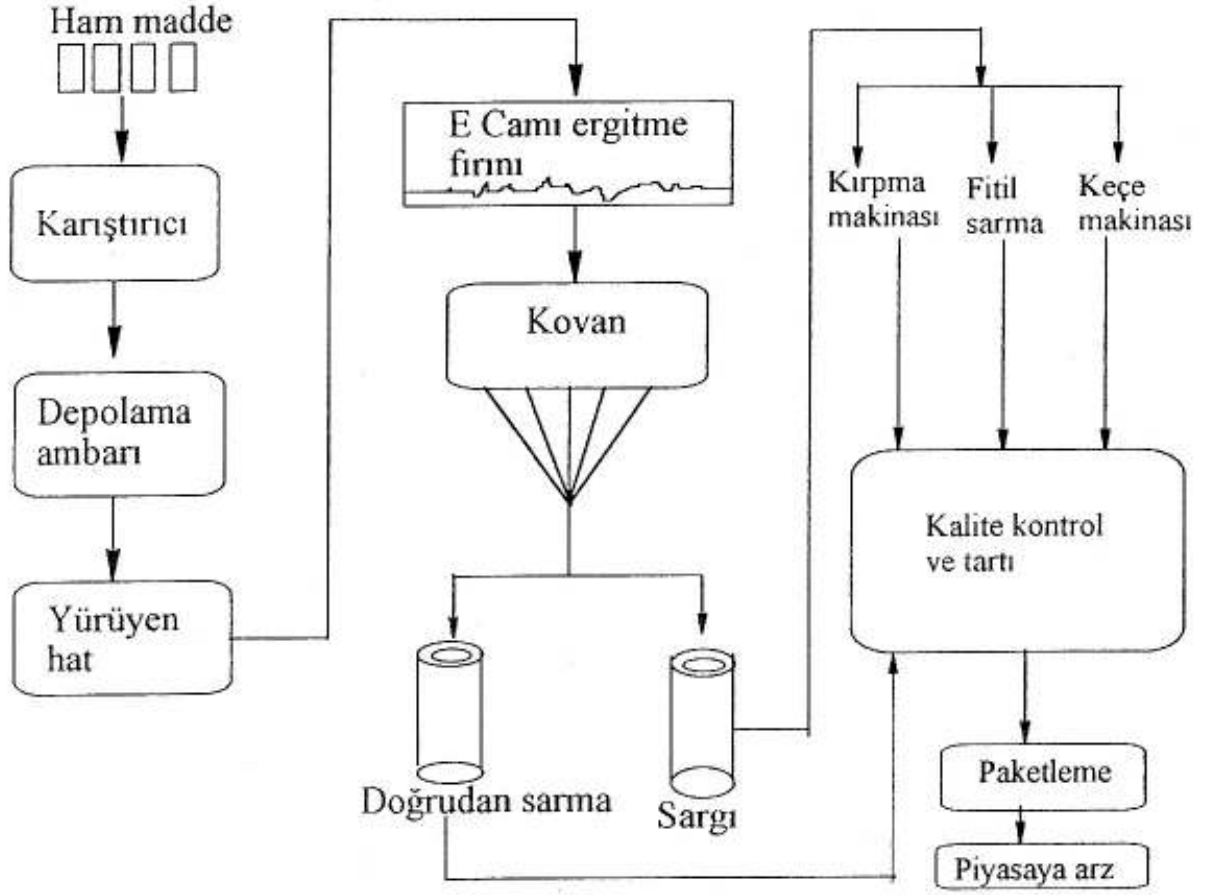
- a) Metal matrisli kompozit,
- b) Seramik matrisli kompozit,
- c) Polimer matrisli kompozit.

2.3 Cam Elyaf lar

Elyaf takviyeli organik bağlayıcı kompozitlerin ilk uygulamaları cam elyaf takviyeli plastiklerdir. Reçine matrisli karma malzemelerde en yaygın kullanılan ve en ucuz takviye türü, cam elyaftır. Hem sürekli hem de süreksiz cam elyaf takviyeli kompozitler, uçak kontrol panelleri gibi yapısal olmayan kullanımlardan, roket motoru parçaları yüksek basınç kabinleri gibi yüksek yapısal dayanımı gerektiren uygulamalara kadar çok geniş bir yelpazede uygulama imkanı bulmaktadır. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin geçmişte ve günümüzde geniş kullanım alanı bulunmasının ana sebepleri düşük maliyeti, kolay elde edilebilirliği, üretim kolaylığı ve yüksek mukavemeti olarak gösterilebilir. Esas olarak SiO₂ olan camda, diğer elementlerin oksitleri de bulunur. Farklı özellikler elde etmek için, farklı kimyasal yapıda cam elyaf üretilir. Çizelge 2.1'de üç tür cam elyaf mevcuttur. E-camı, en yaygın kullanılan cam elyaf türüdür. Malzeme mukavemetini ve elektrik direncini artırmak için kullanılır. E-camının mukavemeti, üretim sırasındaki işlemler ve testin yapıldığı çevre koşullarına göre değişiklik göstermektedir. Bunların başında, ortamdaki nem gelmektedir. Nem, mukavemeti düşürmektedir. Camın asitlerle teması ise, mukavemeti düşüren diğer bir nedendir. Üretim sırasında cam elyaf liflerin birbirlerine sürtünmesi de dayanımı azaltmaktadır. Elyaf içerisinde yok edilemeyen bazı süreksizliklerin oluşması da mukavemet değerlerinin her ölçümde aynı çıkmamasına neden olmaktadır (Hull D., 1992). Magnezyum ve alüminyum oksitleri içeren S-camının mekanik özellikleri diğerlerine göre daha iyidir. Bu nedenle yüksek çekme mukavemeti gerektiren alanlarda kullanılır. C-camı ise, korozyonlu ortamlara karşı kimyasal kararlılığı yüksek olduğundan, asidik ortamlarda kullanılacak

kompozitlerde kullanılır. Cam elyafın ucuzluk, yüksek çekme dayanımı ve yüksek darbe mukavemeti, yüksek kimyasal dayanım ve mekanik özelliklerinin yüksek sıcaklıklarda fazla düşmemesi gibi üstün özelliklerinin yanında, düşük elastisite modülü, liflerin sürtünerek birbirini aşındırması, düşük yorulma dayanımı ve matrisle arasında iyi bağ oluşmaması gibi zayıf yönleri de bulunmaktadır. Cam elyaf, üretim aşamasının en sonunda, silan ile kaplanarak, hem elyaf yüzeyini korur hem de matrisle iyi bir bağ yapması sağlanmış olur. Bu tabaka, sürtünmeyi azaltarak, aşınmayı önler ve üretim sırasında liflerin birbirlerine göre hareketini kolaylaştırır. Cam elyafın üretim aşamaları Şekil 2.1 'de verilmiştir.

Cam elyaf sürekli ve süreksiz olarak üretilir. 1300°C sıcaklıktaki sıvı cam, bir platin kovanın tabanındaki çok sayıda delikten aşağıya doğru demet halinde çekilir. Bir soğutma işleminden sonra, koruyucu yüzey kaplaması uygulanır. Lifler daha sonra fitil olarak adlandırılan demetler halinde toplanır. Bu üretim sırasında hız, 3 km/dak'ya kadar ulaşabilir. Bobinlere sarılan elyaf, kondisyonlanır ve kurutulur. Bu sırada koruyucu tabaka içerisindeki çözücü sıvı ve su giderilir. Camın viskozitesi, sıcaklığı ve çekme hızı değiştirilerek farklı çaplarda elyaf üretilebilir. Piyasaya sunuluşu, bükümsüz fitil, yarı bükülmüş fitil, bükülmüş iplik, kırılmış elyaf, keçe ve dokuma şeklindedir (Aran A., 1990). Bu açıklamalardan da anlaşılacağı gibi ucuz olması, düşük maliyetli olması, kolay elde edilebilmesi, üretim kolaylığı, yüksek kimyasal dayanım, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek çekme dayanımı, yüksek darbe dayanımı, yüksek mukavemet gibi üstün özellikleri sayesinde kompozitlerde cam elyafının kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Bu malzemeler Cam Elyaf Takviyeli Termoset Plastikler (CTP) olarak adlandırılır. Bu malzemelerde takviye malzemesi olarak cam elyaf, matris elemanı olarak ta reçineler kullanılır. Bu üstün özelliklerden dolayı CTP' ler inşaat sektörüne hızlı girmiş ve birincil malzeme olarak kullanılma yönünde çalışmalar devam etmektedir.



Şekil2.1 Cam elyafının üretim aşamaları.

Cam elyaflarının diğer elyaflara kıyasla daha çok kullanım alanı bulabilmesinin bir sebebi de değişik ihtiyaçlara cevap verebilecek çok sayıda çeşitlerinin bulunmasıdır. Kimyasal girdilerin kompozisyonlarına göre farklı cam elyaf türleri üretmek mümkün olmaktadır. Bu çeşitlerin arasında, polyester ve epoksi reçineler ile nispeten yüksek mekanik mukavemet değerleri veren, bu yüzden de en çok kullanılmakta olan E tipi cam elyafının Türkiye’de de üretimi yapılmaktadır. Cam elyafı, genellikle alkali düşük ‘E’ camının, 6-15 mikron çaplarında devamlı proses ile ince lifler halinde çekilmiş türüdür (Şişecam Bülten4, 1996). Bu cam elyaf türlerinin en çok kullanılanları E tipi, S tipi ve C tipi cam elyaflarının ham maddesini oluşturan bileşenler ve mekanik özellikleri Çizelge 2.1’de sunulmaktadır.

Çizelge 2.1 Cam elyaf çeşitleri

Mekanik Özellikleri	E Tipi	S Tipi	C Tipi
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,56	2,48	2,62
Çekme Dayanımı (GPa)	3,45	4.59	3,31
Elastisite Mod. (GPa)	72	86	-

CTP kompozitin takviyesinde kullanılan E tipi cam elyafını elde etmek için, öncelikle istenilen özellikleri cam elyafına kazandıracak ham maddenin fırında yaklaşık 1550 °C sıcaklıkta eritilmesi gerekmektedir. Eriyik ham madde, platin radyum alaşımından yapılmış, elektrik enerjisi ile ısıtılarak 5 °C hassasiyet ile 1250 °C sıcaklıkta tutulan ve üzerinde 1-2 mm çapında çok sayıda delik bulunan kovanlara doğru akmaya bırakılmaktadır. Kovan deliklerinden serbest akışa bırakılan cam eriyiği, kovan altında bulunan sarma aparatları yardımıyla, "kek" adı verilen silindir üzerine 50-70 m/s gibi yüksek bir hızla çekilerek cam lifi demeti olarak sarılmaktadır. Sarım hızına bağlı olarak, 6-20 mikron çapında değişen cam elyafı elde edilmektedir (Şişecam Bülten1, 1998). Cam elyafı sarılırken, üzerlerine "bağlayıcı" adı verilen ve ileride kompozit içinde reçine ile cam elyafı arasındaki çekim kuvvetini belirleyen bir malzeme püskürtülerek kaplanmaktadır. Bu bağlayıcının cinsi, kompozit malzeme içinde cam elyafının mukavemetini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bu bağlayıcının içeriği, kaydırıcı (Lubricant), bağlayıcı (Coupling agent), film oluşturucu ve sudan oluşmaktadır. Bu bileşenlerden "kaydırıcı" cam elyafının pamuklanmasını, kırılmasını önlemek ve liflerin aşınma dayanımı arttırmak, "bağlayıcı" cam elyafının reçine ile çekim kuvvetini sağlamak, 'film oluşturucu' ise işleme ve dokuma sırasında demet bütünlüğünü korumak için kullanılmaktadır (Şişecam Bülten4, 1996).

Gerek termoset , gerekse termoplastik bağlayıcının takviye edilmesinde , kimyasal birleşmeyi en iyi sağlayabilmek için demet haline getirilmiş sürekli cam elyafı kullanılmalıdır. Süreksiz ve izolasyon amaçlı cam yünü veya cam pamuğu yüksek mukavemetli CTP kompozitleri için uygun değildir (Şişecam Bülten4, 1996).

2.3.1 Takviye Amaçlı Cam Elyafı Biçimlerine Göre Sınıflandırılması

Cam elyafından takviye malzemeleri biçim bakımından da farklılık göstermektedir. Takviye amaçlı cam elyafı biçimlerine göre dört sınıfta ele alınmaktadır (Şişecam, Cam Elyaf Teknolojisi, 1996).

2.3.1.1 Keçe

5 cm ile 10 cm arası boylarda kırılmış veya kırılmamış devamlı cam elyafından yapılmıştır. 300 g/m² ile 450 g/m² arasında değişen yoğunluklarda bulunabilmektedir. El yatırması , devamlı levha ve sandviç levha üretim şekilleri için kullanılırlar. Kompozitte bulunması amaçlanan takviye miktarı, standart ağırlıklı cam elyaf keçelerinin üst üste yatırılması ile elde edilmektedir (Şekil 2.2) (Arıkan, A.T., 2004).



Şekil 2.2 Cam elyaf keçe

2.3.1.2 Fital

Sürekli cam elyafı demetlerinin bobinler üzerine birbirine paralel ve bükümsüz olarak sarılması ile üretilmektedir. Tek yönlü takviyenin elde edildiği durumda düğümlü fitiller kullanılmaktadır. Bu ilmeklerin amacı profil doğrultusunda elde edilen mukavemete ek olarak yanal yüklerle karşı mukavemeti de arttırmaktır. Sürekli cam elyafı demetlerinin bükümlü olarak sarılmasından elde edilen ürün cam elyafı iplik olarak adlandırılmaktadır. iplikler genellikle dokunmuş kumaşların elde edilmesinde kullanılmaktadır (Şekil 2.3) (Arıkan, A.T., 2004).



Şekil 2.3 Sürekli cam elyaf fitil ve iplik

2.3.1.3 Kumaş (Dokuma)

Devamlı cam elyafından bükümlü/bükümsüz iplik ile dokunarak üretilmektedir. Dokumalar, birim alan ağırlıkları olarak 300 g/cm^2 , 500 g/cm^2 ve 800 g/cm^2 gibi çeşitli türlerde bulunabilmektedir. Düzlemsel olarak birbirine dik iki yönde takviye elde edilmektedir. Dokumalar kullanılarak, cam elyaf keçelere nispeten daha üstün mekanik özelliklere sahip kompozit malzemeler elde etmek mümkün olmaktadır. Ancak, dokumalar tek başına kullanıldıklarında iki tabaka arasında tam bir bağlantı sağlanamamakta ve tabakalar arasında ayrışma gözlemlenmektedir. Ayrıca, dokumanın kullanıldığı kompozitlerde dış yüzeylere keçe konulmadığı takdirde, kompozitin yüzeyinde dokuma görüntüsü belirlemektedir. Bu sebeplerden dolayı, dokumalar iki keçe tabakası arasında kullanılmaktadır. Bu şekilde kompozitin hem mekanik özellikleri artırılmakta, hem de polyester tüketimi azaltılmaktadır. Çünkü, 1 kg keçe için 2,5 kg polyester kullanılırken, 1 kg dokuma için 1,5 kg polyester kullanılmaktadır (Arıkan, A.T., 2004).



Şekil 2.4 Cam elyaf dokuma

2.3.1.4 Kırılmış Cam Elyafı

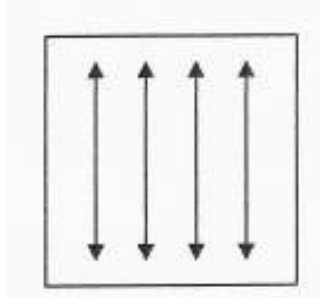
Kullanılan bağlayıcıya ve kullanım amacına bağlı olarak 3-6-12 mm uzunluğunda kırılmış cam elyaftan üretilmektedir. Çoğunlukla dolgu malzemesi ve gerilmelere karşı yüzey takviyesi amacı ile BMC (Hazır kalıplama hamuru) karışımında ve termoplastik takviyesinde kullanılmaktadırlar (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Cam elyaf kırılmış demetler

Kullanılan cam elyaf tipi, kompozit'in içinde elde edilen takviye yönlerini belirlemektedir (Şekil 2.6 – Şekil 2.7 – Şekil 2.8).

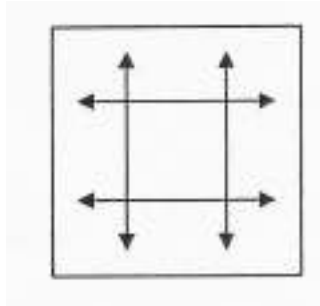
a) Tek yönlü takviye; Cam elyaf fitiller ve iplikler ile oluşturulmaktadır



Şekil 2.6 Tek yönlü cam elyafı tipinin şekli

b) İki yönlü takviye;

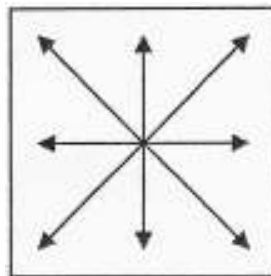
Cam elyaf dokuma ve kumaşlar ile oluşturulmaktadır



Şekil 2.7 İki yönlü cam elyafı tipinin şekli

c) Çok yönlü takviye;

Cam elyaf keçeler, kırılmış demetler ve hazır kalıplama bileşenleri ile oluşturulmaktadır



Şekil 2.8 Çok yönlü cam elyafı tipinin şekli (Arıkan, A.T., 2004)

3 CAM ELYAF TAKVİYELİ TERMOSET PLASTİK KOMPOZİTLER (CTP)

3.1 CTP Malzeme

Kompozit üretiminin bilinçli olarak ele alınması ve bilimsel yaklaşımlarla yeni malzemeler üzerindeki çalışmalar, 1940'lı yıllarda, cam takviyeli plastiklerin kullanımı ile başlamıştır. Önemli ilk uygulamalara örnek olarak radar kubbeleri gösterilebilir. Cam takviyeli plastikler elektromanyetik geçirgenlik, hafiflik, atmosfer koşullarına dayanıklılık ve mekanik özellikleri nedeniyle bu amaç için kullanılabilir en uygun malzemelerdir. İlk cam takviyeli plastik tekne 1942'de yapılmış ilk elyaf sarma patenti ise 1946'da A.B.D.'de alınmıştır. 1950'lerde ise uçak pervaneleri kompozit malzemelerden yapılmaya başlanmıştır (Aran A., 1990). Günümüzde bu malzemeler, her alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Elyaf takviyeli gelişmiş kompozitler, kompozit malzemeler içerisinde ayrıcalıklı bir yere sahiptir. Hatta gelişmiş elyaf takviyeli kompozitlerin üretimi, jet motorundan sonra en büyük teknolojik devrim olarak nitelendirilir. Bu tür kompozitlere yüksek teknoloji kompozitleri de denilmektedir. Bunlar elastiklik modülü yüksek olan karbon elyaf veya bor elyaf takviye edilmektedir. Diğer kompozitlere göre oldukça yüksek mukavemet ve rijitliğe sahiptirler. Yüksek mukavemetli çeliğe göre aynı mukavemet değerlerine sahip gelişmiş kompozitler, % 70 oranında daha hafiftirler. Bazı gelişmiş kompozitler, alüminyuma göre üç kat daha kuvvetlidir. Bu sebeple kompozitlerden imal edilen uçak parçalarının ağırlığı, geleneksel uçak malzemelerinden imal edilenlere göre % 60 oranında daha düşüktür (Judge J.F., 1996). Günümüzde uçak endüstrisinde, % 30'lara varan oranlarda kompozit malzeme kullanılmaktadır. Son 10 yılda uçak sanayinde kullanılan kompozit malzeme gelişimi, çeşitli aşamalardan geçmiştir. İlk aşamada kompozitler, uçakların bazı kısımlarında deneme amaçlı kullanılmaya başlanmıştır. Test uçuşları sonunda herhangi bir problem çıkmayınca, mevcut uçakların metal parçaları, kompozitlerle değiştirilerek kullanılmıştır. Alüminyum içine dizilmiş bor lifleri, 1000 °C üzerindeki sıcaklıklarda çalışan ve nikel-alüminyum alaşımı içerisinde oluşturulmuş nikel-niobiyum levhaları ile kuvvetlendirilen malzemeler, uçak sanayinde kullanılan diğer kompozit malzemelerdir. Kompozit malzemeler üzerinde yoğun çalışmalar devam etmektedir. Özellikle gelişen teknolojinin malzeme gereksinimini karşılamak için tek çözüm olarak bu malzemeler görülmektedir.

Cam elyaf takviyeli termoset plastikler (CTP), reçinenin içerisine takviye malzemesi olarak cam liflerinin katılmasıyla elde edilen kompozit malzemedir. Kompozit içerisinde cam elyaf, sürekli veya süreksiz fazda bulunabilirler. CTP'leri elde etmek için çeşitli kalıplama

yöntemleri olduğu gibi bunların en önemlisi profil çekme (pultruzyon) yöntemidir. Profil çekme yöntemi ile kalıplanan malzemeler inşaat sektöründe önemli bir yere sahiptir. Bu yöntemle üretilen CTP'ler inşaat sektöründe birincil malzeme ve tamamlayıcı malzeme olarak kullanılma yönünde hızla ilerleme kaydedilmiştir. Bu metot kullanılarak elde edilen CTP'lerin avantajları; istenilen boyutlarda üretilebilme imkanı, seri üretim, yüksek mukavemet, istenilen özellikte malzeme üretilebilme kolaylığı sağlaması, sertlik, sınırsız kalıplama, yüksek su dayanımı, çok sayıda kimyasal maddeye dayanım, hava koşullarına dayanım, UV ışınlarına dayanım, istendiğinde yanmazlık, çok iyi elektrik ve termal özellik, düşük ısı iletkenliği, hacimsel fazda CTP üretimi için metallere daha az enerjiye ihtiyaç duyması, kendinden renklendirme kolaylığı, farklı mekanik özelliklerde elde etmek için farklı katmanlarda ve kombinasyonlarda malzeme üretilebilme imkanı sağlaması gibi üstün özellikleri sayesinde inşaat sektöründe birincil malzeme olarak kullanımına olanak sağlamaktadır. CTP'ler günümüzde inşaatın hemen hemen her safhasına girmiştir. İlk yıllarda daha küçük, taşıyıcı olmayan yerlerde kullanılırken günümüzde, oldukça ilerleme kaydetmiştir. Bütün bu gelişmeler göz önüne alındığında insanlık var oldukça bulunduğu ortama ve koşullarına göre malzeme geliştirme yoluna gidecektir. Bugüne kadar nasıl bu malzemeler geliştirildi ise bundan sonra da geliştirilmeye devam edecektir. CTP'ler günümüzde alternatif bir malzeme olma yönünde hızla ilerlemekte ve bu konuda çok çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. CTP'lerin en iyi özelliklerden bir tanesi farklı mekanik özellikleri elde edebilmek için farklı katmanlarda ve kombinasyonlarda malzeme üretebilme imkanı sağlamasıdır.

Cam elyaf takviyeli plastikler malzemelerde, takviye malzemesi olarak cam elyaf bulunmakta ve bu takviye malzemesinin çevresinde hacimsel olarak daha fazla miktarda polyester, dolgu maddesi, boya ve kimyasal reaksiyon gerekli olan maddelerden oluşmuş bir matris bulunur. Cam elyaf takviye olarak mekanik özellikleri iyileştirir, matris ise deformasyon sırasındaki çatlak oluşumunu önleyici rol onar.

3.2 CTP'nin Tarihsel Gelişimi

Tarihte cam elyafının ilk kez Fenikeliler ve Mısırlılar tarafından kullanıldığı bilinmektedir. Elyaf, cam çubuklarının ısıtılması sonucunda yumuşatılarak akıtılması ile elde edilmekteydi. Kullanım alanı ise takviye amacıyla ve çanak, çömlek, amfora gibi ürünlerin sağlamaştırılması için kullanılmaktaydı (Watson J.C and Raghupathi N., 1989).

Günümüzde bilinen cam elyafın geliştirilmesi, 1930'lu yılların sonlarına doğru başarılmıştır. 1940'lı yıllardan bu yana, farklı cam elyafı tipleri plastiklerin takviyesi için kullanılmaktadır. Bu şekilde, plastiklerin çekme, eğilme mukavemetleri ve rijitliği tanımlayan elastisite modülü gibi mekanik özellikleri iyileştirebilmektedir.

İkinci dünya savaşı yıllarında ülkeler yeni sentetik malzemelerin geliştirilmesi ve mevcut plastiklere yeni kullanım alanları bulunması konusuna yönelmiştir. Doğal kauçuk, alüminyum, pirinç ve bakır gibi kritik metallerin yerini alabilecek sentetik ikame malzemeleri bulmak ve uçakların hafifletilmesi sonucu manevra yeteneklerini arttırmak amaçlamaktaydı. Özellikle takviyeli plastikler savaş endüstrisine, uçak camından, motor parçasına, tıbbi malzemelerden, radar antenine kadar her türlü üründe üstün mekanik özelliklerinin sağladıkları avantajlarla hizmet vermişlerdir. İkinci dünya savaşından sonra plastikler sivil ihtiyaçlara yönelmiştir. Özellikle sulama borularında, tekne gövdelerinde, ambalaj sanayi ve ev içi kullanımlarda plastik önemli bir malzeme olmuştur (Hikmet Y., 1992). Yakın zamanda, plastik kompozit teknolojisinin gelişimiyle başta havacılık, otomotiv ve denizcilik olmak üzere pek çok ana sektörde vazgeçilmez bir malzeme olmuştur. Ancak inşaat sektöründe kullanımı göreceli olarak kısıtlı kalmıştır. CTP'nin bu sektördeki kullanımı sadece dekoratif amaçlı, taşıyıcı olmayan yapı elemanları ile sınırlanmaktadır. İlk uygulamalar boru, tesisat ve bağlantı elemanlarında gerçekleşmiştir. Daha sonra yüksek mekanik özellikleri ve antikorozyon yapıları sayesinde cephe kaplama panellerinde, depolama tanklarında, prefabrikte geçici konut elemanlarında, beton kalıplarında ve şehir mobilyalarında geniş bir kullanım alanı olmuştur. 1980'lerden bu yana malzemenin üretim tekniğinde gözlemlenen maliyet düşüşü ile CTP'nin binalarda yapısal yük taşıyan bir malzeme olarak kullanma fikri mümkün olmuştur. Ancak bu fikir klasik betonarme elemanlarında çeliğin yerini alacak yeni bir yapı malzemesi ya da takviye fibresi olmasından öteye gidememiştir. Bu tür uygulamalarda, betonun geleneksel bir yapı elemanı olması nedeniyle, CTP'nin bu malzeme ile birlikte kullanımı üstün niteliklerinin maalesef ön plana çıkmamasına ve yapı endüstrisinde yeterince bilinmemesine yol açmıştır. Böylece kullanımı toprak altı ve nemli ortam yapılarında yüksek korozyon dayanımı sağlayan CTP takviyeli çubuklar ile sınırlı kalmıştır. Ancak son yıllarda, çok sınırlı da olsa, CTP'nin kendi başına bir taşıyıcı yapı malzemesi olarak kullanımı, çatı makası ve köprü tabliye kirişleri olarak uygulamaları görülmektedir.

Anlaşılmaktadır ki, CTP'nin inşaat sektöründe kullanımı büyük bir potansiyel gösterse de yapısal eleman olarak kullanımı henüz çok yeni bir konu olup, ciddi araştırma ve deneysel çalışmalara ihtiyaç göstermektedir.

3.3 CTP'nin Avantajları

- Mukavemet/ağırlık oranı avantajı ve sertlik,
- Sınırsız kalıplama boyutları,
- Kolay üretim,
- Çok sayıda üretim tekniği,
- Küçük sermaye yatırımı, (el yatırma yöntemi)
- Düşük maliyetle az sayıda üretim olanağı, (el yatırma yöntemi)
- Tasarım esnekliği,
- Diğer malzemelerle bağdaşma olanağı,
- Mükemmel su dayanımı,
- Çok sayıda kimyasal maddeye dayanım,
- Hava koşullarına dayanım,
- UV ışınlarına dayanım,
- Kendinden renklendirme olanağı,
- İstendiğinde yanmazlık,
- İsteğe bağlı olarak ışık geçirgen özellikte üretebilme olanağı,
- İstenilen mukavemette ve özellikte üretebilme kolaylığı,
- Çok iyi elektrik ve termal özellik,
- Farklı mekanik özellikleri elde etmek için farklı katmanlarda ve farklı kombinasyonlarda malzeme üretilebilir olma imkanı,
- Hacimsel fazda, CTP üretimi için metallere göre daha az enerjiye ihtiyaç duyulur.

3.4 CTP Üretiminde Kullanılan Malzemeler

- Polyester reçineler,
- Hızlandırıcılar,
- Dolgu maddeleri,

- Boyalar,
- Katalizörler,
- Kalıp ayırıcılar,
- Takviye malzemeleri

3.4.1 Polyester Reçineler

Polyester, katman içindeki takviye liflerini bağlayıcı rol oynar. Önemli iki evre vardır; Birincisi, cam takviyenin ıslandığı sıvı veya yapışkan bir madde elde edilmesi, ikincisi, sert ve dayanıklı ürün elde etmek için katılaşmanın meydana gelmesidir. Doymuş polyester reçineler, polietilen teraftalat terilen gibi termoplastik özellik gösteren ve enjeksiyon kalıplamada ve elyaf üretiminde kullanılan reçinelerdir. Doymamış polyester reçineler, uygun bir katalizör ile uzay ağı şebeke yapısı oluşturan termoset özellikli reçinelerdir. CTP üretiminde genellikle doymamış polyester reçine kullanılır. Bir atom, son elektron katlarında maksimum elektrona sahipse doymuş denir (Hikmet Y., 1992).

3.4.2 Hızlandırıcılar

Doymamış polyester reçinelerin donma ve sertleşmesi, serbest kök kaynağı olarak kullanılan peroksitler vasıtasıyla gerçekleşir. Bu serbest köklerin elde edilmesi için peroksit ısı veya bir başka enerji verilmesi gerekir. Soğukta veya az ısıda sertleşme temin etmek istendiğinde peroksit, serbest kökler halinde çözülmesini kolaylaştıran bir hızlandırıcı ilave edilir. Hızlandırıcı, katalizör ile direk etki etmemelidir. Patlama ve yangın tehlikesi yaratır. Özel bir kap gerektirmeden uzun süre saklanabilir (Mısıroğlu M., 2001).

3.4.3 Dolgu maddeleri

Maddesel, bitkisel, sentetik kökenli, toz, toprak, kristal halinde reçineye nazaran hareketsiz ve bitmiş malayani özellikler getiren ürünlerdir. Dolgu maddeleri sertleştirme prosesi esnasında veya sertleşmiş halde reçine sisteminin özelliklerini değiştirmek için kullanılır. Genellikle reçine sisteminin maliyetini düşürmek için kullanılır, bununla birlikte diğer özellikleri de değiştirir. Azami faydayı sağlamak için kalıplama prosesini ve son kullanım amacına göre doğru tip ve gerekli miktar dikkatlice seçilmelidir (Mısıroğlu M., 2001).

Bitmiş parçada aranan özelliklere göre dolgu maddesi seçilir. Fakat mekanik özellikleri ve görünüşü etkileyecek ikinci derecedeki reaksiyonlara dikkat etmek gerekir. Dolguların boyama etkisi önemlidir. Boya yerinde kullanılırlar fakat bazı hallerde iyi renk vermezler.

3.4.4 Boyalar

Boyalar mineral veya organik kökenli ürünlerdir. Reçinenin ve jelkotun boyanmasında kullanılır.

Çeşitli boya tipleri

a) Madensel boyalar

Genellikle metal oksitleridir. En tanınmış titan oksit (TiO) beyaz renk verir.

Demir oksit siyah renk verir. Bazı ürünlerin ağırlaştırıcı etkisi de vardır.

Maddesel Boyaların Özellikleri;

I. Reçine içinde erimezler

II. Parçaya donukluk verirler

III. Işığa ve ultraviyole ışınlarına dayanırlar

b) Organik boyalar

Fiyatı yüksek olduğundan az kullanılır. Bazı ürünlerin zehirleyici etkisi vardır.

c) Sentetik boyalar

I. Polyester reçine içinde erirler.

II. Yarı saydamdırlar

III. Ultraviyole ışınlarına karşı dayanıksızdırlar.

3.4.5 Katalizörler

Polyester reçinenin polimerleşmesi, katalizör aracılığı ile zincirlerin ağ şeklinde birleşmesi ve reçinenin sıvı halden katı hale gelmesidir. Normal ısıda çalışıldığında bu reaksiyondan ısı çıkar (Yıldız Treyler San., 2002).

Katalizör tabirinde yanlışlık vardır, kimya da katalizör kendisi kimyasal olaya katılmayan, bu reaksiyonu kolaylaştıran ve sonuçta aynı kalan bir maddedir. Katalizör, doymamış polyester veya reaktif monomer zincirlerinin ağ şeklini almasını başlatır. Bunlar organik peroksitlerdir.

Doymamış polyesterin, stiren içinde çözülmüş şekline “polyester reçine “ denir (Şişecam, CTP Teknolojisi 1895).

Kopolimerizasyonu başlatmak için ihtiyaç duyulan enerjiyi sertleştiriciler verir. Bunlara (sertleştiricilere) peroksit bileşenler denir. Peroksit parçalanması, ısı ile veya kimyasal maddelerle oluşur. Peroksit parçalanması ısı ile meydana gelmişse sıcak sertleşme, kimyasal maddelerle meydana gelmiş ise soğuk sertleşme oluşur.

Polyesteri sertleştirmek için kullanılan organik peroksitler katı, sıvı veya jel halinde bulunurlar. Oksijenin varlığı nedeni ile organik peroksitler tehlikeli olabilirler (Mısıroğlu M., 2001).

3.4.6 Kalıp Ayrıcılar

CTP ürününün kalıptan kolaylıkla çıkartılmasını sağlamak için kullanılır. Kalıp yüzeyine sürülen kalıp ayırıcılar, kalıbı parçadan izole eden koruyucu bir film teşkil eder.

3.4.7 Takviye Malzemeleri

Takviye malzemeleri, reçine sistemlerinin mekanik özelliklerini arttırmak amacı ile kullanılırlar. Takviyeler içinde en çok kullanılan, cam elyafıdır. Çok yüksek mekanik mukavemete sahip olan karbon elyafının geliştirilmesi özellikle mukavemet ve hafifliğin önem kazandığı havacılık endüstrisinde yeni boyutlar geliştirmiştir.

Bir diğer yeni uygulama aromatik poliyamid elyafı (kevlar) dır. Bu tip elyafın kullanılması, cam elyafı takviyeye oranla % 30 civarında ağırlık tasarrufu sağlamaktadır (Mısıroğlu M., 2001).

3.5 CTP Üretim Yöntemleri

CTP kalıplamasında kullanılan başlıca metotlar, işçilik maliyetleri, üretim prosesine gerekli ekipman yatırımı ve işçilik kalitesini gözeterek ve amaca göre kararlaştırılmaktadır. CTP kompozitin mekanik mukavemetini etkileyen faktörler, kullanılan takviye ve bağlayıcının cinsine, takviye/bağlayıcı oranına ve takviye yönüne göre değişmektedir.

Seçilen üretim yöntemi, oluşacak kompozitin mekanik özelliklerini de sınırlamaktadır. Örneğin; el yatırması ve püskürtme yöntemi gibi açık kalıplama yöntemleri ile en fazla % 30-

40 cam elyaf takviye oranı elde edilirken, bu oran profil çekme gibi, sürekli cam elyaf fitilleri kullanılarak profil doğrultusunda yüksek mukavemet elde edilen kalıplama yönteminde % 70-80 'e ulaşabilmektedir (Mısıroğlu M., 2001).

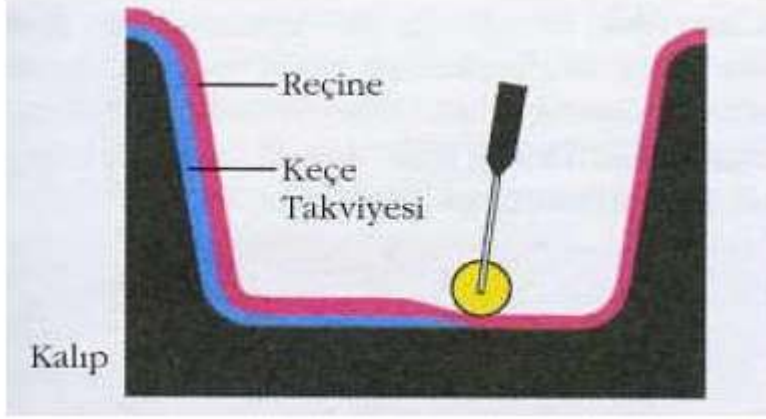
3.5.1 El yatırması Yöntemi

Bu yöntem geniş yüzeyli CTP kalıplaması için en ideal metottur. Kalıp ayırıcı oluşturulduktan sonra jelkot uygulanır. Jelkot bir polyester reçine türü olup, özellikle yüzey düzgünlüğünü sağlamak ve yüzeyde cam elyafı görülmesini önlemek amacıyla kalıp yüzeyine ince bir tabaka oluşturacak şekilde sürülerek veya püskürtülerek uygulanmaktadır. Jelkot tabakasının sertleşmesinden sonra, keçe veya dokuma tipi cam elyafı ve polyester bağlayıcı, fırça veya yün rulo ile uygulanmaktadır (Şekil 3.1). Düşük maliyetli bir kalıplama yöntemi olan el yatırması yöntemi ile en fazla % 25-40 oranında cam elyaf takviyesi gerçekleştirilebilmektedir. Yoğun bir üretim metodu olduğu için, üretim kapasitesi, emeğin yoğunluğuna, kalıp sayısına ve karmaşıklığına bağlıdır. Bir kalıptan günde ortalama 2 defa ürün almak mümkündür.

El yatırması yönteminde genellikle düşük maliyetli CTP kalıplar kullanılmaktadır. Kalıplama aşamasının tamamı elle yapıldığından sadece basit el aletlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Elyaf ve bağlayıcı karışımını sağlamak amacı ile el, fırça ve ruloları kullanılmaktadır. Ayrıca, bağlayıcı malzemenin katılaşmasını hızlandırmak için kullanılan katalist malzemelerin karışımının hazırlanabilmesi için varil veya tank gibi hacimlere ihtiyaç duyulmaktadır. Katalist malzeme olarak metiletilketon (MEKP) ve %6'lık kobalt kullanılmaktadır. Katalistin reçine içindeki karışım oranı jelleşme süresini belirlemektedir. Bu süre önemlidir, çünkü reçine jelleşmesi gerçekleşmeden kalıplama işleminin tamamlanması gerekmektedir.

Kalıplamada kullanılan cam elyaf keçenin kesilmesi kolay olduğu için, basit makaslar kullanılmaktadır. Fakat sertleşen CTP'nin kesilmesi zordur ve kesme taşı ya da elmas uçlu döner bıçaklar kullanmak gerekmektedir.

Bu yöntemde kalıplama aşamasının tamamen elle yapılması sebebiyle ürün bünyesinde hava kabarcıkları oluşması ve kalitenin düşmesi riski bulunmaktadır. Malzeme bünyesinde oluşabilecek bu boşluklar kompozitin mukavemetinin düşmesine sebep olabilmektedir. Bu sebepten dolayı el yatırması yöntemi ile yapısal elemanlar kalıplanmamaktadır (Şişecam, CTP Rehberi, 1992).



Şekil 3.1 El yatırması yönteminin genel gösterimi

3.5.2 Püskürtme Yöntemi

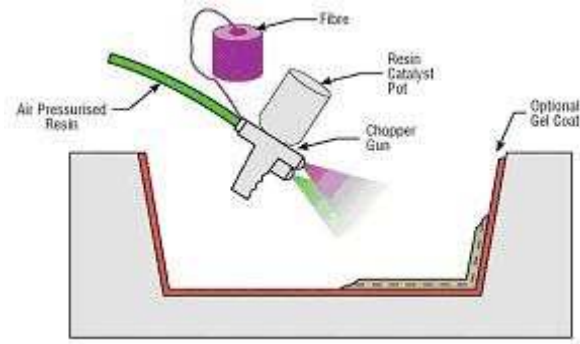
El yatırması metodunun daha seri olarak uygulanmasını sağlayan bir açık kalıplama metodudur. Böylece, iç boşluk ve karışım oranı hataları azaltılmaktadır. Üretim sırasında kalıp üzerine polyester ve cam elyafı özel bir tabanca yardımı ile birlikte püskürtülmektedir. Püskürtme metodunda, sürekli fitil cam elyafı, püskürtme işlemi sırasında 15-50 mm uzunluğunda kesilerek kullanılmaktadır. Geniş yüzeylerde seri üretim olanağı sağlamakta ve işçilik maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Püskürtme yöntemi ayrıca, malzeme tüketimini ve fireyi de azaltmaktadır. Kırılan firelerin fiyatı, el yatırması yönteminde kullanılan keçelerden yaklaşık %10-15 daha ucuz temin edilebilmektedir ve fire miktarı % 5 azalmaktadır. Bu yöntemle, reçine tüketimi yaklaşık % 20 azalmaktadır. Bu yöntemin el yatırmasına göre diğer önemli bir avantajı, kalıplama süresinin 1/4' e düşmesidir. Toplam olarak bakıldığında % 20-25' lik kazanç söz konusu olmaktadır. Bu yöntemde de el yatırması yöntemi gibi, katalist olarak MEKP/Kobalt kullanılmaktadır (Mısıroğlu M., 2001).

Püskürtme tabancası, basınçlı hava ile çalışan bir pompa sistemidir. Püskürtme tabancasının tetiğine basıldığında, biri reçineyi, diğeri katalisti hortum vasıtası ile aktaran iki adet pompa ve fitilleri eşit uzunlukta kırpan makine, eş zamanlı olarak devreye girmektedir. Tabanca ucundan yüksek hızla çıkan bu reçine elyaf karışımı, kalıba belli bir mesafeden püskürtülerek, yapışması sağlanır. Bu makinelerin 3-6 atm basınçta çalışan tipleri bulunmaktadır. Basınç için 600-1000 lt/dk hava debisi sağlayan bir kompresörün kullanılması gerekmektedir (Mısıroğlu M., 2001).

Püskürtme metodunda, stiren buharının atılması amacıyla kurulacak bir havalandırma sistemine ve basit bir konstrüksiyon üzerine gerilmiş şeffaf naylonla oluşturulan bir püskürtme odasına gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca makine ile kalıp etrafında gezmek yerine, kalıbın üzerine konduğu kendi ekseninde dönebilen bir platform oluşturulması da süreyi önemli ölçüde kısaltmaktadır. Bu yöntemde, el yatırması yönteminde olduğu gibi çoğunlukla CTP kalıplar kullanılmaktadır. Metodun uygulanması ile ilgili resimler Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Püskürtme yöntemi uygulama



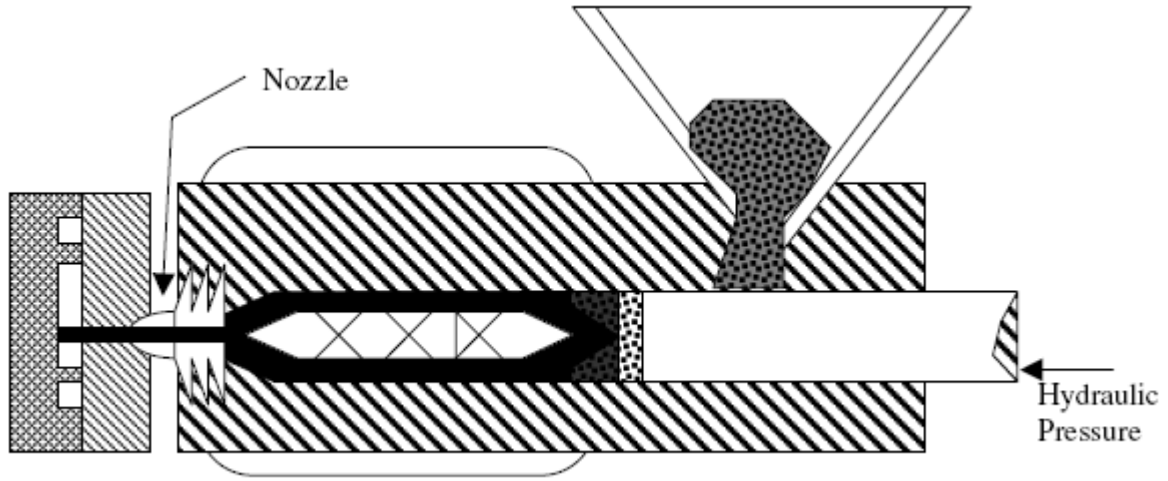
Şekil 3.3 Püskürtme yöntemi uygulama sistemi

3.5.3 Reçine Enjeksiyonu Yöntemi

Geniş yüzeylerin kalıplanmasında el yatırması ve püskürtme yöntemlerinin hız ve ürün kalitesi olarak yetersiz kalması sebebiyle reçine enjeksiyonu yöntemi geliştirmiştir. Bu üretim metodunda, dişi ve erkek olmak üzere iki ayrı kalıp kullanılmak suretiyle, her iki yüzü düzgün ürünler elde edilmektedir. Reçine enjeksiyonu için üretilmiş olan özel keçe cam elyafı, kalıp üzerine yerleştirilmekte, ve kalıplar kapatılmaktadır. Önceden hazırlanmış olan bir kanal vasıtası ile basınç altında bağlayıcı, kalıp içine enjekte edilmektedir. Kalıpların yüksek basınca dayanabilecek ağır bir konstrüksiyon gerektirmemesi, enjeksiyon sırasında hava boşluklarının oluşmaması ve kalıp sızdırmazlığının sağlanabilmesi için düşük basınçlı bir pompa (1-4 atm basınç sağlayan) ile reçineyi kalıp içine aktarırken, diğer taraftan da vakum uygulayarak reçinenin kalıp içine yayılmasını sağlanması üretimin kalitesini oldukça arttırmaktadır. Özetle reçine enjeksiyonu metodu, el yatırması ve türevi yöntemlere göre oldukça seri ve ekonomik bir yöntem olmakta ve işçilik kalitesi çok yüksek ürün elde edilebilmektedir (Şişecam, Bülten1 1997).

Parça boyutuna ve kullanılan cam elyafına bağlı olarak, 1.5 mm-20 mm arasında cidar kalınlığı ve % 23-% 68 arasında takviye sağlanabilmektedir. Çoğunlukla keçe ya da dokuma tipi cam elyaf takviyesi kullanılan RTM (Resin Transfer Moulding) yönteminde, el yatırması ile hazırlanmış, düşük maliyetli CTP kalıplar tercih edilmektedir. Kalıplama işlemi sırasında, takviye ve reçinenin karışımı kolaylaştırmak ve üretim süresini azaltmak için düşük viskoziteli polyster reçineler kullanılmaktadır. Reçine enjeksiyonu yönteminde, kalıp maliyetlerinin düşük oluşu ve kullanılan ekipmanın nispeten basit ve ucuz oluşu ilk yatırım maliyetini düşürmektedir.

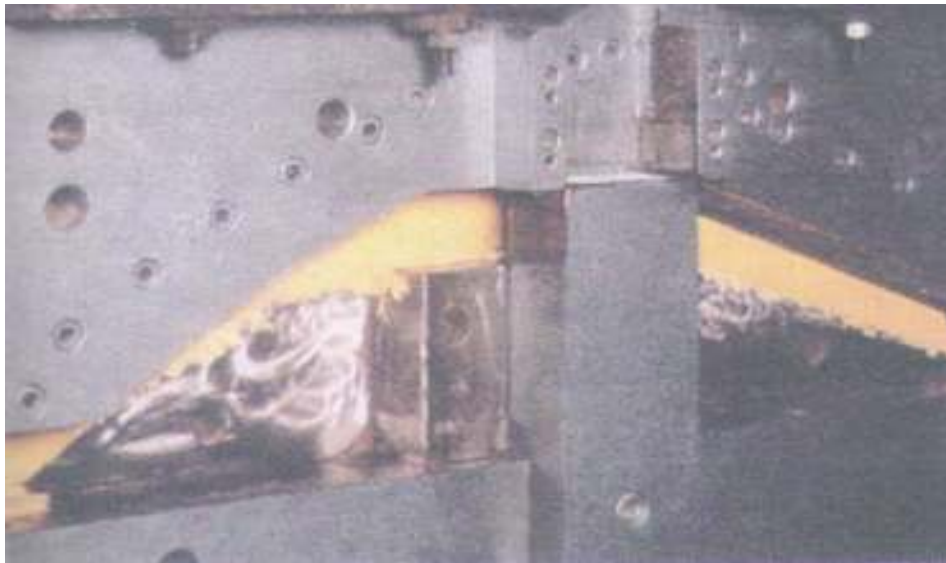
RTM yöntemini tercih eden sektörlerin basında, % 58 ile otomotiv sektörü gelmektedir. Bunu % 20 ile demiryolu, % 7 ile havacılık ve gemi inşa sektörleri takip etmektedir. Bu yöntemle, büyük boyutlu karmaşık parçalar, sandviç konstrüksiyon ürünler ve farklı bölgelerinde farklı mekanik özellikler ve farklı kalınlıklar isteyen parçalar tek seferde kalıplanabilmektedir. inşaat sektöründe ısı yalıtımlı geniş cephe panelleri ve reklam panoları bu yöntem ile üretilmektedir. Yöntemin uygulanması ile ilgili bir resim Şekil 3.4'de verilmektedir (Mısıroğlu M., 2001).



Şekil 3.4 Reçine enjeksiyonu uygulaması [22]

3.5.4 Soğuk Pres Yöntemi

Seri ve iki yüzü düzgün ürün üretilebilen bir kalıplama yöntemidir. Bu yöntemde, dişi ve erkek olmak üzere iki kalıp kullanılmaktadır. Dişi ve erkek kalıpların arasında, ürün kalınlığı kadar bir boşluk kalması ve basınç uygulanması esnasında reçinenin kalıp içersinde yürüebilmesi için, hava tahliye deliklerinin bulunması gerekmektedir. Soğuk preste kalıbın dışarıdan ısıtılmasına gerek yoktur. İlk kalıplama sırasında meydana gelen egzotermik reaksiyon kalıp için ısıtarak kalıplama süresinin kısaltmaktadır. Basıncın kalıp yüzeyine eşit ve homojen olarak yayılması için, genellikle ahşap, çelik ya da betondan yapılmış takviyeler gerekmektedir. Bu kalıplama metodu için uygulanan basınç genellikle 10 N/cm² (1 atm) civarındadır. Yöntemin uygulanması ile ilgili bir resim Şekil 3.5’de verilmektedir.



Şekil 3.5 Soğuk pres uygulanması

3.5.5 Elyaf Sarma Yöntemi

Bu yöntem genellikle boru ve silindirik tank gibi malzemelerin üretimi için kullanılan kalıplama metodudur. Elyaf sarma yönteminde, takviye olarak sürekli cam elyaf lifler, bağlayıcı olarak da, genellikle polyester veya epoksi reçineleri kullanılmaktadır. Bunların dışında özel amaçlı üretimlerde istenen özelliklere göre silikon, fenolik, düşük yoğunluklu hidrokarbonlar ve polyamide reçineler de kullanılabilir.

Sürekli cam elyafından fitillerin bağlayıcı malzeme banyosunda ısıtıldıktan sonra, dönen bir kalıp üzerine belirli açılarda sarılması şeklinde uygulanmaktadır. Sarımın, kompozitin maruz kalacağı öngörülen yükleri karşılayabilmesi için, cam elyafının farklı açılarda ve çok katlı olarak örülmesi mümkündür. Sarma makinesi ve kalıp, bu yöntemin en önemli ekipmanlarıdır. Sarım işleminde, elle kontrol edilebilen, bilgisayar kontrollü olanlara kadar değişen farklı birçok makine mevcuttur. 9 m çapa, 46 m uzunluğa sahip ürünler bu yöntemle kalıplanabilmektedir. Endüstriyel, hızlı üretim, yüksek mukavemet ve mükemmel kalite kontrolü elde edilmektedir.

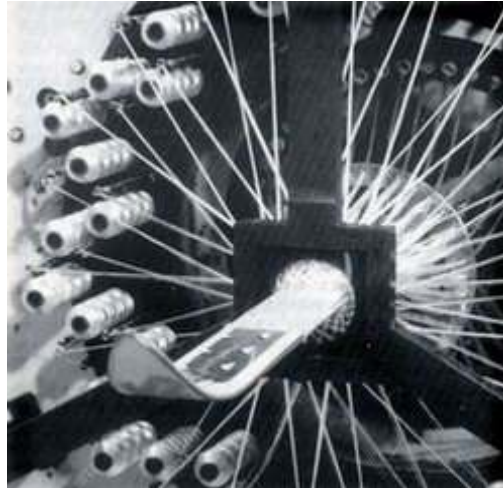
Ürünlerde % 60-75 oranında cam elyaf takviyesi sağlanabilmektedir. El ile kumanda edilen makineler, bilgisayar destekli otomatik kontrollü makinelere oranla çok daha ucuz olmakta ve 12 m uzunlukta, 30 cm-4 m çapında parçaların kalıplanmasına kolaylıkla olanak tanımaktadır (Mısıroğlu M., 2001).

Elyaf sarma yönteminde kalıplarda genellikle metal malzeme kullanılsa da, termoset kompozit, kalıplanmış termoplastik, şişirilebilir plastik ve özel uygulamalarda tercih edilen çözünebilir tuzlardan oluşan kalıplar da kullanılmaktadır. Ancak, çözünebilir kalıplar bir defaya mahsus kullanılabilir. Kalıp tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli hususlar, elyaf sarma işleminde oluşacak gerilimlere kalıbın dayanıklı olması, sertleşmiş ürünün kalıptan çıkarılması sırasında kalıbın ürün yüzeyine zarar vermeyecek şekilde imal edilebilmesidir (Mısıroğlu M., 2001).

Kalıplanan ürün, kalıpla birlikte sertleşmeye bırakıldığından, küçülebilir kalıp kullanımı önem kazanmaktadır. Çapı küçülebilir kalıpların basında şişme kalıplar gelmektedir. Kalıp kendi eksenini etrafında dönen bir şaft vasıtasıyla döndürme mekanizmasına bağlıdır ve kendi eksenini

etrafında dönen kalıba, reçine ile ıslatılmış elyaf lar istenilen açı ile sarılarak üretim gerçekleştirilmektedir (Mısıroğlu M., 2001).

İkinci bir yöntem, önceden bağlayıcı emdirilmiş ve yarı sertleştirilmiş cam elyafının (Prepreg) kalıp üzerine sarılmasıdır. İlk yöntem “Prepreg” kullanımına göre depolama ve maliyet açısından daha avantajlı olsa da “prepreg” sisteminde cam elyafının reçine ile homojen karışımı elde edebilmekte ve elyafın kalıp yüzeyinde kayması engellenmektedir. Bu yöntemde de kalıptan çıkan parçaların boyutlandırılması ve kenar kesimleri için kullanılan elmas uçlu döner bıçaklar, aşırı toz yaratmakta ve bu tozun tahliyesi için havalandırma sistemine ihtiyaç duyulmaktadır (Şişecam, CTP Rehberi, 1992). Elyaf sarma yönteminde kullanılan ekipmanın şematik gösterimi Şekil 3.6’de sunulmaktadır.



Şekil 3.6 Elyaf sarma yöntemi makine ekipmanları

3.5.6 Savurma Döküm Yöntemi

Bu yöntem de boru, tank ve direk gibi silindirik ürünlerin yapımında kullanılmaktadır. Elyaf sarma yönteminden farklı, cam elyafının sürekli olmaması ve parçacık şeklinde bağlayıcı ile birlikte püskürtülmesidir. Kalıbın santrifüj ile döndürülmesi ile meydana gelen merkez kaç kuvveti, kompozitin kalıp yüzeyine her iki yüze homojen olarak dağıtılmasını sağlamaktadır. Başlıca kullanım alanı, 5 m’ ye kadar çaplı boruların kalıplanmasıdır. Polyester, vinil ester veya epoksi bağlayıcılar kullanarak üretim yapılabilmektedir. Bu yöntem ile elde edilen ürünün mukavemetini arttırmak için kum dolgulu polyester ile ayrı bir tabaka uygulanabilmektedir. Bu yöntem uygulanarak üretilen borularda hava kabarcığı bulunmamakta ve her iki yüzü düzgün ürün elde edilebilmektedir. Kalıbın dönüş hızı kalıp

çapına bağlıdır. Yaklaşık 2 m çapında bir ürün için dakikada 180 devir yeterli olmaktadır. Kalıbın döndürülmesi, ürünün sertleşmesine kadar devam etmektedir.

3.5.7 Devamlı Levha Üretim Yöntemi

Bu yöntem sadece iki yüzü düzgün oluklu ya da oluksuz şeffaf ya da opak levha üretimi için kullanılmaktadır. Takviye, bağlayıcı ve katalist malzeme karışımı iki film tabakası arasında sıkıştırılarak bağlanmaktadır. Daha sonra fırınlanarak, istenilen form elde edilmektedir. Ayrıca film olarak, polyester veya selofan kullanılmaktadır. Bağlayıcı, ayırıcı film tabakası üzerine düzgün bir kalınlık oluşturacak şekilde yayılmakta ve üzerine cam elyaf takviyesi olarak keçe veya kırılmış demetler yayılmaktadır. Katmanlar rulolar arasından geçirilerek oluşabilecek hava kabarcıkları engellenmekte ve sabit bir levha kalınlığı elde edilmektedir. Daha sonra kompozit kalıplardan ısıtılarak geçirilmek suretiyle istenilen profil şekli verilmektedir. Bu yöntemle dakikada 12 m'lik üretim hızı elde edilebilmektedir .

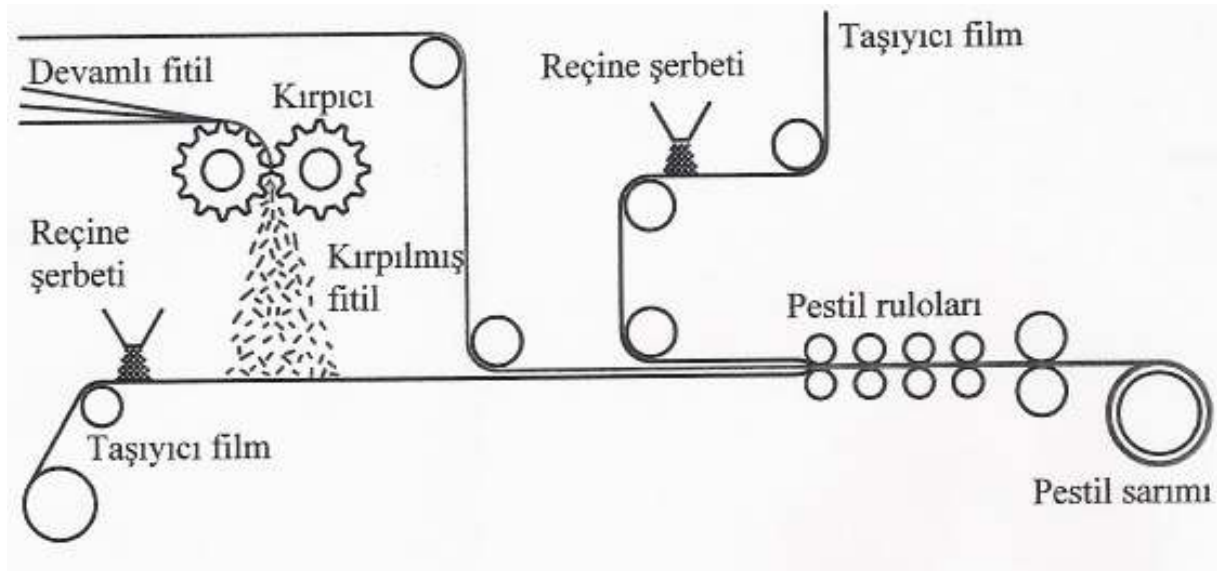
Işık geçiren levha üretimi için cam takviyesinin toz bağlayıcılı keçe olarak veya kırılmış demet olarak kullanılması ve polyester reçine ile es değerinde bir ışık kırılma indisine sahip olması gerekmektedir. Cam takviyesi olarak, özel hallerde dokunmuş cam elyafı da kullanılabilir. Bu tür uygulamalarda cam elyafı dokumasının önce polyester banyosundan geçirilip, bağlayıcı fazlasının sıyırılmasından sonra ayırıcı film tabakaları arasında sıkıştırılması tavsiye edilmektedir. Hava koşulları ile temas edecek levhaların takviye oranının % 30'dan yüksek olması gerekmektedir.

3.5.8 Hazır Kalıp Bileşimleri (HKB)

Ürün boyutu ve et kalınlığına göre, 3-6 dakikalık bir kalıplama süresi sağlayan çok hızlı ve seri bir kalıplama metodudur. HKB, bünyesinde cam elyafı, bağlayıcı, katkı ve dolgu malzemeleri içeren, hamur şeklinde, kalıplanmaya hazır bir kompozit malzemedir. HKB, 150-170 °C sıcaklıkta, 50-120 atm basınç altında çelik kalıplarda şekillendirilmektedir. Genellikle pestil ve hamur olmak üzere, iki şekilde mevcuttur. Pestil şeklinde HKB'lerde 25-50 mm uzunlukta, hamur şeklinde HKB'lerde 3-12 mm uzunlukta kırılmış cam elyaf takviye malzemesi kullanılmaktadır. HKB'lerde, pestil şeklinde olanlarda % 15-25 oranında takviye sağlanabilmektedir. Bunlara ek olarak, iki yönlü takviyesi olan, elyaf sarma yöntemi ile hazırlanmış, %80 oranına kadar takviye ihtiva edebilen HKB'lerde üretilmektedir. HKB'lerde bağlayıcı olarak, yüksek reaksiyon veren ve kimyasal olarak viskozitesi yüksek, izoftalik veya ortoftalik polyester reçineler kullanılmaktadır.

Polyester bağlayıcı türleri sertleşme sırasında dolgunsuz olarak % 5-6 arasında değişen hacimsel çekme özelliği göstermektedir. Bu çekme oranı yüksek dolgu maddesi içeren HKB'lerde % 0.5'e kadar düşebilmekte ve yüzey düzgünlüğü aranan uygulamalarda tercih edilebilmektedir.

HKB'lerde, ortam sıcaklığında aktif olmayan katalizörler kullanılmaktadır. Ekipman olarak 120-170 °C sıcaklıkta çalışan sıcak pres kalıplama makineleri kullanılmaktadır. İstendiği takdirde HKB'ler enjeksiyon yöntemi için de kullanılabilir. Üretim prosesi ve üretim düzeneği şematik olarak Şekil 3.7'de gösterilmektedir (Şişecam Bülten 8 1997).



Şekil 3.7 HKB üretim prosesi ve ekipmanları

3.5.9 Profil Çekme Yöntemi

Sürekli fitil cam elyafın bağlayıcı malzeme banyosundan geçirildikten sonra, istenilen profilde 120-150 C' ye ısıtılmış bir kalıp içinden çekilmesi yöntemidir. Elyaf takviyesi yönünde çok dayanıklı ve cam elyaf oranı %50-80 civarında profil ürünler elde edilebilmektedir. Üretilen profiller, yüksek mekanik özelliklerinin yanı sıra, çok kolay işlenebilmekte, hem mekanik olarak hem de yapıştırılarak birleştirilebilmektedir (Şişecam Bülten 7 1996).

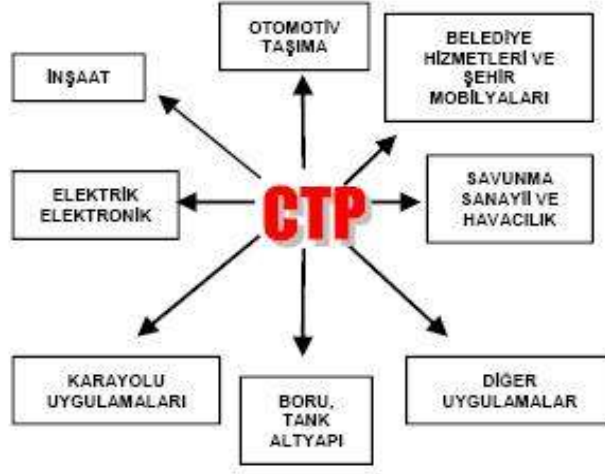
Profil çekme yönteminde kullanılan kalıplar genellikle 25 mikron kalınlığında krom kaplanmış yüksek karbonlu çelikten üretilmektedir. Kalıp uzunluğu, genellikle 90- 110 cm arasında değişmekte, küçük kesit alanlı basit profiller için 60 cm, büyük kesitli karmaşık profiller için ise 150 cm uzunlukta tercih edilmektedir. Profil çekme yönteminde en önemli parametre, sıcaklık dağılımının kalıp boyunca homojen olmasıdır; zira oluşabilecek sıcaklık farklılıkları, profilde deformasyona yol açabilmektedir.

Bu yöntemde sıklıkla kullanılan bağlayıcılar, izoftalik polyester bağlayıcılarıdır. Ayrıca, ortoftalik, teraftalik polyester, vinilester ve termoplastik bağlayıcıların kullanımı da mümkündür. Bağlayıcılarda, iyi ıslanmayı sağlayabilecek düşük viskozite veya seyreltilebilme özelliği aranmaktadır. Bağlayıcılarda yangın dayanımı, dolgu maddesi olarak alüminyum hidroksit kullanılması ile iyileştirilmektedir.

3.6 CTP'nin Kullanım Alanları

CTP'ler geçmişten günümüze kadar sürekli gelişim içinde olmuştur. Görüldüğü üzere bugünkü geldiğimiz aşamada, büyük açıklıklı köprüler, çatı makasları, prefabrike konutlar, cephe kaplamaları, paneller, kuleler, merdivenler, platformlar, yüzme havuzları, istenilen ebatlarda profiller, beton kalıpları, köprü platformları ve ayakları, otoyol korkulukları, temel kazıkları gibi inşaat sektöründe bir çok alanda birincil ve yardımcı malzeme elemanı olarak kullanılmaktadır. Günümüzdeki Ar-Ge çalışmaları hızla devam etmekte ve alternatif malzeme olma yönünde hızla ilerleme kaydetmektedir. CTP'lerin bu nedenli kullanım alanlarının yaygın olması ve araştırma konusu olmasının başlıca nedenleri; Mukavemet / ağırlık oranının yüksek olması, sertlik, hava koşullarına dayanım, kimyasal maddelere yüksek dayanım, sınırsız kalıplama kolaylığı, istenilen mukavemette üretilebilme imkanı, kolay işçilik ve korozyona karşı dayanım gibi özellikler sayılabilir. Bu özelliklerden en önemlilerinden bir tanesi istenilen mukavemette üretilebilme imkanını sunmasıdır.

CTP' DEN NELER YAPILYOR ?



Şekil 3.8 CTP kullanım alanları

Bunların yanın da trafik işaretleri, merdivenler, platformlar, zemin kaplamaları, çatı kaplamaları, oluklar, cephe kaplamaları vb. gibi yerlerde geniş kullanım alanı bulmuştur.

3.7 CTP Borular

Endüstriyel inşaatta çok önemli bir yer tutmaktadır. Bunun başlıca nedeni, içme suyu, kimyasal maddeler, kanalizasyon, proses suyu gibi alışkanlıkların taşınmasındaki ihtiyaçların karşılanmasına en uygun koşullarda çözüm getiren üstün nitelikli ve uzun ömürlü bir malzeme olmasıdır. Gerek büyük çaplı (2500 mm' ye kadar), gerek küçük çaplı (50 mm'ye kadar) borular CTP malzeme kullanılarak yapılmaktadır. Her ne kadar, açık kalıplama metotları ile de CTP boru üretme olanağı bulunsa da, prosesin hızı nedeni ile genellikle “elyaf sarma” metodu kullanılmakta ve % 60-70 oranında cam elyafı takviyesi sağlanabilmektedir. Üretim metodu sayesinde, istenilen iç basınç dayanımına uygun olarak üretilebilmektedirler.

CTP borular diğer ikame borularının tersine, rijit değil esnek olarak tasarlanmaktadır. Bu sayede, kendisini çevreleyen toprak ile homojen bir sistem oluşturup, dış yüklerin etkisini toprağa transfer edebilmektedir. Yapımında kullanılan bağlayıcı türüne (genellikle polyester

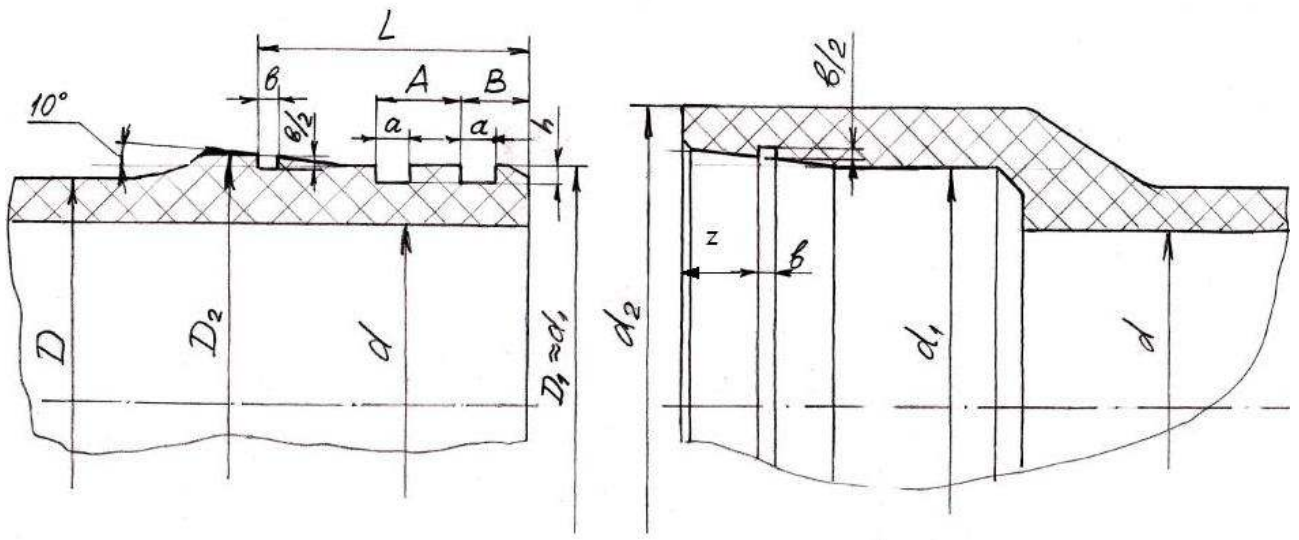
veya epoksi) bağlı olarak, pek çok kimyasal maddeden etkilenmediğinden, her türlü korozif zeminde, bataklık ve deniz geçişlerinde ve bir çok kimyasal akışkanın nakli ve prosesinde vazgeçilmez bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Uzun ve verimli hizmet ömürleri (50 yıl), düşük bakım giderleri ve bağlantı kolaylığı sayesinde sıklıkla tercih edilmektedir.



şekil 3.9 CTP Borular

4 CTP BORU HİDROSTATİK BASINÇ TEST CİHAZININ TASARIMI

CTP boru imalatında üretim hattından çıkan her boru hidrostatik basınç testine tabi tutulma zorunluluğu vardır. Özet olarak; hidrostatik basınç testi, imalatı tamamlanan borunun ilgili standartlara uygun olarak, uçlarının kapatılıp içine belirli basıncın belirli süre verilmesinden sonra boru davranışının gözlenip raporlanmasıdır. Aşağıdaki şekil ve çizelgelerde tasarım için gerekli boru boyutları verilmiştir. Verilen ölçüler mm cinsindedir ve çizelgede verilen 'd' borunun anma ölçüsüdür. Standart tek parça boruların uzunlukları maksimum 12 metredir.



Şekil 4.1 CTP borunun boyutlandırılması

Resimdeki ölçülerin ayrıntıları çizelgede verilmiştir.

Çizelge 4.1 Testi yapılmak istenen CTP boruların ölçüleri

d	d1	d2	D	D2	L	A	B	A	b	h
300	330	350	315	335	200	60	25	12	6	8
350	380	405	366	385						
380	410	435	396	415						
400	430	455	418	438						
450	485	505	468	496	220	70	30	15	8	9
480	518	536	500	528						
500	543	565	525	555						
530	576	595	558	576						
560	608	626	590	616						
630	685	715	660	695	250	80	40	20	10	12
720	780	820	756	790						
800	865	905	840	875						
1000	1070	1110	1040	1082	250	80	40	25	12	15
1200	1280	1330	1250	1295						

4.1 İlgili Standartlar

Tasarlanan bu basınç test cihazına ALPT-1200 adı verilmiştir. ALPT-1200 Cam Elyaf Takviyeli Termoset Plastik (CTP) boruların TSE418 EN921, EN12201, ISO1167, ASTM D1598 standartlarına göre Hidrostatik Basınç Testi'ni yapmak amacıyla, tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu standartlara göre test sırasında basınç $\pm\%2$ hassasiyetle test basıncında kalmalıdır. Örnek olarak test basıncı 30 bar ise test numunesi içindeki basınç 30,6 bar ile 29,4 bar arasında kalmalıdır.

Bu hassasiyetin sağlanabilmesi için öncelikle mikro seviyede debi kontrolü gerekmektedir. Mikro seviyede debi kontrolü için valflerin ani olarak açılıp kapanması ise bir başka problemi ortaya çıkarmaktadır. Bu problem su darbelerinin oluşmasıdır. Cihaz tasarımının en kritik noktalarını bu hususlar oluşturmaktadır. Cihazın diğer kısımları için mukavemet, ergonomi ve zaman gibi faktörler göz önüne alınarak tasarım yapılmıştır.

4.2 Test Senaryosu

Yukarıdaki listede ölçüleri verilen boruların maksimum 30 bar basınçta hidrostatik basınç testini yapacak bir cihaz istenmektedir. Çizelgeden de görüldüğü gibi en büyük 1200 çap ve bu çap için en büyük boy 12 m olan borunun testleri bu cihaz ile yapılabilirdir. Bu en büyük boru içindeki suyun kütlesi;

$$m = \rho_{su} \cdot V_{Boru} = 1000 \cdot \frac{\pi \cdot (1.2)^2}{4} \cdot 12 = 13564,8 \text{ kg' dır.}$$

Cihaz üstüne yerleştirilen boru kapama başlıkları hizasına kadar kaldırarak eksenleme işlemi yapılacaktır. Hareketli kafa boruya doğru yaklaşarak borunun uçları kapanacaktır. Bu konumdayken hareketli kafa kilitlenerek arkadaki kafa sabitlenecektir. Hareketli kafanın önündeki pistonlar sayesinde son kalan boşluklar da alınıp su doldurma işlemi başlayacaktır. Önce sanrifüj doldurma pompası ile boru su ile tamamen doldurulacak ve sonra otomatik olarak bu pompa devreden çıkıp pistonlu yüksek basınç test pompası devreye girecektir. Basınç yükseltme işlemi için yeteri kadar su test numunesine gönderilecek ve valfler kapanarak pompa devreden çıkacaktır. Standartlarda istenilen süre kadar beklenirken borunun genişlemesinden dolayı basınç düşümleri otomatik olarak algılanarak su takviyesi yapılacaktır. Test süresinin sonunda test numunesi içindeki su boşaltma pompası ile boşaltılacak daha sonra kapaklar açılacaktır. Boru test cihazından alınarak test tamamlanacaktır.

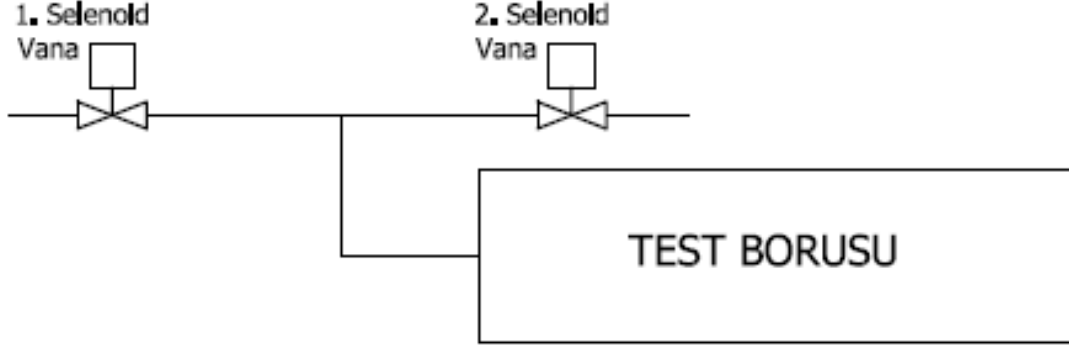
Bu testi gerçekleştirebilmek için gerekli cihazı, etkileyecek parametreler ve hesaplar cihaz tanıtımı bölümünden sonra verilmiştir.

4.3 Basınç Test Cihazının Gelişim Aşamaları

Tasarlanan bu basınç test cihazı için en kritik noktalardan biri mikro seviyelerde debi kontrolünün gerekmesidir. Aşağıda cihazın gelişim aşamalarında da belirtildiği gibi bir bardak mertebesinde su bile çok büyük basınç artışlarına sebep olmaktadır. Ayrıca valflerin ani olarak açılıp kapanmasından dolayı oluşacak su darbeleri de 5. bölümde ayrıntılı olarak incelenmiştir.

4.3.1 İki Valfli Basınç Test Cihazı

Çalışma Prensibi:



Şekil 4.2 İki Valfli sistemin çalışma prensibi.

Bu sistem pompa motor grubu ve bir valften oluşmaktadır. Pompadan gelen basınçlı su bu valfa gelir ve test numunesindeki hassas basınç ayan için gerekli olan debi miktarını sağlayacak sürede açılır ve kapanır.

Örnek olarak ; sistem basıncı 75 bar, test borusu basıncım 25 bardan 25,1 bara çıkarmak için gereken akışkan miktarını ve valfin bu kadar akışkanı ne kadar sürede geçireceğini hesaplayalım.

Test borusunun çapı=200 mm

Test borusunun uzunluğu= 1 m

Yapılan enterpolasyonlarla özgül hacmin basınca göre değişiminin denklemi bulunmuştur.

P	ro		
		50	0,0009995
25	0,0010006	51	0,000999456
26	0,001000556	52	0,000999412
27	0,001000512	53	0,000999368
28	0,001000468	54	0,000999324
29	0,001000424	55	0,00099928
30	0,00100038	56	0,000999236
31	0,001000336	57	0,000999192
32	0,001000292	58	0,000999148
33	0,001000248	59	0,000999104
34	0,001000204	60	0,00099906
35	0,00100016	61	0,000999016
36	0,001000116	62	0,000998972
37	0,001000072	63	0,000998928
38	0,001000028	64	0,000998884
39	0,000999984	65	0,00099884
40	0,00099994	66	0,000998796
41	0,000999896	67	0,000998752
42	0,000999852	68	0,000998708
43	0,000999808	69	0,000998664
44	0,000999764	70	0,00099862
45	0,00099972	71	0,000998576
46	0,000999676	72	0,000998532
47	0,000999632	73	0,000998488
48	0,000999588	74	0,000998444
49	0,000999544	75	0,0009984

Bu tablodan oluşturulacak denklem şöyledir;

$$v = (-0,000000044 * P) + 0,0010017$$

Burada 'P' bar cinsinden basınç ve 'v' m³/kg olarak özgül hacim değeridir.

$$m_{BorudakiSu..Miktari} = V_{BorudakiSu} \cdot \rho$$

Burada ρ yoğunluktur ve $1/v$ dir.

Burada başlangıçta 25 bar basınç olduğu için 25 barda suyun yoğunluğunu kullanarak;

$$v = (-0,000000044 \cdot 25) + 0,0010017 = 0,0010006$$

Buradan;

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{1}{0,0010006} = 999,4003598$$

$$m_{BurudakiSu} = \left(\frac{\pi \cdot 0,2^2}{4} \cdot 1 \right) \cdot 999,4003598 = 31,39616230 \text{ kg}$$

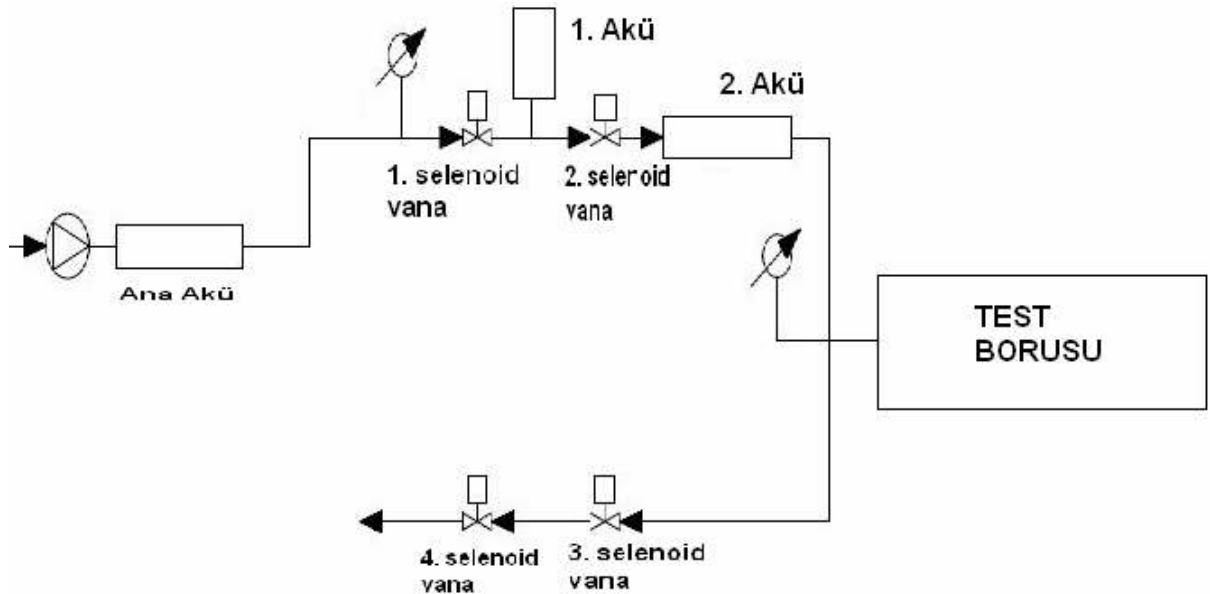
$$P=25 \text{ bar için} \rightarrow v=0,0010006$$

$$P=25,1 \text{ bar için} \rightarrow v=0,001000596$$

$$\Delta V = m \cdot \Delta v = 31,39616230 \cdot (0,0010006 - 0,001000596) = 125,584649 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$$

Görüldüğü gibi bir kenarı 5mm olan bir küp kadar (4-5 damla) suyun geçmesi 0,1 bar basınç artışına sebep olmaktadır. Test cihazında kullanılabilir pistonlu pompa ve selenoid valf ile bu kadar küçük bir kütlenin kontrol edilmesi imkansızdır. Sonuç olarak tek valfli sistem ile bu test yapılamaz.

4.3.2 Dört Valfli Basınç İki Akülü Test Cihazı Çalışma Prensipleri:



Şekil 4.3 Dört valfli sistemin çalışma prensibi

Bu sistem pompa motor grubu, 4 adet selenoid valften ve 3 adet hidrolik akümülatörden oluşmaktadır. İlk 2 adet selenoid valf arasında ara akü yer almaktadır. Test borusu ile selenoid valfler arasında ikinci akümülatör yer almaktadır. Valflerin farklı zamanlarda açılıp kapanmasıyla oluşan zaman farkı hassas ölçüm için gerekli olan basınç farkının temelini teşkil eder. Sistemde pompa çalışmaya başladığında, basınçlı akışkan ilk valfe gelir. İlk valf açılarak ara akü kaynak akışkanla doldurulur. Ara akü tamamen dolduktan sonra birinci selenoid valf kapanır. İkinci valf, test borusunu çıkarmak istediğimiz basınca kadar gerekli olan akışkanı geçirecek miktardaki bir süreyle açılır ve kapanır. Fakat ara aküdeki akışkan miktardaki azaldığı zaman ikinci valf kapanır ve ilk valf yeniden açılarak ara akü tekrar doldurulur. Basıncın düşürülmesi de aynı şekilde sıralı valflerin açılıp kapatılması ile yapılır.

4.4 Cihazın Tanıtımı

ALPT-1200 üzerinde bulunan hidrolik pnömatik ve mekatronik aksamalar sayesinde ileri seviyede basınç kontrolü sağlamaktadır. Sistemin tasarımı esnasında tüm elemanları Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Elements Method – FEM) ile yapısal analize, akış elemanları akış analizine ve çalışan üniteler Dinamik ve Kinematik analize ilgili konuda kullanılan yazılımlar ile dijital ortamda tabii tutulmuştur. Makinanın her bir elemanı 3 Boyutlu (3D) olarak dijital ortamda tasarlanmış olup her elemanın ölçüleri sabittir.

ALPT-1200 kontrol sistemi olarak 2 esas elemana sahiptir. Birincisi PLC, ikincisi ise Endüstriyel PC'dir. Sistemin algoritması PLC'de yüklü olup Endüstriyel PC veri girişi, veri toplanması ve veri depolanması için kullanılmaktadır. İşletme esnasında boru bağlanma esnasına kadar her türlü kontrol manuel ve otomatik olarak yapılabilmekte fakat test başladıktan test sonlana kadar tüm sistem otomatik olarak kontrol edilmekte acil stop butonu hariç sisteme manuel bir etki imkanı bulunmamaktadır. Endüstriyel PC dokunmatik panel kontrollü olup herhangi bir harici birime ihtiyaç duyulmamaktadır.

Sistemden veri toplamak için lisanslı Alarge Datalogger yazılımı kullanılmaktadır. Yazılım sistemin gerçek zamanlı olarak izlenmesine yani valf konumları, havalık konumları, kaldırma sistemi konumları, sistem basıncı, hidrolik basınç takibine imkan vermektedir. Yazılım tüm makineyi kontrol edebilmekte ve ancak tanımlanmış kullanıcı tarafından girilen kullanıcı adı ve şifre ile sisteme erişimi sağlamaktadır.

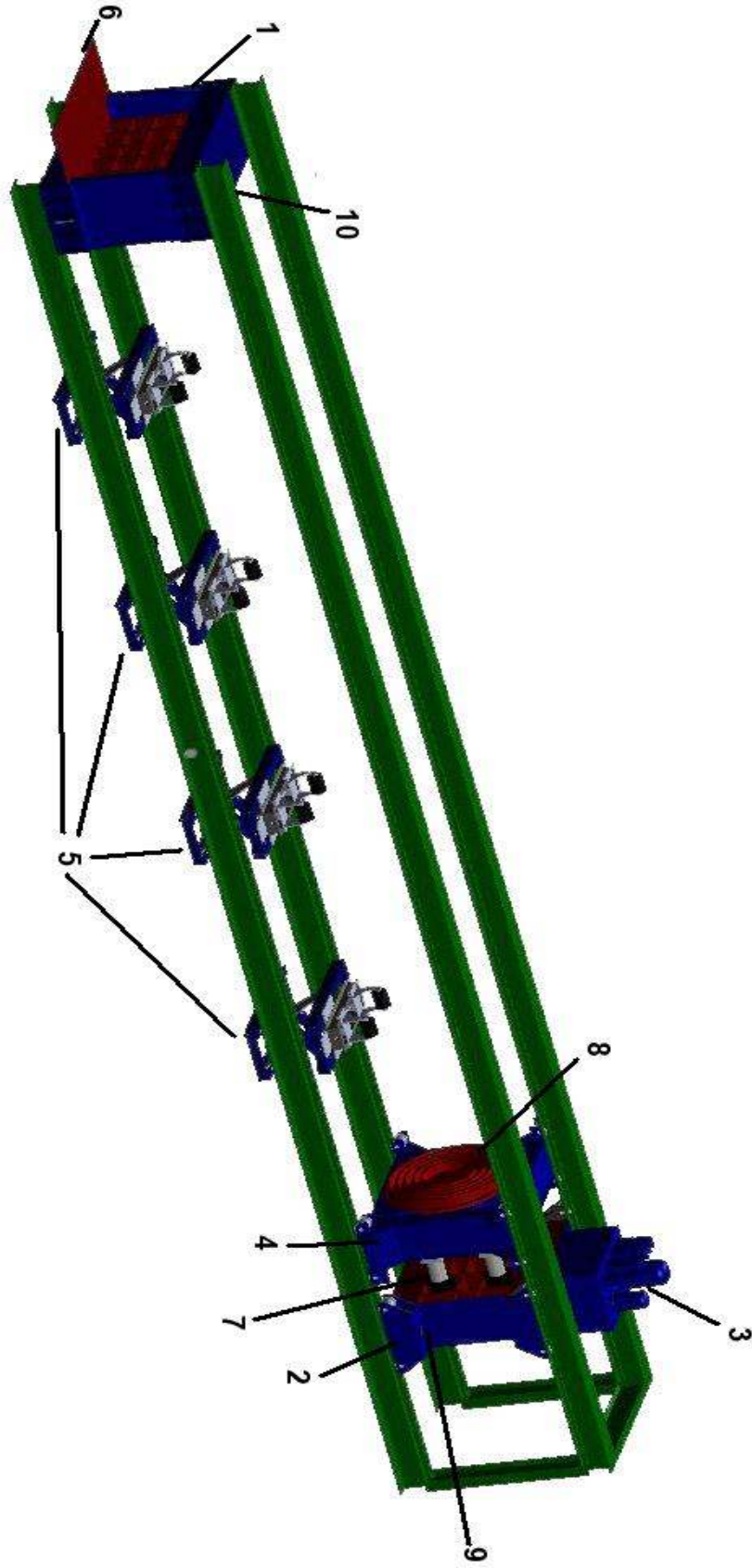
Sistem 40 bara kadar 300mm çaptan 1200mm çapa kadar 1,5 metreden 12 metreye kadar boruların ilgili standarda atfen testine imkan tanımaktadır. Sistemde hava sadece kontrol valflerinin tahriki amacıyla kullanılmakta olup basınç testi esnasında boru içine çalışma güvenliği bakımından herhangi bir hava takviyesi yapılmamaktadır. 4 valfli sistem ile damlanın 1 / 10 u hassasiyette kontrol imkanı tanımaktadır. Kontrol sistemi atımlı aralıklı olup, test sadece tek hatta yapılmaktadır. Sistem mikro seviyelerde basınç ve debi kontrolüne imkan vermektedir.

Sistemin hidrolik ünitesi TSE de tanımlı 46 numara hidrolik yağı ile çalışmaktadır. Hidrolik tank 210 litre yağ alabilmektedir. Yağ seviyesi ve niteliği sistemin sağlıklı çalışabilmesi açısından hayati önem taşımaktadır. Sistemde 4 adet hareketli kafada, 4 adet de kaldırma sisteminde ve 2 adet kilitleme olmak üzere 10 adet hidrolik piston bulunmaktadır. Hareketli kafada bulunan büyük pistonlardan her biri 115000 kg kuvvet uygulayabilmekte, bu sayede toplam kuvvet 460 000 kg olabilmektedir. Bu kuvvet 1200 mm çapta 40 bar çalışma basıncında sistemin sızdırmazlığı için gereklidir.

Sistemde kullanılan paftalar sabit kafada 3 adet ve hareketli kafada 3 adet olmak üzere toplam 6 adettir. Söz konusu 3'er pafta ile 300 mm ile 1200 mm arasındaki tüm standart çaplar test edilebilmektedir. Paftalarda sızdırmazlık için silikondan imal edilmiş özel sızdırmazlık contaları kullanılmaktadır. CTP borular için özel tasarlanan conta 2 farklı boyuttadır. 300 mm çaptan 1200 mm çapa kadar her türlü CTP boru testine imkan tanımaktadır.

4.5 Cihazın Elemanları

Cihazın üç boyutlu olarak çizilmiş resmi aşağıda verilmiştir. Ana parçaları numaralanarak açıklanmıştır.



Şekil 4.4 Basın test cihazı ve elemanları

4.5.1 Sabit Kafa

- Konstürüksiyon
- Paftalar
- Su sistemi sehpası

4.5.2 Hareketli Kafa Sabit

- Konstürüksiyon
- Kilitleme pistonları
- Sıkıştırma pistonların bağlantıları
- Tekerlekler
- Lineer cetveller
- Kontrol ünitesi

4.5.3 Hidrolik Ünitesi

- Depo
- Elektrik motorları ve hidrolik pompalar (Hesaplar)
- Valf kütükleri ve valfler (Simülasyon)
- Hortum ve bağlantılar
- Manometre

4.5.4 Hareketli Kafa Hareketli

- Konstürüksiyon
- Paftalar
- Tekerlekler
- Sıkıştırma pistonların bağlantıları

4.5.5 Hidrolik Kaldırma Sistemi (4 adet)

- Konstrüksiyon
- Kaldırma pistonları

4.5.6 Su Sistemi Alanı

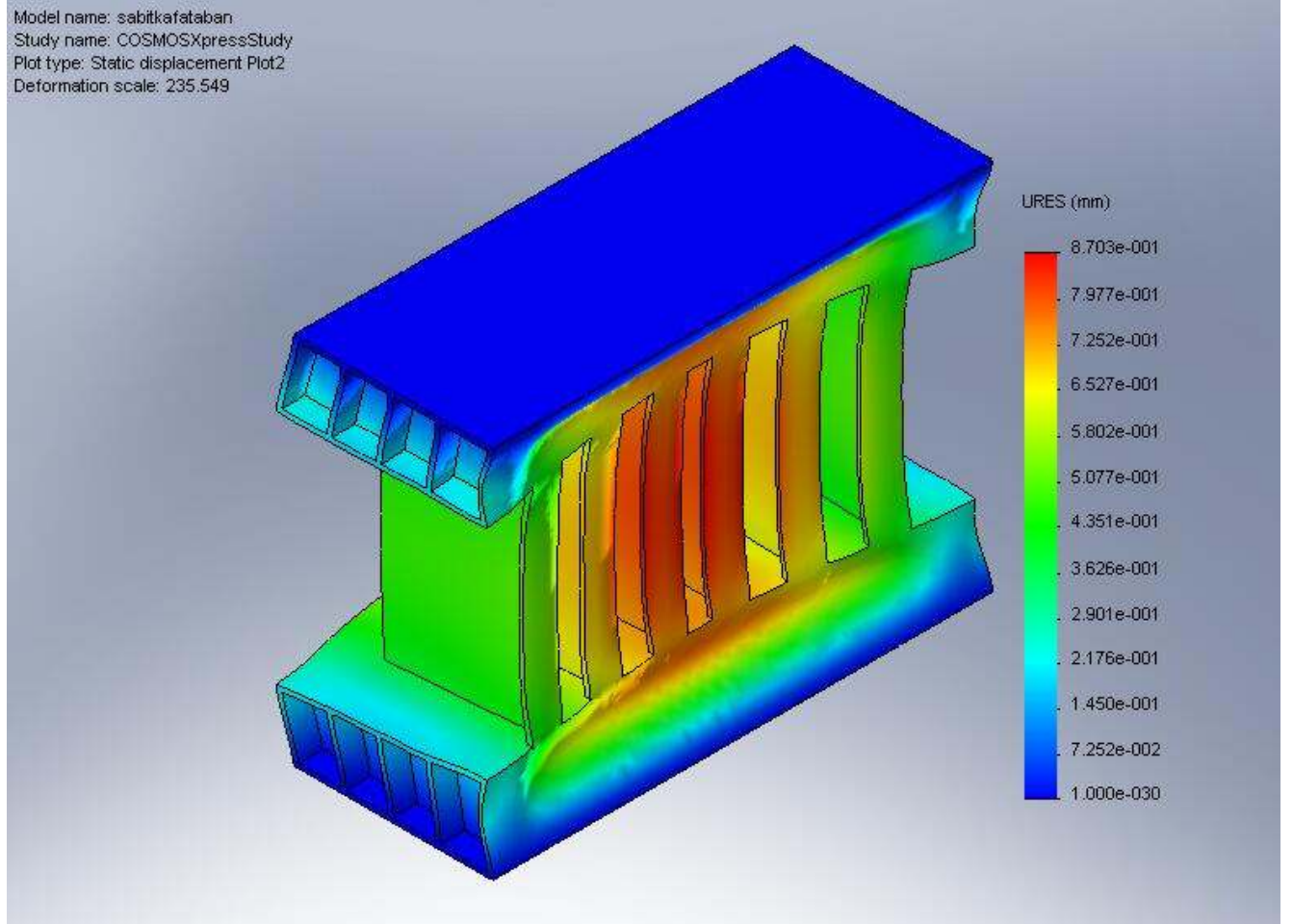
- Doldurma pompası (Hesaplar)
- Boşaltma Pompası
- Yüksek basınç sağlayan test pompası (Pistonlu pompa hakkında bilgi)
- Hidrolik akümülatörler (Akü hakkında bilgi)

4.5.7 Boru Sıkma Pistonları

- Taban ve baş bağlantıları (Çizim)
- Elemanları

4.5.8 Kilitleme Pistonu Yuvası

4.5.1 Sabit Kafa



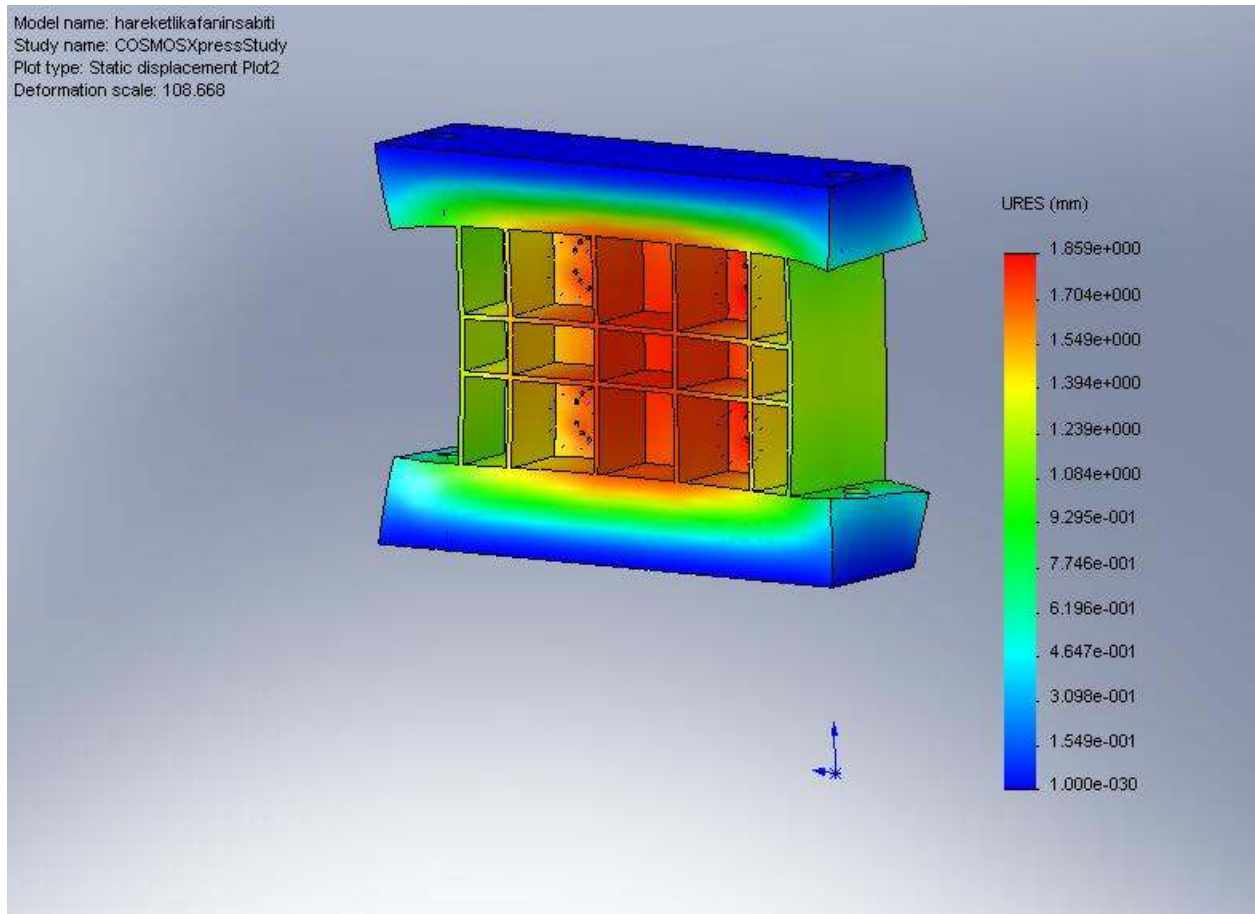
Şekil 4.5 Sabit kafanın mukavemet analizi

Sabit kafa sistemin tüm su tesisatını ve pnömomatik tesisatını üzerinde barındıran elemandır. Boru bağlanmasının ardından sisteme su doldurulmasını sağlayan tesisatı üzerinde barındırır. Bu parça şekilde gösterildiği gibi tam ortasından boru çapı kadar bir alanda maksimum 40 bar olan basınç kuvvetine maruz kalmaktadır. Analiz sonucunda maksimum boru çapı ve test basıncı için maksimum yer değiştirme 0,8 mm ve emniyet katsayısı 2,4 olarak hesaplanmıştır.

Sistem 300 mm çaptan 1200 mm çapa kadar farklı 14 adet borunun testine imkan vermektedir. Bunun için küçük sistemlerde endcap olarak tabir edilen sızdırmazlık aparatının yerini büyük sistemlerde paftalar almaktadır. Paftalar üzerinde ilgili boru çaplarını dışarıdan

saracak şekilde dizayn edilmiş, üzerinde sızdırmazlık contası yuvalarının bulunduğu sistemler mevcuttur. Bu paftaların simetrik olarak aynısından hareketli kafanın hareketli kısmında da vardır.

4.5.2 Hareketli Kafa Sabiti



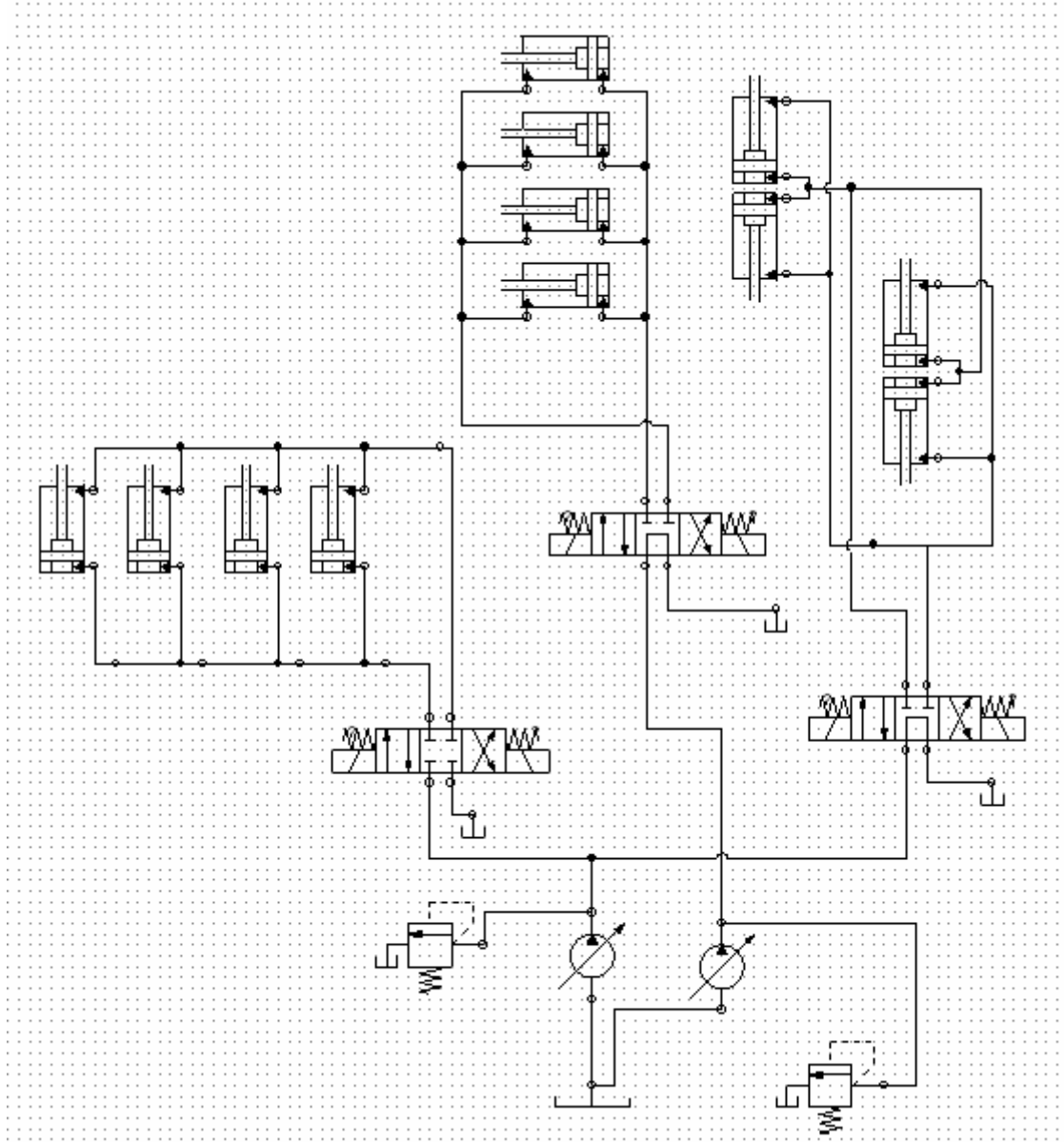
Şekil 4.6 Hareketli kafanın sabitinin mukavemet analizi

Toplam 2 farklı tahrik sistemine sahip hareketli kafa sisteminin arkada kalan kısmıdır. Üzerinde tahrik sistemi olarak 2,2 kW güce sahip motor ve 1/32 çevrim oranına sahip redüktör ile tahrik edilmektedir. Hareketli kafa sabit büyük pistonların flanşlarını üzerinde tutmaktadır. Ayrıca üzerinde hidrolik ünite ve sağ kenarında kontrol ünitesi ve elektrik panosunu bulundurmaktadır. Görev olarak farklı uzunluktaki boruların testine imkan

sağlamak amacıyla 12 metre yürüyüş mesafesine sahiptir. 2 mm hassasiyet ile hareket edebilmektedir.

Bu parçaya test basıncından doğan her biri maksimum 115000 kg olan 4 kuvvet piston tabanlarının bağlı notalardan etkimektedir. Parça kilitleme pistonlarının bulunduğu noktalardan sabitlenmektedir. Analiz sonucu 1,85 mm ve emniyet katsayısı 2,2 olarak hesaplanmıştır.

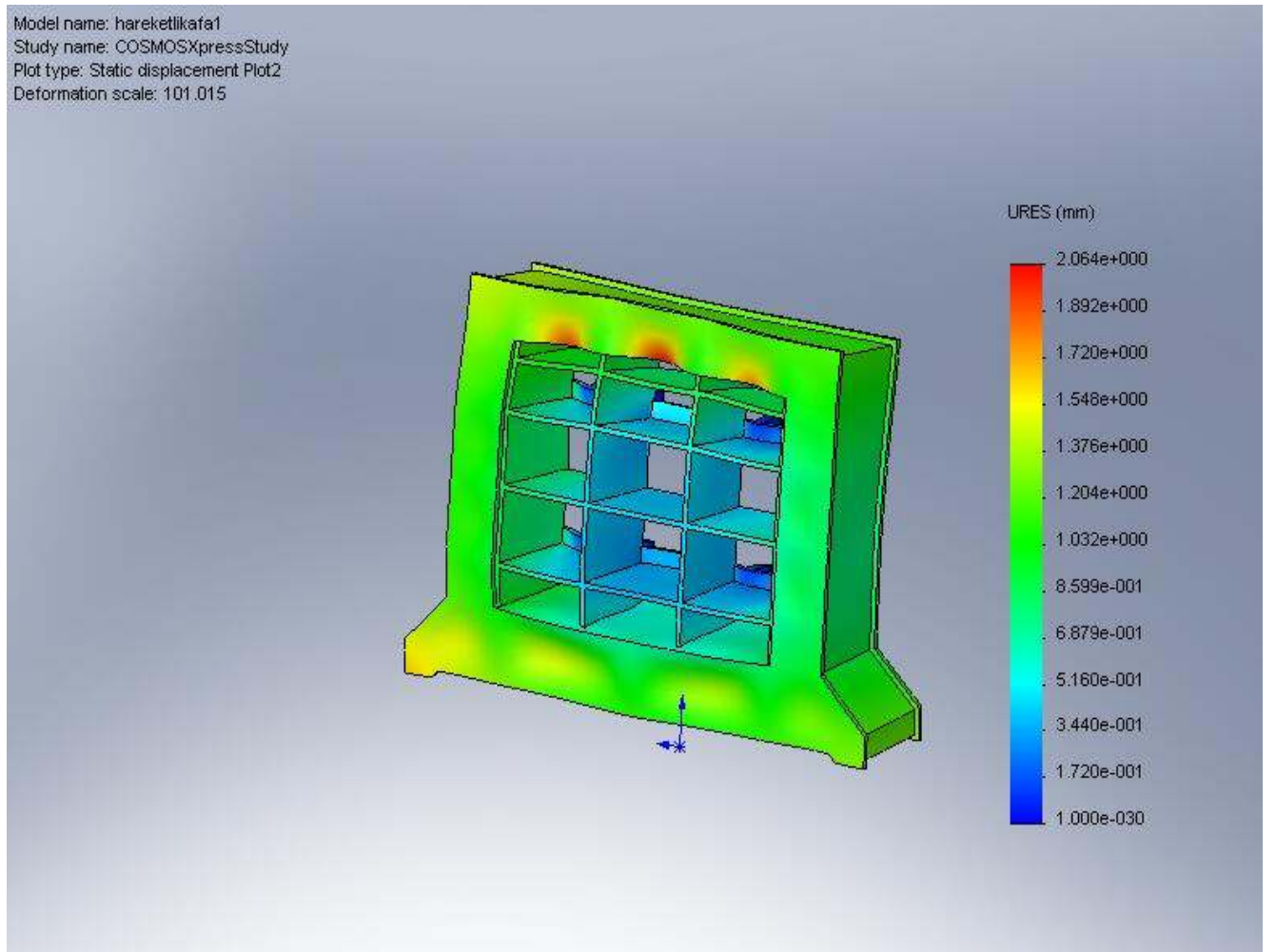
4.5.3 Hidrolik Ünitesi



Şekil 4.7 Hidrolik sistem şeması

Tüm hidrolik sistemin tahrikini sağlayan sistemi üzerinde barındırır. 210 lt hacmine sahip tankı ve 2 ayrı hidrolik pompası bulunmaktadır. Şekilde gösterilen bu iki pompadan sağdaki 110 lt/dak. debi 7,5 kW güçte olup boru sıkma pistonlarını tahrik etmekte, diğeri ise 5,5 lt/dak debi 1,1 kW güçte olup hidrolik kaldırma sistemi ve kilitleme pistonlarına hareket sağlamaktadır.

4.5.4 Hareketli Kafa Hareketli



Şekil 4.8 Hareketli kafa hareketli parçasının mukavemet analizi

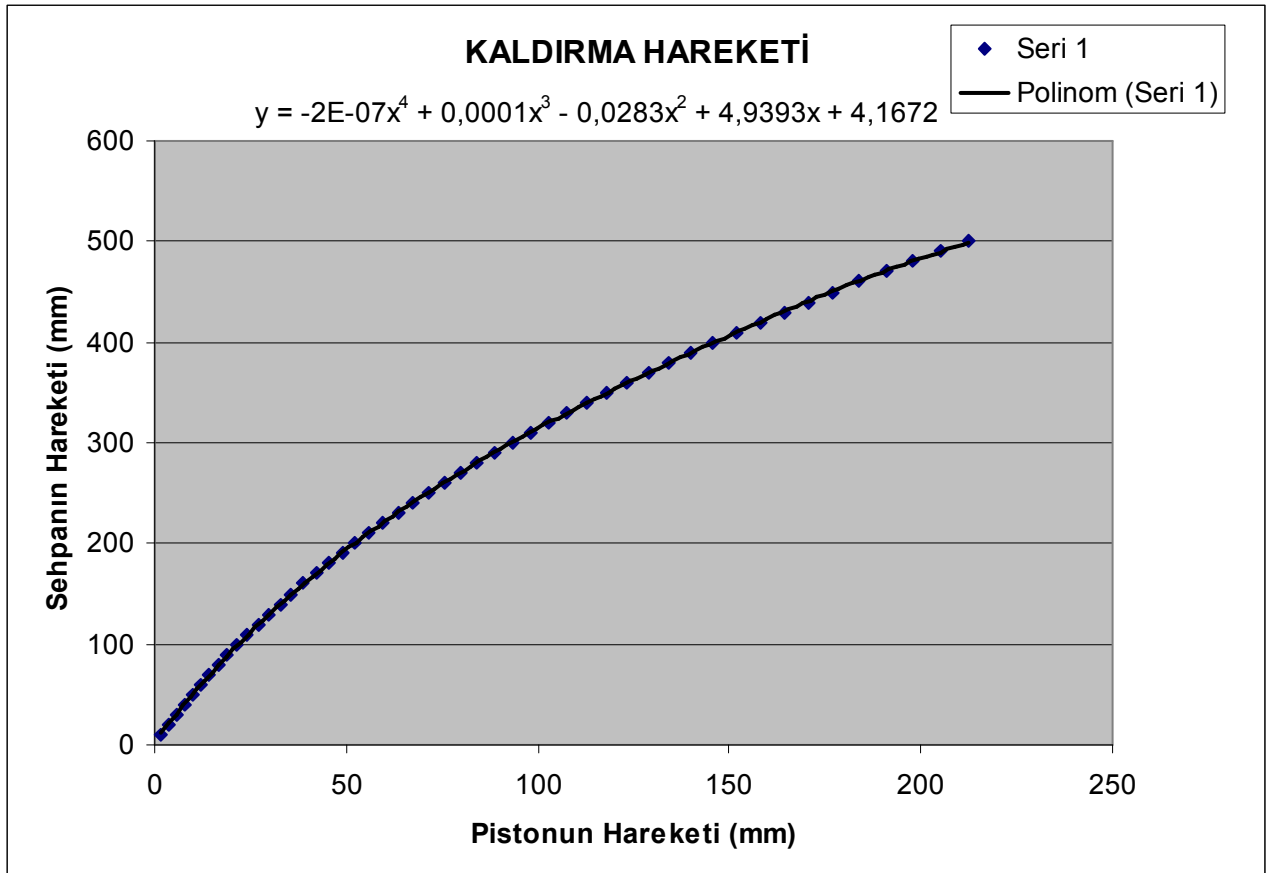
Hareketli diye tabir edilen taraftaki iki kafadan test numunesine yakın olan kafadır. Hareketli sistem üzerinde bulunan söz konusu kafa sisteme boru bağlanmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Hareketli kafanın sabitinin üzerindeki pistonların milleri bu kafaya bağlıdır ve tahriki bu pistonlarla gerçekleşmektedir. Pistonlar 0,5 mm hassasiyet ile lineer cetvellerle

kontrol edilebilmektedir. Boru boyunun hassas ayarında bu kafa kullanılmaktadır. Üzerinde pafta bağlantı elemanları bulunmaktadır. Parça arkadan 4 noktadan pistonlarla sabit tutulurken önden test borusu kesit alana test basıncına maruz kalmaktadır. Analiz sonucunda maksimum boru çapı ve test basıncı için maksimum yer değiştirme 2 mm ve emniyet katsayısı 2,01 olarak hesaplanmıştır.

4.5.5 Hidrolik Kaldırma Sistemi

Farklı çaplarda boru testine imkan verilmesi açısından gerekli bir sistemdir. ALPT-1200' de 4 adet kaldırma arabası standart olarak bulunmaktadır. Her bir araba aynı karakteristiklere sahiptir. Makas sistemi ve içerden pistonlarla tahrik edilmektedir. Piston hareketine endeksli olarak kaldırma sistemi yüksekliği değişmektedir. Fakat makaslar açılmal hareket yaptığından dolayı piston hareketine endeksli yükseklik lineer olarak değil nonlineer olarak değişmektedir.

Bu hareket aşağıdaki grafikteki gibi gerçekleşmektedir.

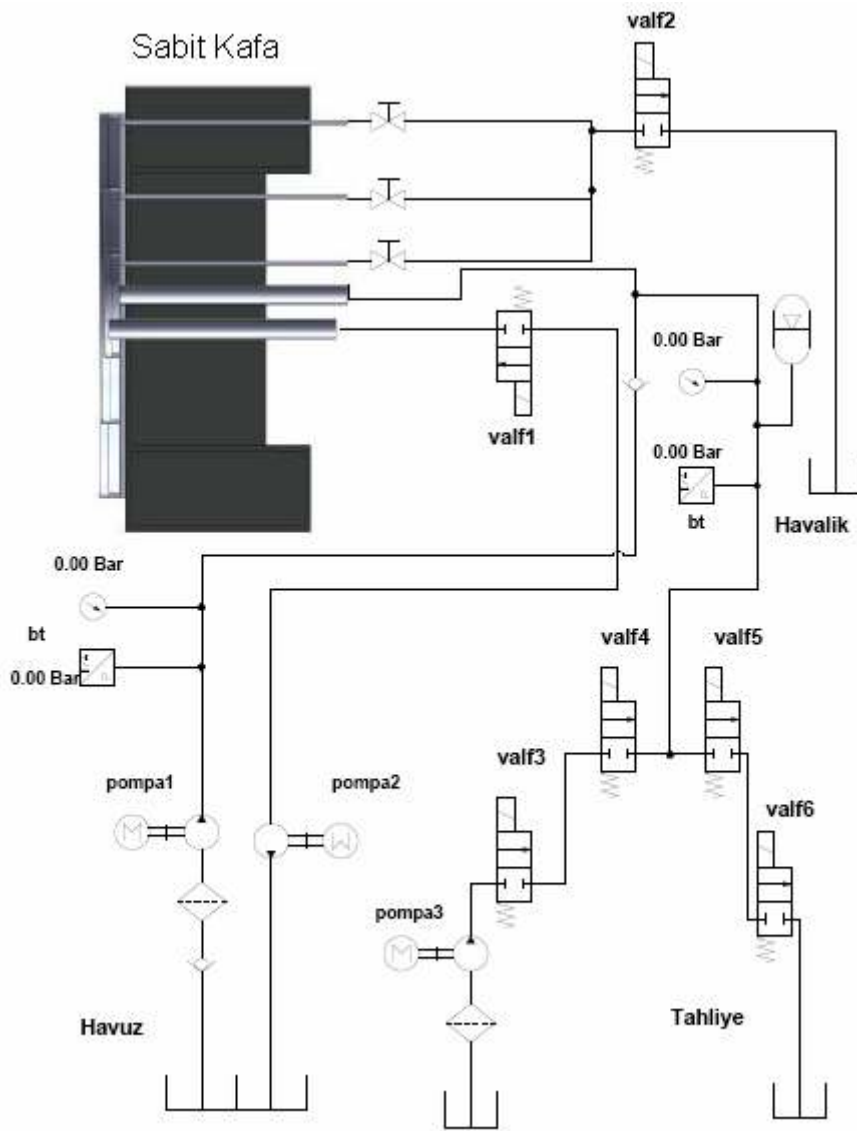


Şekil 4.9 Kaldırma sehparının yüksekliğinin piston hareketi ile değişimi

Yukarıda görüldüğü üzere sistem denklemi 4. dereceden polinom formunda olup çözümü iterasyon ile yapılmaktadır. Bunu PLC teknolojisi ile gerçekleştirmek zor olacağından polinomun çözümü Endüstriyel PC ile gerçekleştirilmektedir. Kaldırma sisteminin pistonuna bağlı olan, analog veri toplanmasına imkan veren lineer cetveller ile sistemin hareketi sürekli olarak ölçülmekte, boru çapına endeksli set değeri sürekli olarak karşılaştırılmakta ve hassas bir ölçüm ile test edilecek boru gerekli konuma getirilmektedir. Borunun belirli bir yükseklikte tutulmak istenmesinin sebebi farklı boru çaplarında boru ekseninin sürekli olarak sabit tutulmasını sağlamak ve boru testi esnasında boruda oluşan ağırlığın karşılıklı olarak dengelenmesini sağlamaktır.

Maksimum boru çapı 1200 mm ve maksimum boru uzunluğu 12000 mm su yoğunluğu 1000 kg/m³, CTP boru özkütlesi 2500 kg/m³ olmak üzere boru ağırlığı hesaplandığında, boru kütlesi 2886,338 kg olmakta, borunun içine basılan su ağırlığı 13571 kg olmakta ve toplam ağırlık 16458 kg olmaktadır. Bu da her bir arabaya düşebilecek maksimum yükün 4120 kg'dan az olduğunu göstermektedir. Bu değerden ve ortalama çalışma peryotlarından istifade ederek seçilen rulmanlar, yataklar ve pistonlar ile kaldırma sistemi sağlıklı bir çalışma rejimine sahiptir.

4.5.5 Su Sistemi Alanı

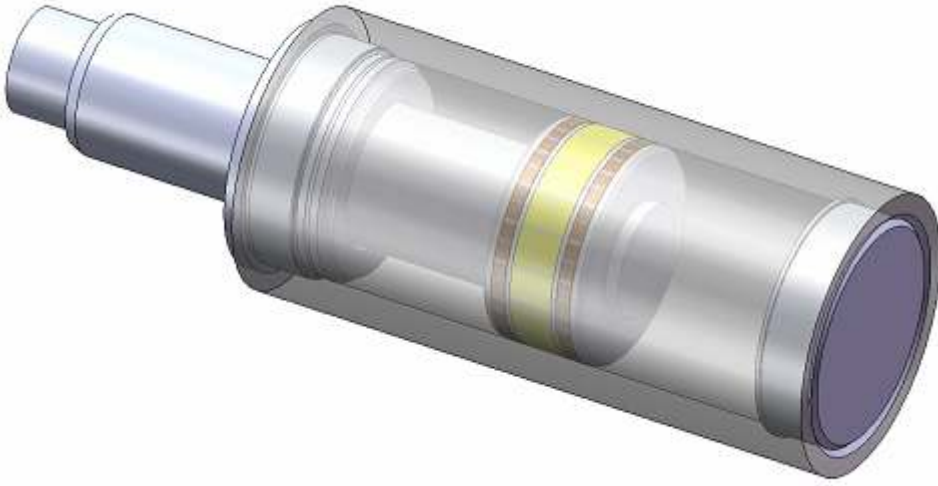


Şekil 4.10 Su sistemi elemanları ve bağlantı şeması

Hidrostatik basınç testinin gerçekleşmesi için gerekli suyun tedarik edildi elemanların bulunduğu alandır. Bu alanda su tesisatı, santrifüj pompa, yüksek basınç pompası, havalık, akü, pnömatik valfler ve bu valflerin tesisatı sıralanmaktadır. Bu alanda otomatik kontrol ile önce borunun içi su doldurulmakta ardından ise yüksek basınç pompası ile borunun içi basınçlandırılmaktadır. Bu sistemde kontrol yazılımının algoritması ile pnömatik valfler tamamen sürekli açılıp kapanmakta ve sistem basıncı stabil seviyede tutulmaya çalışılmaktadır. Sistemin su doldurulması 1200 mm çapta 12000 mm boyda boruyu 22 dakikada dolduracak 40 m³/h debide 3 kW lık pompa ile yapılmaktadır(Şekil4.10 Pompa1).

Bu pompa test borusunu ancak 0,5 bara çıkarabilmektedir. Bundan sonra 9 kW gücünde 42 lt/dak.'lık pistonlu pompa devreye girmekte ve test basıncını sağlamaktadır(Şekil 4.10 Pompa3). Test sonrası boşaltma işlemi ise 1,5 kW gücünde 40 m³/h debide pompa ile yapılmaktadır(Şekil 4.10 Pompa2). Sistemin maksimum şartlandırılmış test basıncı 40 bardır. Ayrıca basınç ayar valflerinin çalışabilmesi için pnömatik tesisatta optimum 6 bar basınçlı hava bulunması gerekmektedir.

4.5.7 Boru Sıkma Pistonları



Şekil 4.11 Boru sıkma pistonu

Bu pistonlar borunun stabil bir biçimde sisteme bağlanmasını sağlamak ve test sırasında sızdırmazlığı garanti edebilmek adına sisteme bağlanmıştır. Sabit konumda 1200 mm çapında 12000 boyunda boru 40 bar basınç ile yüklendiğinde sistem nonlineer deformasyona uğramak yerine dinamik harekete zorlanmaktadır. Bu da tüm sistemin stabilizasyonunu tehdit etmektedir. Bu sebepten ötürü bir tanesi 115000 kg karşı kuvvet uygulayabilen 4 adet piston sistemde kullanılmıştır.

$$P = \frac{F}{A} \Rightarrow 40\text{bar} = \frac{F}{\pi D^2 / 4} \Rightarrow F = 40 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 3,14 \cdot (1,2)^2 / 4 \text{ m}^2 = 4521600 \text{ N}$$

Bulunan bu değer boru alnından kafalara etkiyen basınç kuvvetidir. Bu kuvvet 4 adet piston tarafından dengelenecektir. Her bir piston i çapını 250 mm seçersek, hidrolik devrede oluşacak maksimum basınç;

$$P = \frac{F}{A} = \frac{4521600/4}{3,14 \cdot (0,25)^2 / 4} = 23069387 Pa = 230,6 bar$$

İlgili kataloglardan bu basınca dayanacak 250 mm iç çaplı pistonun dış çapı 320 seçilmiştir. Ayrıca bütün hidrolik devre elamanları oluşacak maksimum basınç olan bu 230,6 bar'a dayanacak şekilde seçilmiştir.

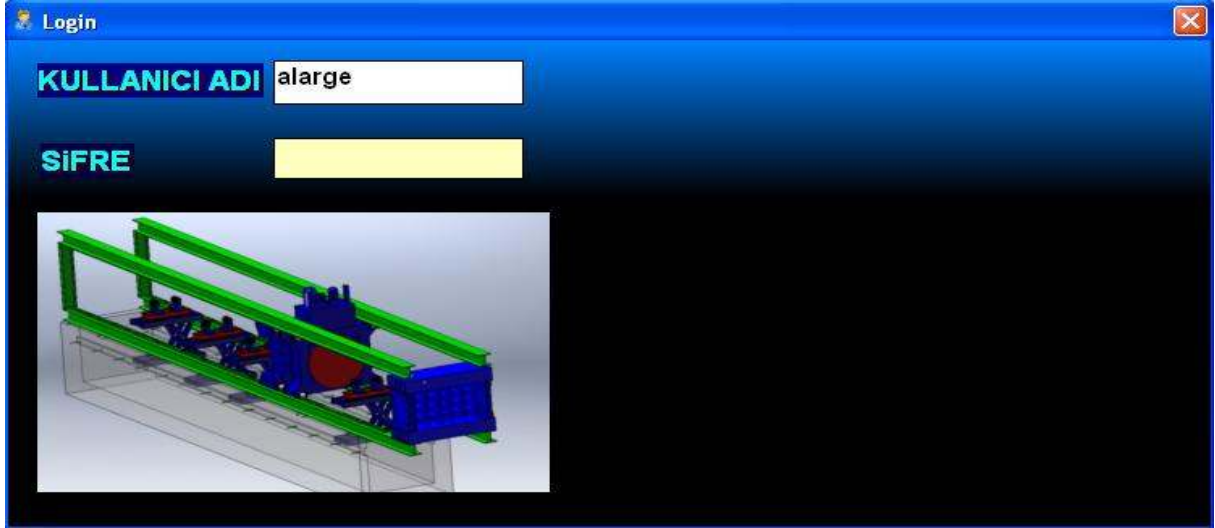
4.5.8 Kilitleme Pistonu Yuvası

Sistemin son hidrolik elemanıdır. Burada hareketli kafanın sabiti, kenar profilleri üzerinde bulunan delikli levhalara sabitlenmektedir. Test esnasında oluşabilecek kuvvetler neticesinde sistem geri harekete zorlanabilmekte ve bu da testi başarısız, sistemin de işlevsiz olmasına neden olabilmektedir. Bu bağlamda hareketli kafanın sabitinin her bir kenarında bulunan toplam iki adet double sided pistonlar vasıtası ile hareketli kafa kilitlenebilmekte ve sağlıklı bir teste imkan verilmektedir.

4.6 Sistemin Kullanılması

Boru testine başlamadan önce hidrolik kaldırma sisteminin ve hareketli kafa sisteminin 0 konumunda olması gerekmektedir. Eğer bu şartlar sağlandıysa CTP boru hidrolik kaldırma sisteminin üzerine konulur, sistem ana şalterden açılır (eğer açıksa manuel moda bütün sistem 0 konumuna getirilir) ana ekran üzerinde masaüstünde ALARGE BASINÇ TEST isimli ikona tıklanır.

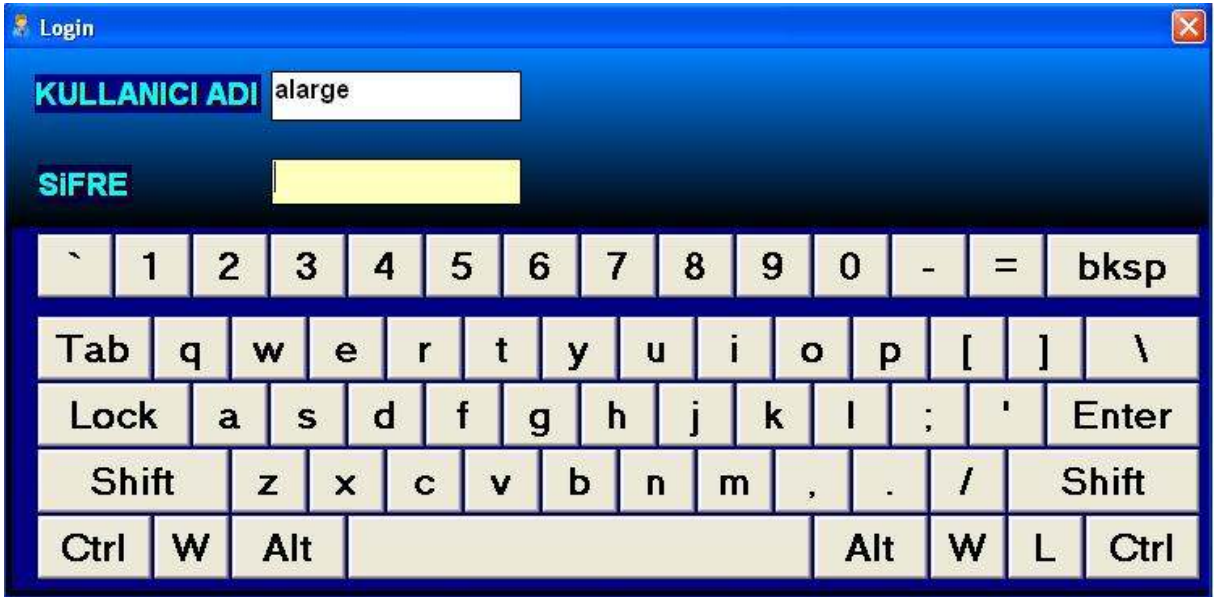
Daha sonra aşağıdaki ekran belirir;



Şekil 4.12 Sistemin çalıştırılması

Ekranı size tahsis edilen kullanıcı adı ve şifreyi girmeniz istenir.

Şifreyi girmek için kullanıcı adı yada şifre bölümüne dokunulduğunda aşağıdaki ekran belirir



Şekil 4.13 Sisteme kullanıcı adı ve şifre girilmesi

Yukarıdaki ekranda sanal klavye kullanılarak kullanıcı adı ve şifre girilir. Doğru kullanıcı adı ve şifre girildiğinde program herhangi bir işleme gerek duymaksızın açılır. Açılma işleminin ardından, yapılacak testin niteliklerini belirlemek için aşağıdaki ekran belirir.

TEST PARAMETRELERİ

BORU ÇAPI mm	1200
BORU BOYU mt	14
TEST BASINCI Bar	10
TEST SÜRESİ Dakika	15

alarge

ANA EKRAM

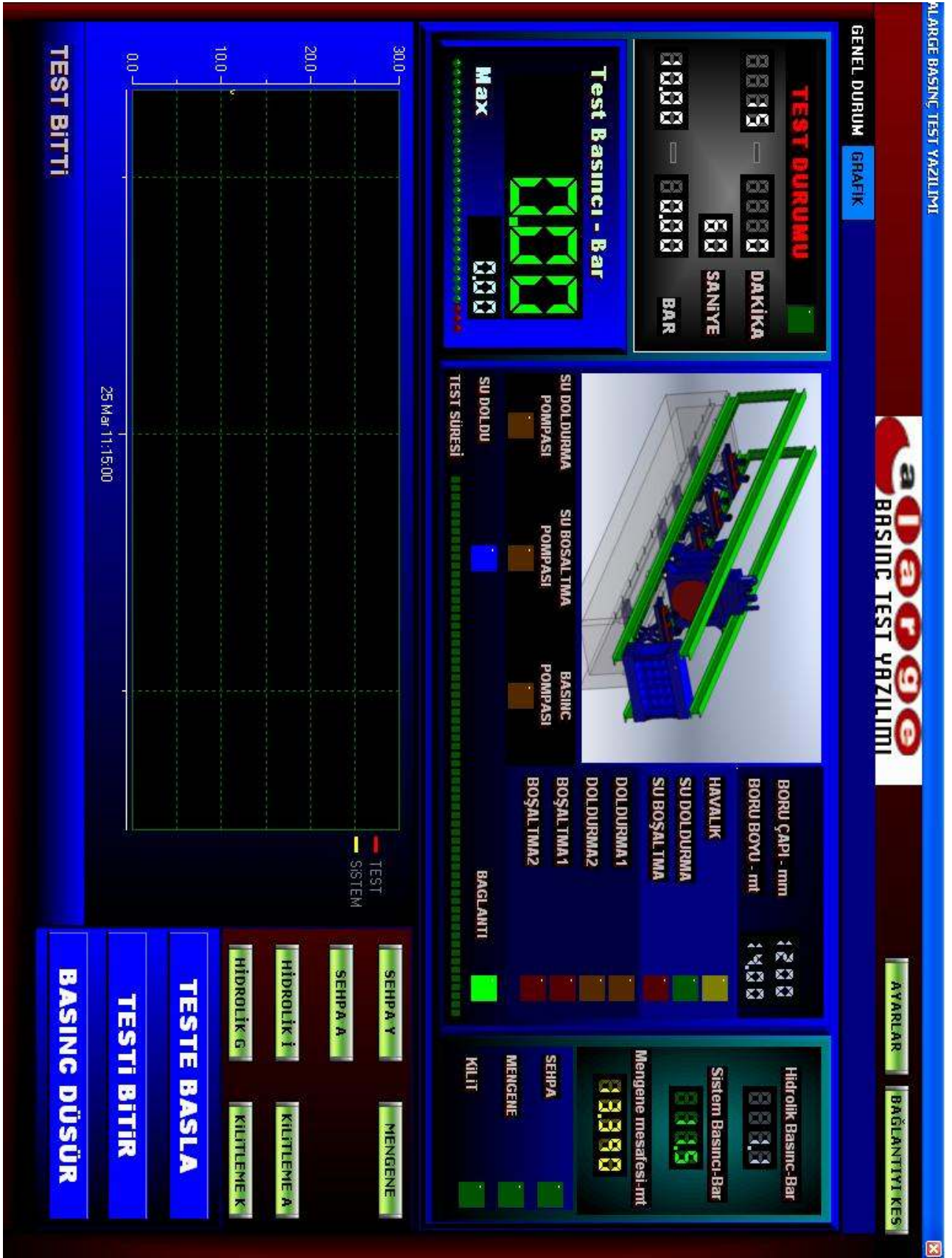
Şekil 4.14 Test parametrelerini sisteme girilmesi

Test yapılacak borunun çapı seçilmek istendiğinde boru çapı seçeneğinin yanındaki oka dokunulur ve aşağıdaki ekran belirir.

Yukarıdaki ekranda dokunmatik klavye kullanılarak test yapılacak borunun boyu girilir ve enter tuşuna basılır. Test basıncı ve test süresi için de aynı işlem tekrarlanarak test parametreleri girilmiş olunur.

Test parametreleri yazılımda tanımlı değerleri çağırarak hidrolik kaldırma sisteminin yüksekliğinin, test basıncı için gerekli hazırlıkların, testin süresinin değerlerini kullanılmak üzere hafızasına kaydeder. Bu kayıt ile yürütülecek testin tüm hazırlıkları tamamlanmış olunur.

Bu işlemlerden sonra “ANA EKRAM” butonuna tıklanarak testin durumunun ve sistemin her türlü verisinin takip edileceği işletim sistemine geçilir. Bu ekran ve özellikleri aşağıda sıralanmıştır.



Şekil 4.15 Ana ekran görüntüsü

4.6.1 Ana Ekran Açıklamaları

Test Durumu : İlk başta tanımlanan süreyi ve testin ne kadar zamandır devam ettiğini gösterir. Ayrıca test basıncını ve anlık olarak o basıncın ne kadarına ulaşıldığını belirtir.

Hidrolik Basıncı : Hidrolik sistemin basıncını belirtir.

Sistem Basıncı : Su sisteminin basıncını belirtir.

Mengene Mesafesi : Hareketli kafanın kilitlemeden sonraki mesafesini belirtir.

Havalık : Havalık'ın çalışıp çalışmadığını led olarak gösterir.

Su Doldurma : Su doldurma sisteminin çalışıp çalışmadığını gösterir.

Su Boşaltma : Su boşaltma sisteminin çalışıp çalışmadığını gösterir.

Doldurma 1 : 1 numaralı doldurma valfinin çalışıp çalışmadığını gösterir.

Doldurma 2: 2 numaralı doldurma valfinin çalışıp çalışmadığını gösterir.

Boşaltma 1: 1 numaralı boşaltma valfinin çalışıp çalışmadığını gösterir.

Boşaltma 2: 2 numaralı boşaltma valfinin çalışıp çalışmadığını gösterir.

Su Doldurma Pompası : Su doldurma pompasının çalışıp çalışmadığını gösterir.

Su Boşaltma Pompası: Su boşaltma pompasının çalışıp çalışmadığını gösterir.

Basınç Pompası : Basınçlandırma pompasının çalışıp çalışmadığını gösterir.

Test Basıncı : Borunun içindeki test basıncını gösterir.

Sehpa Y : Tıklandığında hidrolik kaldırma sistemine yukarı hareketini verir.

Sehpa A: Tıklandığında hidrolik kaldırma sistemine aşağı hareketini verir.

Hidrolik İ : Tıklandığında Hareketli kafanın hareketlisini ileri hareket ettirir.

Hidrolik G : Tıklandığında Hareketli kafanın hareketlisini geri hareket ettirir.

Kilitleme A : Hareketli kafanın kilitleme sistemini açar. (Kilit devre dışı kalır)

Kilitleme Y : Hareketli kafanın kilitleme sistemini kapar. (Kilit devrede)

Teste Başla : Tüm sistem hazır olduğunda iç basınç testini başlatır.

Testi Bitir : Testin bitirilmesine olanak sağlar.

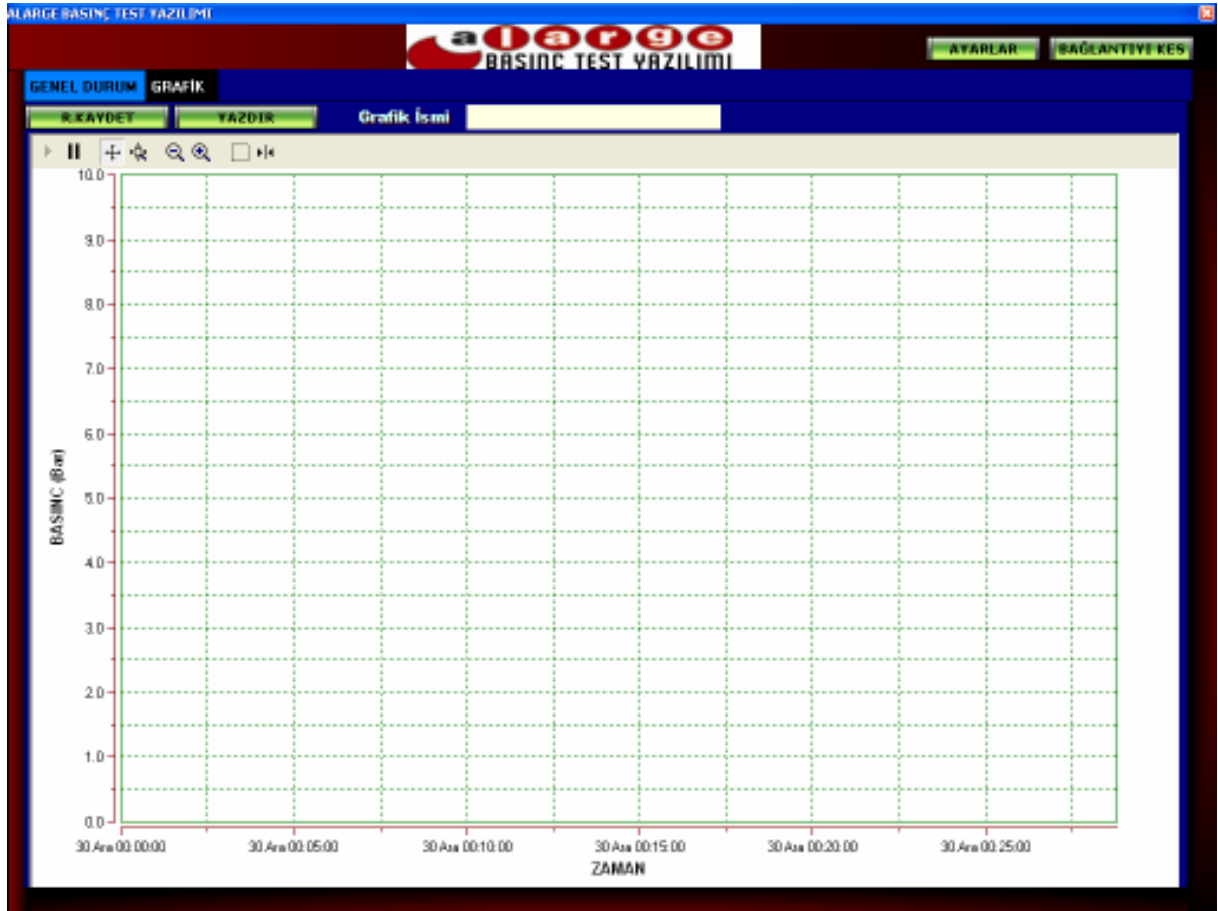
Basınç Düşür : Basıncın manuel olarak düşürülmesini sağlar.

Ayarlar : İlk ekrana dönerek test değerlerini değiştirir.

Bağlantıyı Kes : Programı kapatır.

Grafik : Grafik çizim ekranını büyük olarak gösterir.

Grafik butonuna tıklandığında ana ekran değişir ve aşağıdaki ekran belirir.



Şekil 4.16 Grafik ekranı

Burada ;

Grafik İsmi : Boru numarasını girilmesi için kullanılır. Hangi testin hangi boruya ait olduğu belirtilmiş olur.

R. Kaydet : Grafiği JPEG formatında kaydeder.

Yazdır : Grafik değerlerini Microsoft Excel formatında kaydeder.

“YAZDIR” butonuna tıklandığında aşağıdaki ekran açılır.



Şekil 4.17 Test değerlerini Excel dosyasına atılması

Görüleceği üzere açılan Excel dosyasında “Tarih” “Zaman” “Set Basıncı” “Basıncı” sütunları görülmektedir. Burada test esnasında alınan verilerin takibi sağlanır. Her saniyede 1 veri olmak kaydıyla istenilen basınç ve gerçek basınç görüntülenebilir.

Genel Bilgiler :

- Hidrolik yağ seviyesi 180 lt nin altına düşürülmemelidir.
- Pnömatik sistem için gerekli basınç 6 bardır. 6 barın altında sistem çalıştırılmamalıdır.
- Sistem manuel moda çalıştığında dikkatli davranılmalıdır.
- Manuel modda kullanılırken sistemin davranışı takip edilmeli, motor ve pompalara aşırı yüklenilmesinin önüne geçilmelidir.
- Sistem çalışması esnasında etrafta yetkili personel haricinde kimse olmamalıdır.
- Sistemin havuzunda çalışılması gerektiğinde sistem 0 konumuna getirilmeli ve ana şalterden kapatılmalıdır.
- Hareketli kafanın hareketi esnasında gelen sesli uyarıya dikkat edilmelidir.
- Hareketli kafanın hareketi esnasında ikaz lambası kırmızı, test esnasında yeşil yanmaktadır.
- Manuel modda hareketli kafa yürütülürken kilitleme pistonlarına dikkat edilmelidir. Delik şaşması durumunda konstrüksiyon zarar görebilir.

Tipi	ALPC-1200 Hidrostatik Basınç Test Cihazı
Minimum Boru Çapı	300 mm
Maximum Boru Çapı	1200 mm
Minimum Boru Uzunluğu	1500 mm
Maksimum Boru Uzunluğu	12000 mm
Hidrolik Ünite	Yağ Tankı, motorlar, kaplinler, hortumlar ve muhtelif elemanlar
Pnömatik Ünite	Valf Grubu, Pnömatik Tesisat
Su Ünitesi	Doldurma pompası, basınçlandırma pompası, su tesisatı, kaplinler ve muhtelif elemanlar
Kontrol Sistemi	Endüstriyel PC ile Kontrol Sistemi
Toplam Boy	16000 mm
Yükseklik	2500 mm
Genişlik	3000 mm
Toplam Ağırlık	18200 kg
Elektrik Ünitesi	15kW,380 Volt

Çizelge 4.2 Cihazın teknik özellikleri

5 SU DARBELERİ

5.1 Su Darbesinin Tanımı

Boru sistemlerinin tasarımında, bazen değişken akım durumlarının da incelenmesi gerekmektedir. Sistemin herhangi bir noktasında bir kontrol elemanı ile, akım hızında ani bir değişiklik yapılması sonucu, akım zamanla değişen türden akıma dönüşür. Pompa-boru-vana sistemlerinde boru ucundaki bir vananın kapatılması veya açılması, pompaj sistemlerinde pompanın çalıştırılması veya durdurulması, hidroelektrik tesislerde yük ihtiyacı veya yük atımı sırasında türbin ayar vanasının ani kapatılması veya açılması sırasında akımda meydana gelen ivmelenme şiddetli basınç dalgalarının gelişmesine sebep olur. Bizim sistemimizde basıncın hassas olarak arttırılıp azaltılması için özellikle hızlı açılıp kapanabilen valfler kullanılmak zorundadır. Bu da su darbelerini tetiklememektedir. Basınç dalgasının yayılması esnasında akım hızı yavaşlar, sıvı sıkışmaya ve boru ise genişmeye maruz kalır. Basınç dalgasının hızı, sıvının sıkışabilirliğine, boru malzemesinin elastikiyetine ve borunun bağlantı şekline bağlıdır. Su darbesi olarak adlandırılan bu olay sonucu, oluşacak basıncın analizi sistemin güvenli ve ekonomik olarak projelendirilmesi bakımından önemlidir. Sistemin projelendirilmesi için, öncelikle sistemin genel yerleşimi ve parametreleri seçilir ve muhtemel işletme şartları sonucu oluşacak değişken akım durumları için analiz edilir. Eğer, analiz sonucu elde edilen maksimum ve minimum basınçlar kabul edilebilir sınırlar içinde değilse, sistemin yerleşimi veya parametreleri değiştirilir, ya da değişik önleyici elemanlar ilave edilerek sistem tekrar analiz edilir. Bu işlem sistem istenen duruma gelene kadar tekrarlanır.

Su darbesi olayını idare eden eşitlikler nonlinear kısmi diferansiyel denklemlerdir ve analitik çözümleri mümkün olmamaktadır. Ancak, bazı kabuller yapılarak sayısal yöntemler yardımı ile yaklaşık çözümleri yapılabilmektedir. Bu yöntemler arasında karakteristikler yöntemi, su darbesi analizinde en çok kullanılan yöntemdir. Karakteristikler yöntemi ile su darbesini ifade eden kısmi diferansiyel denklemler, birinci mertebe yaklaşımı ile sonlu farklar formunda tanımlanarak, karakteristik doğrular boyunca geçerli adi diferansiyel denklemlere dönüştürülür. Bu denklemlerin başlangıç değerleri ve sınır şartları yardımı ile sayısal çözümü yapılarak akımın hız ve basınç değerleri elde edilir.

Bu çalışmada, su darbesi olayını idare eden nonlinear kısmi diferansiyel denklemlere karakteristikler yöntemi uygulanmış ve sınır şartlarının içeren matematiksel bir model

oluşturulmuştur. Borunun pompa ucu için sınır şartı; sabit basınç ve debili bir pompa veya küresel bir vana iken, borunun son noktası için sınır şartı ise ucunun kapalı olup buradan akış olmamasıdır. Bu sınır şartları göz önüne alınarak bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Program, 300 mm den 1200 mm'ye kadar çapta olan ve boyları 12 m olan CTP malzemedeki yapılmış boruların analizinde de kullanılabilir. Geliştirilen bilgisayar programı yardımı sisteminde, basınç dalgasının boru boyunca yayılması, sınırlardan yansımaları ve borunun belirli bir noktasında basınç değişimi incelenmiştir.

5.2 Önceki Çalışmalar

Su darbesinin oluşumu, olayı idare eden denklemlerin elde edilmesi ve çözüm teknikleri konusunda geçmişte bir çok araştırmacı çalışmıştır.

Joukowski(1897), değişik çap ve uzunlukta borular üzerinde bir çok deneyler yapmış ve su darbesinin temel teorisini açıklamıştır. Boru malzemesini ve suyun elastisitesini göz önüne alarak, dalga hızı için bir ifade geliştirmiştir. Aynı zamanda enerjinin korunumu ve süreklilik prensibini kullanarak basınç artışı ve akım hızı arasında ilişki kurmuştur. Basınç dalgasının boru boyunca yayılması ve yansımalarını açıklamıştır ve hava kazanı, denge bacası ve vana etkisini araştırmıştır. Kapanma zamanı $t_k=2L/C$ olması durumunda basıncın maksimum olduğunu bildirmiştir (L boru boyu, C dalga yayılma hızı).

Allievi(1903), t_k kapanma zamanında vanadaki basınç için bir ifade vermiş ve vananın üniform olarak açılması veya kapanması sonucu oluşan basınç artışı ve azalmasını gösteren grafikler sunmuştur. Allievi aynı zamanda vananın ritmik hareketini çalışmış ve artan basıncın, statik basıncın iki katını geçemeyeceğini göstermiştir (Chaudhry,1987' den).

Wood ve Jones (1973), çalışmalarında, değişik vana türleri için, su darbesi basıncının hesabında kullanılabilir abaklar geliştirmişlerdir. Yaklaşık formüllerin bazılarının sağlam prensiplere dayanmadığını ve güvenilir sonuçlar vermediğini bildirmişlerdir. Sundukları abaklar yardımı ile herhangi bir kapanma şekli için, su darbesi basıncının hızlı ve güvenilir bir biçimde hesaplanabileceğini belirtmişlerdir.

Watters ve Ark.(1976), PVC ve güçlendirilmiş plastik borular üzerinde, borunun gömülü ve açıkta olması durumunda, dalga hızını belirlemek için deneyler yapmışlardır. Açıktaki boru için, dalga hızının akımın ilk hızından bağımsız olduğunu bildirmişlerdir. Elastisite

modülünde ve Poisson oranında, dalga hızım önemli derecede etkileyecek dinamik değişiklikler görülmediğini belirtmişlerdir. Gömülü şartlarda, basınç dalgasının başlangıcında biraz yüksek yayılma hızları olduğunu, fakat bu durumun kısa sürdüğünü gözlemlemişlerdir. Borunun gömülü olmasının, dalga hızında en çok %7' lik bir artış getirdiğini ifade etmişler ve bu artışı boru çeperindeki desteğe ve zemin sürtünmesinden oluşan kısıtlamaya dayandırmışlardır. Gömülü durumda güçlendirilmiş plastik boru için, düşük hızlarda teorik basınçlara kıyasla % 15-20 daha yüksek basınç artışları ölçmüşlerdir. Yüksek hızlarda ise teorik ve ölçülen değerlerin tamamen birbirine eşit olduğunu bildirmişler ve bu çelişkili durumun sebebi hakkında bir açıklama getirmemişlerdir. Sonuç olarak; gömülü şartlardaki hesaplamalarda dalga hızı için kısıtlanmış boru formüllerinin kullanılmasını önermişlerdir.

Wiggert ve Sundquist(1977), değişken dalga hızına sahip boru sistemlerinde su darbesi analizi için, sabit zaman aralıklı karakteristikler yönteminde, doğrusal interpolasyon için genelleştirilmiş bir formülasyon sunmuşlardır. Ayrıca, doğrusal interpolasyonun sayısal çözüm sonuçları üzerindeki etkisini göstermek için hata analizi yapmışlardır.

Nemet (1978), su darbesinin analizi ile bir sistemin güvenliğinin nasıl artırılabileceğini örnekler ile araştırmıştır. Sonuç olarak uygun işletme kuralları ile sistemin güvenliğinin artırılabilceğini bildirmiştir.

Wylie(1983), boru sistemlerindeki bilgisayar uygulamaları ile ilgili kavramları açıklamıştır. Çalışmada, karakteristikler yönteminin hesap yöntemi olarak kullanılması durumunda; sistem dotalarının saklanması, hesapların etkin bir şekilde yapılması konusunda öneriler sunulmuştur. Hidrolik sistemlerde, seri bağlantı ve sürtünme kaybı yaratan elemanların basınç dağılımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Eşitlikler ve grafikler başlangıçta akım olması ve olmaması durumları için sunulmuştur.

Wylie(1984), çalışmasında, su darbesini idare eden süreklilik eşitliğinin, eğimli borularda düzenli akım hali için yazılması durumunda, piyezometrik yüksekliğin değişimi için çelişkili bir ifadenin ortaya çıktığını bildirmiştir. Bu çelişkinin pratik olarak önemli olmadığı, fakat derin petrol kuyularındaki boru hattı gibi uzun düşey boru sistemlerinin analizinde tutarsız sonuçlar verebileceğini bildirmiş ve bu çelişkiyi ortadan kaldırmak için alternatif bir formül sunmuştur.

Shimada ve Okushima(1984), su darbesini idare eden denklemlerin analizinde, ikinci mertebe modelini incelemişlerdir. Etkili sayısal yöntemlerden serilerle çözüm ve Newton-Raphson yöntemlerini önermişlerdir. Söz konusu yöntemlerle analizin geçerliliği, sistem parametrelerinin büyük ölçüde değiştiğini sayısal hesaplamalarla incelemişlerdir. Önerilen yöntemlerin diğer yöntemlere göre daha az hesap gerektirdiği, iterasyon yapılmaksızın istenen doğrulukta sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir. Ayrıca ikinci mertebe modelinin birinci mertebe modeline göre daha doğru ve etkin olduğunu bildirmişlerdir.

Chaudhry ve Hussaini(1985), boru sistemlerinde su darbesi olayını idare eden hiperbolik kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için, Mac Cormack(1971), Lambda (Moretti, 1979) ve Gabutti(1983) yöntemi olmak üzere üç adet yaklaşık sayısal çözüm yöntemi tanıtmışlardır. Çalışmalarında, bu yöntemlerin detayı ve problemin sınır şartlarını irdelemişlerdir. Basit bir sürtünmesiz boru sistemi için, bu yöntemlerle hesaplanan sonuçların kesin çözümle karşılaştırmasını yapmışlardır. Sonuç olarak; aynı hesap hassasiyeti için, ikinci mertebe yönteminin, birinci mertebe yöntemine göre daha az hesap adımı ve zamanı gerektirdiğini bildirmişlerdir. Courant sayısının ($C_n=C\Delta t/\Delta x$) bire eşit olması durumunda, ikinci mertebe yönteminin kullanılması çok az avantaj sağlamakta ve bununla beraber, $C_n<1.0$ olması durumunda, ikinci mertebe yönteminde hesap adımının, birinci mertebe yöntemine göre azaldığını; dolayısıyla, büyük boru sistemleri için bilgisayar zamanı ve hafızasından tasarruf edildiğini bildirmişlerdir.

Safvvat ve Ark (1986), çalışmalarında; karakteristikler yönteminin su darbesi ve kavitasyon problemine birlikte uygulanabilmesi için, ilaveler yapmışlardır. Ayrıca bir bilgisayar programı geliştirmiş ve örnek bir sistemin analizine uygulayarak sonuçlarını sunmuşlardır.

Azoury ve Ark (1986), sürtünmeli koşullarda karakteristikler yöntemi ile, vana kapanmasının su darbesi üzerine etkisini, atmosfere açılan basit bir boru sistemi için incelemişlerdir. Vana kapanma kanununu, basit olarak zamanın üstel bir fonksiyonu olarak kabul etmişlerdir. Minimum su darbesi basıncını veren kapanma şeklinin belirlenmesi için bir grafik sunmuşlardır. Sürtünmesiz akımda, minimum darbe basıncının doğrusal kapanmada elde edildiğini, sürtünmeli akımda ise durumun farklı olduğunu ve optimum vana kapanma kanununun sunulan grafik yardımıyla belirlenebileceğini bildirmişlerdir.

Wylie(1988), akım kontrolunda ani değişiklikler yapılması sonucunda, basınç dalgası akım ilişkisine çeşitli örnekler sunmuş ve sistem parametrelerinin yansıma üzerindeki etkisi ve sistemdeki elemanların karşılıklı etkileşimini incelemiştir.

Jelev(1989), basınçlı borularda, su darbesi olayında akımın ve basınç salınımlarının sönümlenmesinin hesabı için bir formül sunmuştur. Bu formülde, enerji kayıpları için akımda ve boru çeperinde gelişen yapısal sürtünme kuvvetleri esas alınmış ve elde edilen formülün ardışık iki akımın ve basınç salınımlarının genliği arasında sabit bir ilişkiyi ifade ettiğini bildirmiştir. Akımın sönüm sabitinin değeri, havadaki çözülmüş hava miktarına, basınç değerine ve kavitasyonun oluşumuna bağlı olduğunu bildirmiştir. Ayrıca, önerilen formülle yapılan hesapların deneysel bulgular ile iyi bir uyum içinde olduğu bildirilmiştir.

Bergant ve Simpson(1991), çalışmalarında, su darbesinin sayısal çözümü için örnekler sunmuşlardır. Sınır şartı olarak, borunun memba ucunda vana ve boru hattında bir iç orifis bulunan modelde pozitif yönlü akım için, ikinci derece denklemlerin geleneksel çözüm yöntemi ile geliştirilmiş çözüm yöntemlerinin karşılaştırmasını yapmışlardır. Küçük orifis kayıp katsayıları için, geleneksel yöntemin kullanılması durumunda hatalı sonuçlar verdiği, geliştirilmiş yöntemin kullanılması durumunda ise daha gerçekçi sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir.

Sibetheros ve Ark.(1991), sürtünmesiz yatay bir boruda su darbesinin sayısal analizi için, karakteristikler yönteminin *spline* polinomlar ile interpolasyonunu incelemiştir. Sayısal hataların analizim, sistematik ve boyutsuz yolla incelemişler ve üç adet *spline* polinomunun performanslarını değerlendirerek, su darbesi analizi için diğer sayısal yöntemler ile karşılaştırmasını yapmışlardır. Doğrusal interpolasyonlu karakteristikler yöntemi veya ikinci mertebeden açık sonlu farklar yöntemi ile karşılaştırıldığında, *spline* polinomları ile interpolasyonunun daha doğru sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir.

Thanapandi(1992), değişken akımlara ait temel hiperbolik kısmi diferansiyel denklemlerin, karakteristikler yöntemi ile çözümü için, hızlı ve etkin yeni bir yöntem tanıtmıştır. Çalışmasında yeni yöntemin detaylarını, hem sürtünmeli ve hem de sürtünmesiz basit bir boru sistemine uygulamıştır. Yeni yöntemin daha az hesap adımı ve bilgisayar hafızası gerektirdiğini bildirmiştir. Yeni yöntemle birleşim noktalarındaki bilinmeyenlerin hesabı, K^+ karakteristiği boyunca yapılmakta ve birleşim noktalarında zaman bilinmektedir.

Ghidaoui ve Karney(1994), farklı karakteristiklere sahip boru sistemlerinin analizinde en çok bilinen interpolasyon tekniklerindeki interpolasyon hatalarını gidermek için Eşdeğer Hiperbolik Diferansiyel Eşitlik (EHDE) kavramını geliştirmişlerdir. Dalga hızı düzeltilmesi ve çeşitli interpolasyon teknikleri ile ilgili sayısal hataların sınıflaması ve analizi için teorik bir yaklaşım getirmeyi amaçlamışlardır. Mesafe doğrultusunda interpolasyon ve Holly ve Preissmann(1977) yöntemlerinin, dalga hızı düzeltilmiş *dalga-difüzyon* modeline eşdeğer olduğunu bildirmişlerdir.

Weis(1996), su darbesi olayının yanlış anlaşılması sonucunda, su darbesinden koruyucu gereksiz tesisler yapıldığı ve bu koruyucu tesislerin bazı sorunlara sebep olduğunu bildirmiştir. Örnek olarak, atık su pompa istasyonunda, su darbesinin önemli bir sorun olmadığını bildirmiştir. Ayrıca, çalışmasında su darbesi olayının oluştuğu yerleri tanıtmış ve örnekler sunmuştur.

Karney ve Ghidaoui(1997), farklı karakteristiklere sahip boru sistemlerinin sabit zaman aralıklı karakteristikler yöntemi ile analizinde, interpolasyon için yeni bir yaklaşım getirmişlerdir. Yeni yaklaşım, ikincil veya kesişen karakteristik doğru boyunca. interpolasyon noktası ile esas karakteristik doğru arasındaki en kısa mesafeyi kullanan minimum nokta interpolasyonu ve dalga hızı düzeltilmesine benzer fakat doğrudan dalga hızını değil yayılmanın yolunu değiştiren dalga yolu düzeltilmesi yöntemini içermektedir. Yeni algoritmanın performansını, eşdeğer Hiperbolik Diferansiyel Eşitlik (EHDE) yaklaşımını kullanarak teorik olarak ve sayısal örnek üzerinde incelemişlerdir. Sonuç olarak; önerilen yeni algoritmanın kullanılması durumunda da, interpolasyon hatalarının en aza indirilmesi için, zaman aralığının kısa tutulması gerektiğini bildirmişlerdir.

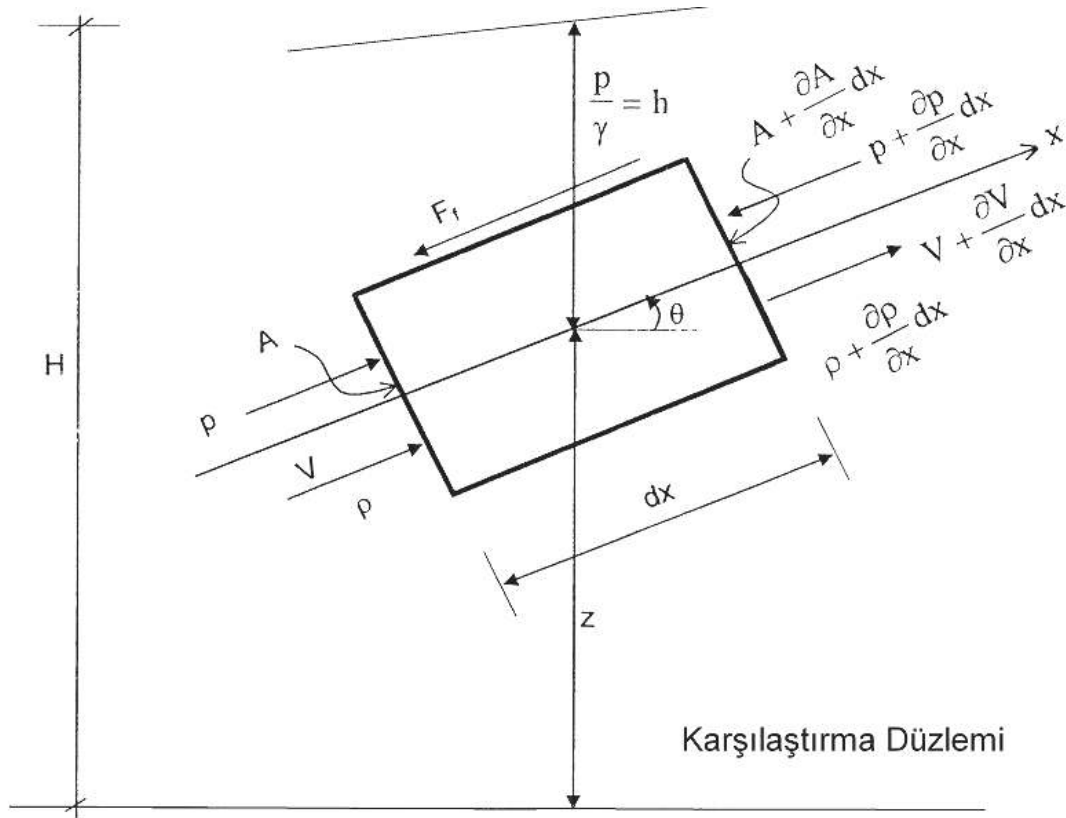
Ghidaoui ve Ark(1998), sabit zaman aralıklı karakteristikler yöntemi kullanılan boru sistemlerindeki su darbesi olayı için toplam enerji yaklaşımını getirmişlerdir. Bu yaklaşımla, bilinen interpolasyon tekniklerindeki sayısal hataların nasıl kontrol edilebileceği ve ortadan kaldırılabileceğinin belirlenmesini amaçlamışlardır. Geliştirilen analitik ifadelerden; zamana göre ve mesafeye göre interpolasyonun sistemin toplam enerjisini azalttığını, buna karşılık dalga hızı düzeltilmesi yaklaşımının toplam enerjiyi muhafaza ettiğini fakat kinetik enerji ile potansiyel enerji arasındaki oranı değiştirdiğinin görüldüğünü bildirmişlerdir. Analitik sonuçların değişik seri bağlı sistemler üzerinde yapılan sayısal uygulamalarla doğrulandığını bildirmişlerdir.

Dağlı (1985), su darbelerini eden diferansiyel denklemler üzerinde incelemeler yaparak çözüm için karakteristikler yöntemini kullanmıştır. Önceki araştırmalardan farklı olarak su darbesi olayı sırasında muhtemel sıvı sütunu ayrılması olaylarını incelemiştir. Sıvı sütunu ayrılması olayının basıncın anlık olarak sıvının buharlaşma basıncına düşmesiyle meydana gelebileceğini açıklamış bu noktaları sınır şartları olarak çözüme dahil etmiştir.

5.3 Su Darbelerini İdare Eden Diferansiyel Denklemlerin Elde Edilmesi

5.3.1 Süreklilik Denklemi

Ekseni yatayla bir θ açısı yapan basınçlı bir boru içinde meydana gelen kararsız üniform olmayan bir akış durumu ele alalım.



Şekil 5.1 Yatayla θ açısı yapan bir boru üzerinde akım şartlarının gösterilmesi

Şekil 5.1’de gösterildiği gibi borunun, bir birinden çok küçük δx uzaklıkta 2 en kesiti arasında bir kontrol hacmine süreklilik prensibini uygulayalım. En kesitlerinin daima boru eksenine dik ve birbirlerine paralel bir düzlem olarak kaldığı farz edilir. Her iki fazın bu kesitlere normal şekilde bir V ortalama hızı ile aktığını ve kesitler boyunca hız, basınç, yoğunluk,

boşluk oranı gibi bütün akışkan özelliklerinin üniform olduğu kabul edilir. Buna karşılık akışkan özellikleri δx boyunca sürekli değişmektedir. Akış sırasında boru radyal yönde deforme olabildiği gibi eksen boyunca da deforme olabileceğinden kesitler arasındaki δx uzaklığı bir değişken olup, $\delta x(t)$ sadece zamanın bir fonksiyonudur.

$$\left[\begin{array}{l} (1) \text{ Kesitinden Kontrol} \\ \text{Hacme Giren Kütle} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} (2) \text{ Kesitinden Kontrol} \\ \text{Hacmi Terkeden Kütle} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Kontrol Hacmi İçin} \\ \text{Biriken Kütle} \end{array} \right]$$

Borudan geçen sıvı gaz karışımlı akışkanın birim hacmi içindeki volumetrik gaz (hava) miktarı konsantrasyonunu s ile ifade edersek, karışımın birim hacmi içindeki sıvı ise $(1-s)$ olur. Böylece, sıvı gaz karışımlı akışkan ortamının verilen \forall toplam hacmi içindeki, \forall_g gaz ve \forall_s sıvı hacmi olmak üzere;

$$\forall_g = \forall \cdot s; \quad \forall_s = \forall \cdot (1-s)$$

olur.

Sıvı gaz karışımlı akışkanın gerek gaz, gerekse sıvı fazı 1-kesitinden V ortalama hızı ile kontrol-hacme girdiğinden, 1- kesitinden kontrol hacmine giren toplam akışkan hacmi;

$$\forall = A \cdot V$$

veya gaz ve sıvı hacmi cinsinden

$$\forall = \forall_g + \forall_s = s \cdot A \cdot V + (1-s) \cdot A \cdot V$$

olur.

Karışım 1- kesitinden geçerken, gaz fazının yoğunluğu ρ_g ve sıvı fazının yoğunluğu ρ_s ise; birim zamanda 1- kesitinden kontrol hacmine giren toplam akışkan kütlesi;

$$\rho_g \cdot s \cdot A \cdot V + \rho_s \cdot (1-s) \cdot A \cdot V \quad (5.1)$$

Aynı şekilde 2- kesitinden birim zamanda çıkan toplam akışkan kütlesi;

$$\left[\left(\rho_g + \frac{\partial \rho_g}{\partial x} \delta x \right) \left(s + \frac{\partial s}{\partial x} \delta x \right) \left(A + \frac{\partial A}{\partial x} \delta x \right) \left(V + \frac{\partial V}{\partial x} \delta x \right) \right] +$$

$$\left[\left(\rho_s + \frac{\partial \rho_s}{\partial x} \delta x \right) \left(1 - \left(s + \frac{\partial s}{\partial x} \delta x \right) \right) \left(A + \frac{\partial A}{\partial x} \delta x \right) \left(V + \frac{\partial V}{\partial x} \delta x \right) \right]$$

olur. Burada A, 1-kesitindeki en kesit alanını ifade eder. Bu ifadeyi açıp, δx in ikinci ve daha yüksek dereceden kuvvetlerini içeren terimlerin ihmal edilmesiyle,

$$s \cdot \rho_g \cdot A \cdot V + \rho_g \cdot A \cdot V \frac{\partial s}{\partial x} \delta x + s \cdot A \cdot V \frac{\partial \rho_g}{\partial x} \delta x + s \cdot \rho_g \cdot A \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \delta x +$$

$$s \cdot \rho_g \cdot V \frac{\partial A}{\partial x} \delta x + (1-s) \rho_s \cdot A \cdot V - \rho_s \cdot A \cdot V \frac{\partial s}{\partial x} \delta x +$$

$$(1-s) A \cdot V \frac{\partial \rho_s}{\partial x} \delta x + (1-s) \rho_s \cdot A \frac{\partial V}{\partial x} \delta x + (1-s) \rho_s \cdot V \frac{\partial A}{\partial x} \delta x$$

şeklinde sadeleşir. Böylece 2- kesitinden kontrol hacmini terk eden kütle;

$$s \cdot \rho_g \cdot A \cdot V + (1-s) \rho_s \cdot A \cdot V + (\rho_g - \rho_s) A \cdot V \frac{\partial s}{\partial x} \delta x + s \cdot A \cdot V \frac{\partial \rho_g}{\partial x} \delta x +$$

$$(1-s) A \cdot V \frac{\partial \rho_s}{\partial x} \delta x + [s \cdot \rho_g + (1-s) \rho_s] \cdot V \frac{\partial A}{\partial x} \delta x + \quad (5.2)$$

$$[s \cdot \rho_g + (1-s) \rho_s] \cdot A \frac{\partial V}{\partial x} \delta x$$

şeklinde yazılır. Bu veriler ışığında giren kütle (5.1)'den, çıkan kütle (5.2) çıkarılarak;

$$-(\rho_g - \rho_s) A \cdot V \frac{\partial s}{\partial x} \delta x - s \cdot A \cdot V \frac{\partial \rho_g}{\partial x} \delta x -$$

$$(1-s) A \cdot V \frac{\partial \rho_s}{\partial x} \delta x - [s \cdot \rho_g + (1-s) \rho_s] \cdot V \frac{\partial A}{\partial x} \delta x -$$

$$[s \cdot \rho_g + (1-s) \rho_s] \cdot A \frac{\partial V}{\partial x} \delta x \quad (5.3)$$

olur.

Göz önüne alınan kontrol hacmi $A\delta x$ olarak yazılırsa kontrol hacmi içinde zamanla değişime uğrayan karışımın kütlesi;

$$\rho_g \cdot s \cdot A \cdot \delta x + \rho_s \cdot (1-s) \cdot A \cdot \delta x$$

ile ifade edilebilir. Böylece, kontrol hacmi içinde kütle birim zamanda değişimi;

$$\frac{\partial [\rho_g \cdot s \cdot A \cdot \delta x + \rho_s \cdot (1-s) \cdot A \cdot \delta x]}{\partial t}$$

şeklinde yazılır. Bu ifadeyi aşağıdaki kısmi türev eşitliğini göz önünde tutarak açarsak, kontrol hacmi içinde birim zamanda meydana gelen kütle yığılımı için;

$$\rho_s \cdot A \cdot \delta x \frac{\partial(1-s)}{\partial t} = -\rho_s \cdot A \cdot \delta x \frac{\partial s}{\partial t} \text{ Kısmi türev eşitliği}$$

$$[s \cdot \rho_g + (1-s)\rho_s] A \frac{\partial(\delta x)}{\partial t} + (\rho_g - \rho_s) A \cdot \delta x \frac{\partial s}{\partial t} + \quad (5.4)$$

$$[s \cdot \rho_g + (1-s)\rho_s] \delta x \frac{\partial A}{\partial t} + s \cdot A \cdot \delta x \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + (1-s) A \cdot \delta x \frac{\partial \rho_s}{\partial t}$$

ifadesi bulunur. Süreklilik prensibine göre 5.3 ve 5.4 denklemleri eşitlenip bütün terimler $A\delta x$ ile bölüldükten sonra düzenlenirse;

$$\begin{aligned} & (\rho_g - \rho_s) \left(V \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial s}{\partial t} \right) + s \left(V \frac{\partial \rho_g}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g}{\partial t} \right) + (1-s) \left(V \frac{\partial \rho_s}{\partial x} + \frac{\partial \rho_s}{\partial t} \right) + \\ & [s \cdot \rho_g + (1-s)\rho_s] \frac{1}{A} \left(V \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} \right) + [s \cdot \rho_g + (1-s)\rho_s] \frac{1}{\delta x} \frac{\partial \delta x}{\partial t} + \\ & [s \cdot \rho_g + (1-s)\rho_s] \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (5.5)$$

eşitliği yazılır.

Genel olarak, $\rho = \rho(x,t)$, $A = A(x,t)$ ve $s = s(x,t)$ olup, x (konum) ve t (zaman) bağımsız değişkenlerinin fonksiyonudurlar. Bu değişkenler aşağıdaki gibi kısmi türevleri ile yazılabilir.

$$\frac{d\rho}{dt} = V \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad \frac{dA}{dt} = V \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t}, \quad \frac{ds}{dt} = V \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial s}{\partial t} \quad (5.6)$$

eşitlikleri yazılır.

Ayrıca $\delta x = \delta x(t)$ sadece zamanın bir fonksiyonu olduğundan ;

$$\frac{\partial \delta x}{\partial t} = \frac{d\delta x}{dt} \quad (5.7)$$

eşitliği yazılır.

5.6 ve 5.7 eşitliklerinin 5.5 eşitliğinde yerine yazılmasıyla;

$$\left[(\rho_g - \rho_s) \left(\frac{ds}{dt} \right) + s \left(\frac{d\rho_g}{dt} \right) + (1-s) \left(\frac{d\rho_s}{dt} \right) + [s \cdot \rho_g + (1-s) \rho_s] \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + [s \cdot \rho_g + (1-s) \rho_s] \frac{1}{\delta x} \frac{d\delta x}{dt} + [s \cdot \rho_g + (1-s) \rho_s] \frac{dV}{dx} \right] = 0 \quad (5.8)$$

5.8 eşitliğinde 1. terim karışım içindeki gaz hacminin toplam değişimini dikkate alır. 2. terim, gaz fazının ve 3. terim sıvı fazının sıkışabilmesini dikkate alır. 4. terim boru kesitinin radyal yöndeki değişimine ve 5. terim borunun ekseni boyunca oluşabilecek değişimi ifade eder. 6. terim ise herhangi bir anda kontrol hacmine giren ve çıkan akım arasındaki değişimi dikkate alır.

Borunun ve akışkanın elastik özellikleri göz önüne alınarak, akışkanın ρ yoğunluğu ve borunun A kesit alanındaki değişimler, p basıncının değişimi cinsinden ifade edilebilirler. Basıncın Δp kadar artışı sonucu akışkan sıkışır ve δx uzunluğundaki boru parçası içine giren bir miktar ilave akışkan için yer açılır. Ayrıca borunun kendisi hem radyal yönde hem de aksenel yönde genişler ve boru parçasının kapasitesini artırır. Basıncıdaki toplam değişim;

$$dp = \frac{\partial p}{\partial x} \delta x + \frac{\partial p}{\partial t} dt$$

olup, hem δx boyunca basınç değişimini hem de dt boyunca basınç değişimini içermektedir.

Herhangi bir anda, sıvıda asılı kabarcıklar şeklide tutulmuş serbest gaz ve hava hacmi için gaz difüzyonu ve yüzey gerilimi ihmal ederek, ideal gaz kanunu yazalım. Buna göre borunun herhangi bir kesitindeki \forall_g serbest gaz hacmi, aşağıdaki şekilde bir basınç hacim bağıntısı izleyecektir.

$$p \cdot \forall_g^n = C \quad \text{veya} \quad \frac{p}{\rho_g^n} = C = \text{sabit}$$

Burada p , karışımın verilen bir sıcaklıkta, borunun herhangi bir kesitindeki toplam mutlak basıncı ifade eder. Yukarıdaki ifadenin toplam diferansiyelini alırsak;

$$K_g = n \cdot p = -\frac{dp}{d\forall_g/\forall_g} = \frac{dp}{d\rho_g/\rho_g} \quad (5.9)$$

Burada \forall_g , toplam karışım toplam karışım hacmi içindeki gaz fazının hacmini ve K_g , karışım içindeki gazın hacimsel elastiklik modülünü temsil eder. n sayısı yavaş bir değişim için (izotermik bir değişim) 1 değerine ve hızlı bir değişim için (adyabatik bir değişim) 1,4 değerine eşit olacaktır. Bu çalışmada n için 1,2 ortalama değeri alınmıştır. Aynı şekilde sıvının hacimsel elastiklik modülü;

$$K_s = -\frac{dp}{d\forall_s/\forall_s} = \frac{dp}{d\rho_s/\rho_s} \quad (5.10)$$

5.9 ve 5.10 eşitlikleri zamana göre toplam türevleri cinsinden ifade edilirse;

$$\frac{d\rho_s}{dt} = \frac{\rho_s}{K_s} \frac{dp}{dt} \quad \text{ve} \quad \frac{d\rho_g}{dt} = \frac{\rho_g}{K_g} \frac{dp}{dt} \quad (5.11)$$

elde edilir.

Boşluk oranının zamana göre toplam türevi, karışımdaki bileşenlerin hacimsel modülleri cinsinden ifade edilebilir. Sıvı-gaz karışimli akışkanlarda hacimleri;

$$\nabla_g = s \cdot \nabla \text{ ve } \nabla_s = (1-s)\nabla \quad (5.12)$$

şeklinde ifade etmiştik. Akışkan ortamında dp kadar bir basınç değişimi;

$$d\nabla = d\nabla_g + d\nabla_s \quad (5.13)$$

toplam hacim değişimine sebep olur. Gaz hacmini belirten ifadenin türevi alınarak;

$$\nabla_g = s \cdot \nabla$$

$$d\nabla_g = s \cdot d\nabla + \nabla \cdot ds$$

Buradan ds çekilirse;

$$ds = \frac{1}{\nabla} (d\nabla_g - s d\nabla)$$

Bu ifadeyi ∇_g / ∇_g ile çarpar ve yukarıdaki eşitlikleri kullanırsak;

$$ds = \frac{\nabla_g}{\nabla} \left[d\nabla_g - s(d\nabla_g - d\nabla_s) \right] \frac{1}{\nabla_g} = \frac{s\nabla}{\nabla} \left(\frac{d\nabla_g}{\nabla_g} - s \frac{d\nabla_g}{\nabla_g} - s \frac{d\nabla_s}{\nabla_g} \right)$$

şeklinde yazılır. Parantez içindeki son terimin pay ve paydasını $d\nabla_g$ ile çarpar sonra

$d\nabla_g / \nabla_g$ parantezine alırsak,

$$ds = s(1-s-s \frac{d\nabla_s}{d\nabla_g}) \frac{d\nabla_g}{\nabla_g}$$

yazılır. Yukarıdaki eşitliklerden,

$$\frac{d\nabla_g}{\nabla_g} = -\frac{dp}{K_g} \text{ ve } \frac{d\nabla_s}{d\nabla_g} = \frac{\nabla_s}{\nabla_g} \frac{K_g}{K_s} = \frac{1-s}{s} \frac{K_g}{K_s}$$

olduğunu göz önüne aldığımızda;

$$ds = \left[\frac{(1-s) \cdot s \cdot K_g - (1-s) \cdot s \cdot K_s}{K_g \cdot K_s} \right] dp$$

elde edilir. Böylece boşluk oranının zamana göre toplam türevi;

$$\frac{ds}{dt} = \left[\frac{(1-s) \cdot s \cdot K_g - (1-s) \cdot s \cdot K_s}{K_g \cdot K_s} \right] \frac{dp}{dt} \quad (5.14)$$

5.8 eşitliğindeki ilk üç terimin toplamı 5.11 ve 5.14 eşitliklerindeki eşdeğerleri yerine konarak;

$$\begin{aligned} T &= \left[(\rho_g - \rho_s) \frac{ds}{dt} \right] + \left[s \left(\frac{d\rho_g}{dt} \right) + (1-s) \left(\frac{d\rho_s}{dt} \right) \right] \\ &= \left[(\rho_g - \rho_s) \left(\frac{(1-s) \cdot s \cdot K_g - (1-s) \cdot s \cdot K_s}{K_g \cdot K_s} \right) + \left(\frac{s \cdot \rho_g \cdot K_s + (1-s) \cdot \rho_s \cdot K_s}{K_g \cdot K_s} \right) \right] \frac{dp}{dt} \end{aligned}$$

yazılır. Eşitliğin sağ tarafında büyük parantez içindeki ifadeyi açarsak;

$$T = \left[\frac{(1-s) \cdot s \cdot \rho_g \cdot K_g - (1-s) \cdot s \cdot \rho_g \cdot K_s - (1-s) \cdot s \cdot \rho_s \cdot K_g - (1-s) \cdot s \cdot \rho_s \cdot K_s}{K_g \cdot K_s} + \frac{s \cdot \rho_g \cdot K_s + (1-s) \cdot \rho_s \cdot K_g}{K_g \cdot K_s} \right] \frac{dp}{dt}$$

Parantez içini birinci ve ikinci terimleri açarak tekrar yazdıktan sonra düzenlemeleri yaparak;

$$T = \left[\frac{s \cdot \rho_g \cdot K_g + s \cdot s \cdot \rho_g \cdot K_s - s \cdot s \cdot \rho_g \cdot K_g + (1-s) \cdot \rho_s \cdot K_g}{K_g \cdot K_s} + \frac{(1-s) \cdot s \cdot \rho_s \cdot K_s - (1-s) \cdot s \cdot \rho_s \cdot K_g}{K_g \cdot K_s} \right] \frac{dp}{dt}$$

Parantez içindeki ifadeyi çarpanlarına ayırarak yazalım.

$$T = \left[\frac{\{s \cdot \rho_g + (1-s)\rho_s\} \{K_g + sK_s - sK_g\}}{K_g \cdot K_s} \right] \frac{dp}{dt}$$

K_g parantezine alınarak.

$$T = \left[\frac{\{s \cdot \rho_g + (1-s)\rho_s\} \left\{1 + s\left(\frac{K_s}{K_g} - 1\right)\right\}}{K_s} \right] \frac{dp}{dt}$$

Bu ifade ilk başta T diye tanımlanan ifadeye eşittir.

$$\left[\left[(\rho_g - \rho_s) \frac{ds}{dt} \right] + \left[s \left(\frac{d\rho_g}{dt} \right) + (1-s) \left(\frac{d\rho_s}{dt} \right) \right] \right] = \left[\frac{\{s \cdot \rho_g + (1-s)\rho_s\} \left\{1 + s\left(\frac{K_s}{K_g} - 1\right)\right\}}{K_s} \right] \frac{dp}{dt} \quad (5.15)$$

Eşitliği elde edilir. Kontrol hacmindeki karışımın kütlesi m;

$$m = \rho \cdot \nabla = \rho_g \cdot \nabla_g + \rho_s \cdot \nabla_s$$

şeklinde yazılabilir. Buradan karışımın yoğunluğu ρ çekilerek;

$$\rho = \frac{m}{\nabla} = \rho_g \frac{\nabla_g}{\nabla} + \rho_s \frac{\nabla_s}{\nabla} = s \cdot \rho_g + (1-s) \cdot \rho_s$$

Böylece 3.15 eşitliğinden;

$$K = \frac{K_s}{1 + s\left(\frac{K_s}{K_g} - 1\right)}$$

Bu ifade karışımın elastiklik modülünü ifade eder. Böylece karışımın elastiklik modülünün, gaz fazının elastiklik modülüne, sıvı fazının elastiklik modülüne ve boşluk oranına bağlı olduğu görülür.

Eğer boru aksenal doğrultuda deformasyona maruz kalacak şekilde mesnetlenirse, o zaman $\delta x = \delta x(t)$ sadece zamanın bir fonksiyonudur. Bu taktirde $\frac{d(\delta x)}{dt}$, birim zamanda δx boyunda meydana gelen deformasyonu ifade edeceğinden, birim zamanda meydana gelen “boyuna birim deformasyon”;

$$\frac{d(\delta x)/dt}{\delta x} = \frac{d(\delta x)/\delta x}{dt} = \frac{d\varepsilon_x}{dt} \quad (5.16)$$

Bu ifadede ε_x , x doğrultusundaki birim deformasyonu gösterir.

Borunun çevresel genişmesi ile en kesit alanın değişir. Alanın bu değişimine dA ve çaptaki değişime de dD diyelim. Değişikliklerin dt zaman süresinde meydana geldiğini kabul edelim. Buna göre alandaki toplam değişim;

$$dA = \pi D \frac{dD}{2}$$

Genleşmeden önceki alan;

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Bunun zamana göre türevi;

$$\frac{dA}{dt} = \frac{2\pi D}{4} \frac{dD}{dt} \quad (5.17)$$

Birim zamanda boru kesit alanındaki değişimi verir. Burada dD/dt , çapta birim zamanda radyal doğrultudaki değişimi ifade eder. Yukarıdaki eşitliğin sağ tarafını D/D ile çarpıp düzenlersek;

$$\frac{dA}{dt} = \frac{2\pi D}{4} \frac{dD}{dt} \frac{D}{D} = \frac{\pi D^2}{4} \frac{2}{D} \frac{dD}{dt} = A \frac{2}{D} \frac{dD}{dt}$$

veya

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = 2 \frac{dD/dt}{D} \quad (5.18)$$

elde edilir.

Borunun radyal doğrultudaki genleşmesinden dolayı, çevresindeki uzamadan ortaya çıkan ‘‘evresel birim deformasyonu’’ ϵ_c ile ifade edelim. Buna göre çevresel birim deformasyonun birim zamandaki değişimi;

$$\frac{d\epsilon_c}{dt} = \frac{\pi(D + \frac{dD}{dt}) - \pi D}{\pi D} = \frac{1}{D} \frac{dD}{dt} = \frac{dD/D}{dt}$$

şeklinde yazılabilir. O halde çevresel birim deformasyonda birim zamandaki değişim cinsinden, çapta birim zamanda meydana gelen değişim;

$$\frac{dD}{dt} = D \frac{d\epsilon_c}{dt} \quad (5.19)$$

Bu ifade bir önceki denklemde yerine konursa;

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = 2 \frac{d\epsilon_c}{dt} \quad (5.20)$$

elde edilir. Böylece 3.15, 3.16, 3.20 eşitlikleri 3.8 eşitliğinde yerine konur ve her terim $(s\rho_g + (1-s)\rho_s)$ ile bölünürse ;

$$\frac{1}{K_s} \left[1 + s \left(\frac{K_s}{K_g} - 1 \right) \right] \frac{dp}{dt} + \left(2 \frac{d\varepsilon_c}{dt} + \frac{d\varepsilon_x}{dt} \right) + \frac{dV}{dx} = 0 \quad (5.21)$$

eşitliği elde edilir.

Boru çeperindeki ε_x aksenal ve ε_c çevresel birim deformasyon, borunun fiziksel karakteristiklerine ve aynı zamanda borunun mesnetlenme tarzına bağlıdır. Borunun fiziksel karakteristikleri ile mesnetlenme durumunu dikkate alarak $d\varepsilon_c/dt$ ve $d\varepsilon_x/dt$ terimlerini, dp basınç değişiminin bir fonksiyonu olarak veren genel bir ifade yazmaya çalışalım. Gerilme ve birim deformasyon birbirleriyle genel olarak;

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} \quad \text{ve} \quad \varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$$

ifadeleri ile bağıntılıdır. Burada σ_c ve σ_x sırasıyla, boru çevresine teğet ve boru eksenine yönündeki gerilmelerdir. E, boru malzemesinin elastiklik modülüdür. Ayrıca herhangi bir doğrultudaki gerilmeler, Poission oranına göre diğer iki normal doğrultuda birim değişimler oluştururlar. Poission oranı;

$\mu =$ - Gerilmeye dik doğrultuda, bu gerilmeye doğan birim deformasyon / Gerilme doğrultusundaki, bu gerilmeye doğan birim deformasyon

Böylece, aksenal, çevresel ve radyal boru birim deformasyonları, gerilmeler cinsinden ifade etmek için aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_r + \sigma_c)] \quad (5.22)$$

$$\varepsilon_c = \frac{1}{E} [\sigma_c - \mu(\sigma_r + \sigma_x)] \quad (5.23)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_c + \sigma_x)] \quad (5.24)$$

Bu ifadelerde σ gerilmeyi ve x, c, r asal doğruları ifade eder. Bu bağıntılardan aksenal be boru çevresine teğet doğrultudaki birim deformasyonlarda birim zamanda meydana gelen değişim yukarıdaki ilk iki eşitliğin türevleri alınarak;

$$\frac{d\varepsilon_x}{dt} = \frac{1}{E} \left[\frac{d\sigma_x}{dt} - \mu \left(\frac{d\sigma_r}{dt} + \frac{d\sigma_c}{dt} \right) \right] \quad (5.25)$$

$$\frac{d\varepsilon_c}{dt} = \frac{1}{E} \left[\frac{d\sigma_c}{dt} - \mu \left(\frac{d\sigma_r}{dt} + \frac{d\sigma_x}{dt} \right) \right] \quad (5.26)$$

Böylece 3.21 eşitliğinin ikinci ifadesindeki birim deformasyonların birim zamandaki toplamları;

$$2 \frac{d\varepsilon_c}{dt} + \frac{d\varepsilon_x}{dt} = \frac{2}{E} \left[\frac{d\sigma_c}{dt} - \mu \left(\frac{d\sigma_r}{dt} + \frac{d\sigma_x}{dt} \right) \right] + \frac{1}{E} \left[\frac{d\sigma_x}{dt} - \mu \left(\frac{d\sigma_r}{dt} + \frac{d\sigma_c}{dt} \right) \right] \quad (5.27)$$

Bir p üniform basıncının etkisi altında dengede bulunan bir borunun çeperinde, yukarıda değinildiği gibi üç doğrultuda normal gerilmeler oluşur. Bu p basıncı dolayısıyla boru çeperinde aksenal ve boru çevresine teğetsel doğrultulardaki gerilmeler;

$$\sigma_x = \frac{p \cdot D}{4 \cdot e} \quad (5.28)$$

$$\sigma_c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot e} \quad (5.29)$$

formülleri ile verilir. Burada D boru çapını ve e çeper kalınlığını ifade eder. Diğer taraftan borunun çeperi radyal doğrultuda dışa doğru içten p ve dıştan da içe doğru genellikle sabit bir q basıncının , örneğin atmosfer basıncı gibi, etkisi altındadır. Net basınç p-q olur. Buna göre radyal yöndeki gerilme için,

$$\sigma_r = -(p - q) = -q + p \quad (5.30)$$

yazılabilir. D/e oranının yaklaşık sabit kaldığını farz ederek yukarıdaki üç eşitliğin zamana göre türevlerini alalım.

$$\frac{d\sigma_x}{dt} = \frac{1}{4} \frac{D}{e} \frac{dp}{dt} \quad (5.31)$$

$$\frac{d\sigma_c}{dt} = \frac{1}{2} \frac{D}{e} \frac{dp}{dt} \quad (5.32)$$

$$\frac{d\sigma_r}{dt} = -\frac{dp}{dt} \quad (5.33)$$

bulunur. Bu eşitlikler, p basıncının dt zaman süresi içinde dp kadar değişimi dolayısıyla, her bir gerilmeye birim zamanda meydana gelen değişim miktarlarını ifade eder.

Şimdi, borunun uygulamada en çok kullanılan üç ayrı tipteki mesnetleme hali için 5.27 eşitliği aşağıdaki şekillerde ifade edilebilir.

1. Hal: Boru sadece pompa ucundan tespit edilmiştir. Bu durumda boru duvarı radyal yönde gerildikçe, sabit uca göre aksel yönde de serbestçe deforme olabilir. Yani aksel ve radyal yönde hem gerilmeler hem de deformasyonlar söz konusudur.

Bu durumda aksel, teğetsel ve radyal gerilmelerde birim zamandaki değişimler 5.31, 5.32 ve 5.33 eşitlikleri ile verildiğinden 5.27 eşitliği;

$$2 \frac{d\varepsilon_c}{dt} + \frac{d\varepsilon_x}{dt} = \frac{2}{E} \left[\frac{D}{2e} \frac{dp}{dt} - \mu \left\{ \left(-\frac{dp}{dt} \right) - \frac{1}{4} \frac{D}{e} \frac{dp}{dt} \right\} \right] +$$

$$\frac{1}{E} \left[\frac{1}{4} \frac{D}{e} \frac{dp}{dt} - \mu \left\{ \left(-\frac{dp}{dt} \right) - \frac{1}{2} \frac{D}{e} \frac{dp}{dt} \right\} \right]$$

veya

$$2 \frac{d\varepsilon_c}{dt} + \frac{d\varepsilon_x}{dt} = \frac{1}{E} \frac{D}{e} \left(\frac{5}{4} + 3 \frac{e}{D} \mu - \mu \right) \frac{dp}{dt} = \frac{1}{E} \frac{D}{e} \psi \frac{dp}{dt} \quad (5.34)$$

$$\psi = \frac{5}{4} + 3 \frac{e}{D} \mu - \mu$$

elde edilir.

2. Hal: Boru hattı aksenal hareketlere karşı boru boyunca tespit edilerek aksenal yönde deformasyon önlenmiştir. Böylece $\varepsilon_x=0$ olduğundan, birim zamanda aksenal yöndeki birim deformasyonda meydana gelen değişme;

$$\frac{d\varepsilon_x}{dt} = 0$$

olur. Bu durumda aksenal yönde birim deformasyona müsaade edilmediğinden, aksenal gerilmede birim zamanda meydana gelen değişme 5.25 eşitliğinden;

$$\frac{d\varepsilon_x}{dt} = \frac{1}{E} \left[\frac{d\sigma_x}{dt} - \mu \left(\frac{d\sigma_r}{dt} + \frac{d\sigma_c}{dt} \right) \right] = 0$$

$$\frac{d\sigma_x}{dt} = \mu \left(\frac{d\sigma_r}{dt} + \frac{d\sigma_c}{dt} \right) \quad (5.35)$$

yazılır. $\frac{d\sigma_c}{dt}$, $\frac{d\sigma_r}{dt}$ yerine 5.32 ve 5.33 eşitliklerindeki eş değerleri konursa;

$$\frac{d\sigma_x}{dt} = \mu \left(\frac{D-2e}{2e} \right) \frac{dp}{dt} \quad (5.36)$$

olarak bulunur. Şimdi 3.32, 3.33 ve 3.36 eşitlikleri 3.27 eşitliğinde yerine konursa;

$$2 \frac{d\varepsilon_c}{dt} + \frac{d\varepsilon_x}{dt} = \frac{2}{E} \left[\frac{1}{2} \frac{D}{e} \frac{dp}{dt} - \mu \left\{ \left(-\frac{dp}{dt} \right) + \mu \left(\frac{D-2e}{2e} \right) \frac{dp}{dt} \right\} \right]$$

Sadeleştirmeler yapıldığında ;

$$2 \frac{d\varepsilon_c}{dt} + \frac{d\varepsilon_x}{dt} = \frac{1}{E} \frac{D}{e} \psi \frac{dp}{dt} \quad (5.37)$$

$$\psi = 1 + 2(\mu + \mu^2) \frac{e}{D} - \mu^2$$

elde edilir.

3. Hal: Boru hattı boyunca yer yer genişleme derzleri kullanılarak, aksenal yönde serbestçe genişlemeye müsaade edilmesine rağmen boru uzunluğu sabit tutulmuştur. Yani hem boyuna deformasyon, hem de boyuna gerilme sıfırdır. Böylece birim zamanda aksenal yöndeki gerilme ve birim deformasyonda meydana gelen değişme;

$$\frac{d\sigma_x}{dt} = \frac{d\varepsilon_x}{dt} = 0$$

Bu durumda 5.27 eşitliği;

$$2 \frac{d\varepsilon_c}{dt} + \frac{d\varepsilon_x}{dt} = \frac{2}{E} \left[\frac{d\sigma_c}{dt} - \mu \left(\frac{d\sigma_r}{dt} + 0 \right) \right] + 0$$

veya

$$2 \frac{d\varepsilon_c}{dt} + \frac{d\varepsilon_x}{dt} = \frac{2}{E} \left[\frac{1}{2} \frac{D}{e} \frac{dp}{dt} - \mu \left(\left(-\frac{dp}{dt} \right) + 0 \right) \right] + 0$$

sadeleştirme işlemi yapılarak;

$$2 \frac{d\varepsilon_c}{dt} + \frac{d\varepsilon_x}{dt} = \frac{1}{E} \frac{D}{e} \psi \frac{dp}{dt} \quad (5.38)$$

$$\psi = 1 + 2\mu \frac{e}{D}$$

elde edilir. Böylece üç tip mesnetleme tarzına göre ψ parametresi aşağıdaki gibi özetlenebilir;

$$\psi_1 = \frac{5}{4} + 3 \frac{e}{D} \mu - \mu \quad (5.39)$$

$$\psi_2 = 1 + 2(\mu + \mu^2) \frac{e}{D} - \mu^2 \quad (5.40)$$

$$\psi_3 = 1 + 2\mu \frac{e}{D} \quad (5.41)$$

İnce çeperli borularda yani $e/D \rightarrow 0$ a giderken bu üç parametre aşağıdaki gibi indirgenir.

$$\psi_1 = \frac{5}{4} - \mu \quad (5.42)$$

$$\psi_2 = 1 - \mu^2 \quad (5.43)$$

$$\psi_3 = 1 \quad (5.44)$$

Şu halde 5.27 eşitliği genel olarak ;

$$2 \frac{d\varepsilon_c}{dt} + \frac{d\varepsilon_x}{dt} = \left(\frac{1}{E} \frac{D}{e} \psi \right) \frac{dp}{dt} \quad (5.45)$$

şeklinde yazılabilir. Burada ψ borunun mesnetlenme durumuna bağlı ve Poission oranının bir fonksiyonu olan boyutsuz bir parametreyi ifade eder. Bu ifade 5.21 eşitliğinde yerine konursa;

$$\left[\frac{1}{K_s} \left\{ 1 + s \left(\frac{K_s}{K_g} - 1 \right) \right\} + \frac{1}{E} \frac{D}{e} \psi \right] \frac{dp}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (5.46)$$

veya

$$\frac{1}{K} = \frac{1 + s(K_s / K_g - 1)}{K_s}$$

dersek;

$$\left(\frac{1}{K} - \frac{1}{E} \frac{D}{e} \psi \right) \frac{dp}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (5.47)$$

eşitliği elde edilir.

Şekil 5.1'den de görüldüğü gibi y, borunun herhangi bir noktasında herhangi bir anda boru eksenini ile hidrolik eğim çizgisi arasındaki düşey uzaklık olup, borudaki basınç yükünü ifade eder. Genel olarak sıvının buhar basıncından daha yüksek bir basınç altındaki tabii sıvılarda $s \ll 1$ olduğundan ve havanın yoğunluğu sıvınıninkinin yanında ihmal edilebilir olduğundan,

$$p \approx g \cdot \rho_s \cdot H$$

yazılabilir. Buradan;

$$\frac{dp}{dt} = g \cdot \rho_s \left(V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} \right)$$

Bu ifade yukarıdaki eşitlikte yerine konursa;

$$g \left[\frac{\rho_s}{K} \left(1 + \frac{K}{E} \frac{D}{e} \psi \right) \right] \left(V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} \right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

veya

$$g \left[\frac{1 + \frac{K D}{E e} \psi}{\frac{K}{\rho_s}} \right] \left(V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} \right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

elde edilir.

$$c^2 = \frac{K / \rho_s}{1 + \frac{K D}{E e} \psi}$$

tanımlamasını yaparsak;

$$V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

(5.48)

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik sıvı-gaz karışımının süreklilik denklemi olup, matematiksel olarak serbest gaz istiva eden bir sıvının kararsız akımına ait maddenin korunumunu ifade eder. Bu eşitlikte c terimi, sıvı içerisinde serbest gaz bulunması halinde bir basın dalgasının basınca bağlı olarak yayılma hızını ifade eder.

5.3.2 Hareket Denklemi

Şekil 5.1'de görülen δx sonsuz küçük akım elemanına süreklilik ve dinamik denklemler uygulanırsa;

Basınç kuvveti;

$$pA - \left[pA + \delta x \cdot \left(A \frac{\partial p}{\partial x} + p \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial x} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \delta x \right) \right]$$

Burada ikinci mertebeden diferansiyel terimler ihmal edilerek ve çarpımın türevi kuralı kullanılarak

$$pA - \left(pA + \delta x \cdot \frac{\partial pA}{\partial x} \right) \quad (5.49)$$

elde edilir.

Kontrol hacmi içindeki akışkanın kütlesi;

$$\rho \delta x \left(\frac{A + A + \frac{\partial A}{\partial x} \cdot \delta x}{2} \right) \quad (5.50)$$

Burada parantez içindeki terim ortalama alını ifade etmektedir.

Kontrol hacmine etkiyen ağırlık kuvvetinin boru ekseninde olan bileşeni;

$$\rho \delta x \left(\frac{A + A + \frac{\partial A}{\partial x} \cdot \delta x}{2} \right) \cdot g \cdot \sin \theta \quad (5.51)$$

θ = Boru ekseninin yatayla yaptığı açı

Borudaki sürtünme kuvveti;

$$- \tau \cdot P \cdot \delta x \quad (5.52)$$

P = Borunun ıslak çevresi

$$\text{Akışkanın ivmesi; } \frac{dV}{dt} \quad (5.53)$$

Yukarıda 5.49, 5.50, 5.51, 5.52, 5.53 eşitlikleri doğrultusunda Newton'un II. Hareket Kanunu uygulanırsa;

$$\sum F = m \cdot a$$

$$pA - \left(pA + \delta x \cdot \frac{\partial pA}{\partial x} \right) - \rho \delta x \left(\frac{A + A + \frac{\partial A}{\partial x} \cdot \delta x}{2} \right) \cdot g \cdot \sin \theta - \tau \cdot P \cdot \delta x = \rho \delta x \left(\frac{A + A + \frac{\partial A}{\partial x} \cdot \delta x}{2} \right) \frac{dV}{dt}$$

Burada ikinci derece diferansiyel terimler ihmal edilir ve tüm terimler $\rho A \delta x$ ile bölünürse;

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + g \cdot \sin \theta + \frac{\tau \cdot P}{\rho \cdot A} + \frac{dV}{dt} = 0 \quad (5.54)$$

elde edilir.

Kararlı akım halinde τ_0 'ı hesaplayalım. Kayma gerilmesini oluşturan sürtünme kuvvetin kaymaya maruz kalan yüzeye oranı aradığımız gerilmeyi verecektir. Düz boruda basınç kayıpları;

$$\Delta h = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \text{ idi.}$$

Bu ifadeyi önce ρg ile çarparak basıncı ve sonra boru kesit alanı ile çarparak basınç kuvvetini buluruz.

$$F = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot \rho g \cdot A \quad (5.55)$$

$$\tau = \frac{\text{Kaymaya Zorlayan Kuvvet}}{\text{Kaymaya Zorlanan Alan}} \quad (5.102)$$

ise

$$\tau = \frac{\lambda \frac{\delta x}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot \rho g \cdot A}{P \cdot \delta x} \quad (5.56)$$

Buradan;

$$\tau_0 = \frac{\lambda}{8} \cdot \rho \cdot V^2 \quad (5.57)$$

bulunur.

Yukarıdaki denklemde ivme ifadesini maddesel türev operatörünü kullanarak açalım;

$$\frac{d \otimes}{dt} = \frac{\partial \otimes}{\partial t} + \overrightarrow{grag} \otimes$$

ise

$$\frac{dV}{dt} = V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \text{ dir.}$$

Buradan;

$$\frac{1}{\rho g} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \sin \theta + \frac{\lambda}{\rho g} \frac{\rho V^2}{2D} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (5.58)$$

elde edilir. Bu denklemde p yerine $\rho g y$ yazar ve bütün terimleri g ile çarparsak;

$$\boxed{V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \lambda \frac{V|V|}{2D} + g \sin \theta = 0} \quad (5.59)$$

Burada sürtünme teriminde mutlak değer işaretinin kullanılmasının amacı akımın yönüne göre uygun işareti sağlamaktır. Bu denklemde ilk iki terim akışkanın ivmesini temsil eder. Diğer üç

terim sırasıyla basınç dağılımını, akışkan sürtünmesini ve yer çekiminden dolayı birim kütleye etki eden kuvvetlerdir.

Bu eşitlikteki “ λ ” sürtünme faktörünün değeri, laminar akım için,

$$\lambda = \frac{64}{Re}, Re < 2300 \quad (5.60)$$

Türbülanslı akım için,

$$\lambda = \left[\frac{1}{1,14 - 2 \log \left(\frac{\delta}{D} - \frac{21,25}{Re^{0,9}} \right)} \right]^2, Re \geq 2300 \quad (5.61)$$

eşitliklerinden hesaplanır.

Şimdi su darbesi bölgesi, yani sıvı sütunu ayrılması olayının meydana gelmediği bölgedeki kararsız akım şartlarına ait denklemleri aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz.

Süreklilik Denklemi;

$$\boxed{V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0}$$

(5.62)

Hareket Denklemi;

$$\boxed{V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \lambda \frac{V|V|}{2D} + g \sin \theta = 0} \quad (5.63)$$

Burada;

t = Hesaplama süresinin başlangıcından itibaren ölçülen zaman, saniye olarak.

x = Başlangıç noktasından itibaren boru eksenini boyunca ölçülen uzaklık, m olarak.

H = Boru eksenini esas alınarak borunun herhangi bir en kesitindeki mutlak basınç yükü, N.m./N olarak

V = Borunun herhangi bir en kesitinde akımın ortalama hızı m/sn olarak

g = Yer çekimi ivmesi, m/sn² olarak

λ = Kararlı akım sürtünme faktörü (akımın laminar veya türbülans rejiminde oluşuna göre 5.60 ve 5.61 eşitlikleri ile hesap edilir) .

D = Borunun iç çapı, m olarak

θ = Borunun eğim açısı, radyan olarak (eğer boru akım istikametinde sağa doğru aşağıya eğimli ise, $\sin\alpha +$, yukarıya doğru eğimli ise - alınır).

c = Sıvının serbest gaz ihtiva etmesi halinde, basınç dalgasının yayılma hızı, m/sn olarak

$$c = \sqrt{\frac{K / \rho_s}{1 + \frac{K D}{E e} \psi}} \quad (5.64)$$

$$K = \frac{K_s}{1 + s \left(\frac{K_s}{K_g} - 1 \right)} \quad (5.65)$$

Burada;

K_s = Sıvının hacimsel elastiklik modülü. (N/m²)

K_g = Havanın elastiklik modülü. (N/m²)

ρ_s = Sıvının yoğunluğu (kg/m^3)

E = Boru malzemesinin elastik modülü, (N/m^2)

e = Boru çeperi kalınlığı, (m)

s = Boşluk oranı, boyutsuz

ψ = Poisson oranının bir fonksiyonu olan boyutsuz bir parametre (değeri ince çeperli borular için borunun mesnetleme tarzına göre 5.42, 5.43 ve 5.44 denklemleri ile hesaplanır).

Bu tezde 5.62 ve 5.63 eşitlikleri, basınçlı bir boruda $V(x,t)$ ve $y(x,t)$ bağımlı değişkenlerinin belirtilmesinde kullanılan ana diferansiyel denklemleri teşkil eder. Bu denklemler, bağımlı değişkenlerin türevlerinin yalnızca birinci dereceden kuvvetlerini ihtiva ettiklerinden, bunlara sıvı-hava karışımını bir akışkanın kararsız akımına ait birinci mertebeden quasilineer kısmi diferansiyel denklemler çifti adı verilebilir.

5.61 eşitliği ile verilen c dalga hızının ifadesi, boşluk oranı $s = 0$ olması halinde ;

$$c = \sqrt{\frac{K_s / \rho_s}{1 + \frac{K_s D}{E e} \psi}} \quad (5.66)$$

eşitliğine dönüşür. Bu ifade ise, borudaki sıvı içinde serbest gaz (hava) bulunmaması halinde, basınç dalgasının sıvı ortamı içindeki yayılma hızını verir. Şu halde; 5.62 ve 5.63 denklem çifti $s=0$ olması halinde normal su-darbesi denklemlerine dönüşür.

Eğer sıvı içinde serbest gaz mevcut ise (az miktarda dahi) , bu takdirde boru çeperinin elastisitesinin etkisi önemsiz olur ve bununla ilgili terim düşürülerek yukarıdaki eşitlik

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho_s}} \quad (5.67)$$

şeklinde ifade edilebilir.

5.4 Karakteristikler Yöntemi ile Çözüm

Su darbesini idare eden süreklilik ve hareket denklemleri nonlinear kısmi diferansiyel denklemlerdir ve doğrudan integrasyonu mümkün olmamaktadır. Bu bölümde bu diferansiyel denklemlerin karakteristikler yöntemi ile yaklaşık çözümü ele alınacaktır. Süreklilik denklemini ve hareket denklemini bir K çarpanı ile çarparak toplarsak sonucu yine sıfıra eşitleyelim.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{C^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + K \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\lambda}{2D} V |V| + g \sin \theta \right) = 0$$

elde edilir. Bu ifade aşağıdaki gibi düzenlenirse

$$\left[\frac{\partial H}{\partial t} + (V + Kg) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + K \left[\frac{\partial V}{\partial t} + \left(V + \frac{C^2}{Kg} \right) \frac{\partial V}{\partial x} \right] + V \sin \theta + K \frac{\lambda}{2D} V |V| = 0 \quad (5.68)$$

bulunur. Bu ifadenin birinci parantezi dH/dt tam diferansiyeline, ikinci parantezi ise dV/dt tam diferansiyeline eşittir.

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + (V + Kg) \frac{\partial H}{\partial x}, \quad \text{burada } \frac{dx}{dt} = V + Kg$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + \left(V + \frac{C^2}{Kg} \right) \frac{\partial V}{\partial x}, \quad \text{burada } \frac{dx}{dt} = V + \frac{C^2}{Kg}$$

Burada dx/dt nin iki değeri birbirine eşitlenirse $K = \pm C/g$ elde edilir. Bu ifadeler (5.68) eşitliğinde yerine yazılırsa, ilerleyen K^+ karakteristiği için

$$\frac{dH}{dt} + \frac{C}{g} \frac{dV}{dt} + V \sin \theta + \frac{C\lambda}{2gD} V |V| = 0 \quad (5.69)$$

$$\frac{dx}{dt} = V + C \quad (5.70)$$

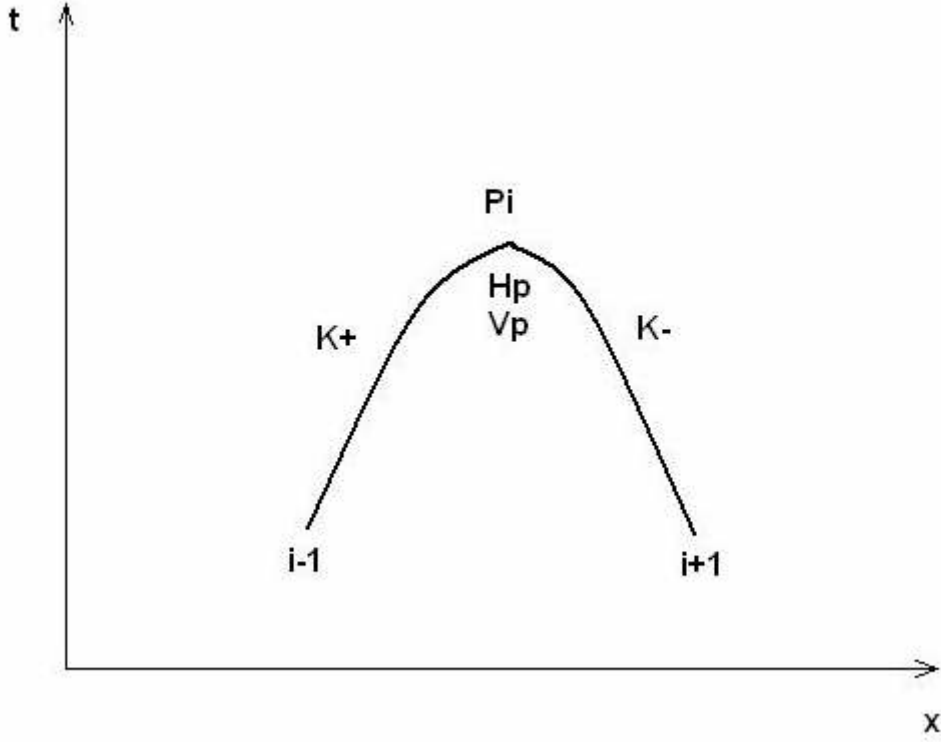
ve gerileyen K^- karakteristiği için

$$\frac{dH}{dt} - \frac{C}{g} \frac{dV}{dt} + V \sin \theta - \frac{C\lambda}{2gD} V |V| = 0 \quad (5.71)$$

$$\frac{dx}{dt} = V - C \quad (5.72)$$

eşitlikleri yazılabilir.

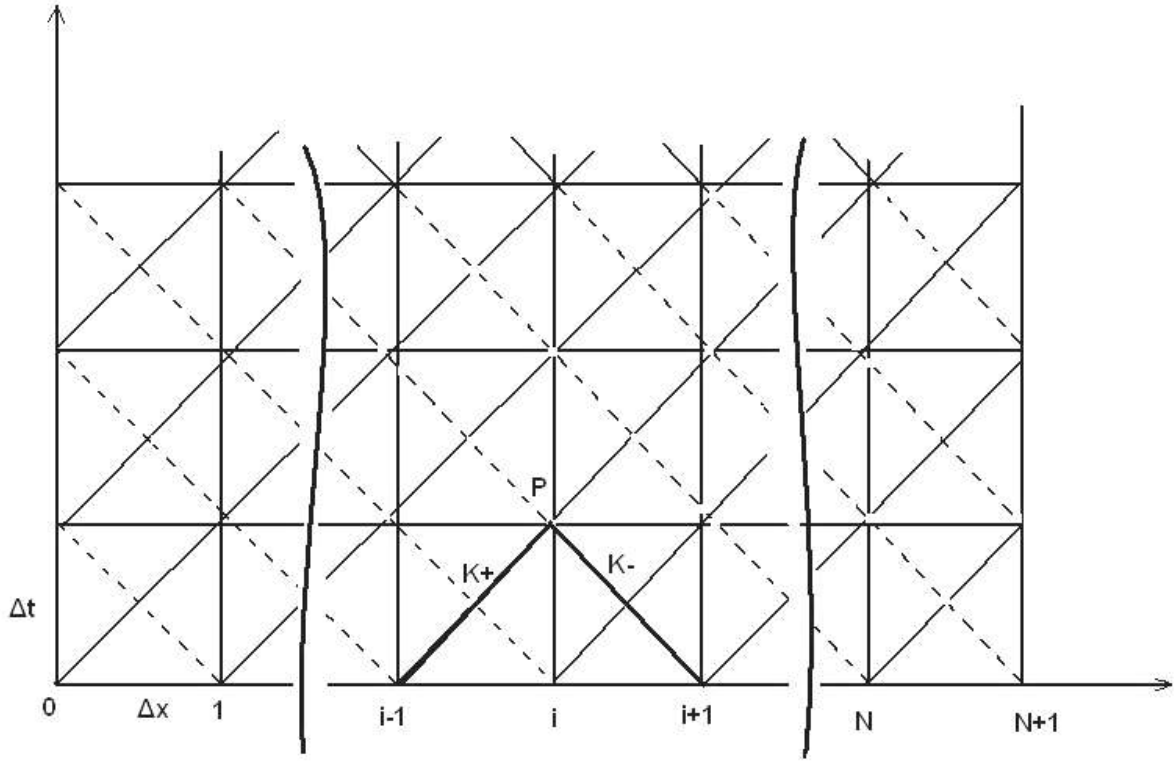
Bu denklemler karakteristik denklemler ve bu denklemlerin geçerli olduğu $dx/dt=V\pm C$ eğimli eğriler de karakteristik eğriler olarak adlandırılır (Şekil 5.2). Burada, V akım hızı, C basınç dalgasının yayılma hızı yanında çok küçük olduğundan (5.70) ve (5.72) eşitliklerinde ihmal edilebilir. Bu durumda $dx/dt=\pm C$ olacağından, karakteristik eğriler doğruya dönüşür. (5.69) - (5.71) denklemlerinden K^+ ve K^- karakteristik eğrilerinin kesiştiği bir P noktasında H_p , V_p , X_p ve t_p bilinmeyenleri bulunabilir (Şekil 5.2). Böylece, sayısal çözüm, karakteristikler boyunca ara noktalar için başlangıç değerlerinden yararlanarak kesim noktalarında hız ve basınç değerleri bulunarak gerçekleştirilir. Borunun pompa ucunda K^- karakteristiği, kapalı ucunda ise K^+ karakteristiği üzerinde geçerli eşitliklerle sınır şartlarının ortak çözümünden bilinmeyenler elde edilir.



Şekil 5.2 Karakteristik eğriler

Sayısal yöntemin uygulanmasında, boru boyu N eşit parçaya bölünür. $t=0$ anında akım düzenli olduğundan, bütün kesitlerde V_i , H_i başlangıç değerleri bilinmektedir. Değişken akım değerlerinin hesaplanmasında, başlangıç ve sınır şartları kullanılarak zamana bağlı çözüm gerçekleştirilir. Geliştirilen algoritmada sabit bir zaman aralığı $\Delta t = \Delta x / C$ eşitliğinden hesaplanarak çözümler gerçekleştirilmiştir.

C dalga yayılma hızı boru malzemesi ve akışkan özelliklerine bağlı olduğundan bu özellikler değişmediği sürece K^+ ve K^- karakteristikleri birbirine paralel doğrular ailesi oluştururlar(Şekil 5.3).



Şekil 5.3 Karakteristikler Ağı

Her bir hesap adımı için zaman aralığı $\Delta t = \Delta x / C$ olduğundan karakteristik doğruların kesişme noktalarında x ve t bilinmektedir. (5.69) denklemi Δt ile çarpılarak K^+ karakteristiği boyunca $i-1$ ve P arasında integre edilirse;

$$H_p - H_{i-1} + \frac{C}{g}(V_p - V_{i-1})\sin\theta \cdot \Delta t + \frac{C\lambda}{2gD} V_{i-1} |V_{i-1}| \Delta t = 0 \quad (5.73)$$

elde edilir. Benzer şekilde (5.71) denklemi Δt ile çarpılarak K^- karakteristiği boyunca $i+1$ ve P arasında integre edilirse, denklem

$$H_p - H_{i+1} - \frac{C}{g}(V_p - V_{i+1}) + V_{i+1} \cdot \sin\theta \cdot \Delta t - \frac{C\lambda}{2gD} V_{i+1} |V_{i+1}| \Delta t = 0 \quad (5.74)$$

şeklini alır. (5.73) ve (5.74) denklemlerinin ortak çözümünden

$$H_p = \frac{1}{2} \left[H_{i-1} - H_{i+1} + \frac{C}{g} (V_{i-1} + V_{i+1}) - \Delta t \cdot \sin \theta (V_{i-1} - V_{i+1}) - \frac{C\lambda\Delta t}{2gD} (V_{i-1}|V_{i-1}| + V_{i+1}|V_{i+1}|) \right] \quad (5.75)$$

$$V_p = \frac{g}{2C} \left[H_{i-1} - H_{i+1} + \frac{C}{g} (V_{i-1} + V_{i+1}) - \Delta t \cdot \sin \theta (V_{i-1} - V_{i+1}) - \frac{C\lambda\Delta t}{2gD} (V_{i-1}|V_{i-1}| + V_{i+1}|V_{i+1}|) \right] \quad (5.76)$$

elde edilir. Böylece, ara noktalarda; 2'den N'e kadar olan boru kesitlerindeki P kesişme noktalarında. K^+ bilinmeyenleri (5.75) ve (5.76) denklemleri yardımı ile belirlenebilir.

5.5. Sınır Şartları

Borunun pompa ucunda K^- gerileyen karakteristik için (5.73) denklemi. kapalı ucunda ise K^+ ilerleyen karakteristik için (5.74) denklemi geçerlidir. Her bir sınırdaki H_p ve V_p değişkenlerinin belirlenebilmesi için ikinci bir ilişkiye ihtiyaç vardır. Bu ilişki, sabit debili pistonlu pompa durumunda olduğu gibi. ya değişkenlerden birinin zamanla değişimi şeklinde bilinebilir ya da iki değişken arasında cebirsel veya diferansiyel formda olabilir.

Aşağıda borunun pompa ve kapalı ucundaki sınır şartlarına uygun hesap esasları açıklanmaktadır. Eşitliklerde kısaltmalar yapılması bakımından, her kesitte sabit değerler için $R_1 = C/g$, $R_2 = \lambda.C/2gD$ alınmıştır.

5.5.1 Doldurma Durumu İçin Boru Ucunda Sınır Şartı

Borunun giriş ucunda pompa bulunması durumunda, pompa basıncı sabit kabul edilebilir. Bu durumda, K^- karakteristiği üzerinde geçerli ifade ile sabit seviyeli pompa şartının ortak çözümünden, bilinmeyen H ve V değişkenleri bulunabilir.

K^- karakteristiği için (5.74) eşitliğinden;

$$H_p - H_2 - R_1(V_p - V_2) + \Delta t[V_1 \sin \theta - R_2 V_2 |V_2|] = 0 \quad (5.77)$$

yazılabilir, l kesitinde sabit seviyeli pompa bulunduğundan

$$H_p = H_{Pompa} - (1+k) \frac{V_p^2}{2g} \quad (5.78)$$

yazılabilir. Burada k vana kaybı katsayısını göstermektedir. (5.78) ifadesi (5.77) denkleminde yerine yazılırsa

$$H_{Pompa} - k \frac{V_p^2}{2g} - H_2 - R_1(V_p - V_2) + \Delta t[V_2 \sin \theta - R_2 V_2 |V_2|] = 0$$

elde edilir. Düzenlemeler yapılırsa

$$\frac{k}{2g} V_p^2 + R_1 \cdot V_p - H_{Pompa} + H_2 - R_1 \cdot V_2 - V_2 \sin \theta \cdot \Delta t + R_2 \cdot V_2 \cdot |V_2| \cdot \Delta t = 0 \quad (5.79)$$

elde edilir. Bu ifade ikinci dereceden tek bilinmeyenli bir denklemdir. Buradan V_p bilinmeyi kolaylıkla bulunabilir. Bulunan V_p değeri (5.78) eşitliğinde yerine yazılırsa H_p bilinmeyi elde edilir.

5.5.2 Boşaltma Durumu İçin Boru Ucunda Sınır Şartı

Boru ucundaki vananın bir orifis gibi çalıştığı kabul edilirse, düzenli akım durumunda

$$A_0 V_0 = (C_d A_v)_0 \sqrt{2gH_0}$$

değişken akım durumunda ise

$$A V_p = (C_d A_v) \sqrt{2gH_p}$$

yazılabilir . Bu iki eşitlik taraf tarafa oranlanırsa

$$\frac{V_p}{V_0} = \frac{(C_d A_v)}{(C_d A_v)_0} \sqrt{\frac{H_p}{H_0}} = \tau \sqrt{\frac{H_p}{H_0}} \quad (5.80)$$

elde edilir. Burada C_d debi katsayısını göstermektedir ve sabit kabul edilebilir. Bu durumda

$\tau = A/A_0$ olarak alınabilir. Burada τ vana açıklık oranını göstermektedir.

Değişken akım durumunda bilinmeyenlerin belirlenebilmesi için τ 'nun kullanılan vana türüne göre zamanla değişimi bilinmelidir. Bu değişimin ifadesi, cebirsel eşitlik formunda, ya da belli zamanlar için sayısal değerler şeklinde olabilir.

K karakteristiği için (5.73) eşitliğinden:

$$H_p - H_2 + R_1(V_p - V_2) + \Delta t[V_2 \sin \theta + R_2 V_2 |V_2|] = 0 \quad (5.81)$$

yazılabilir. (5.80) eşitliğinden:

$$H_p = H_0 \left[\frac{V_p}{V_0 \tau} \right]^2 \quad (5.82)$$

elde edilir. (5.81) ifadesi (5.82) eşitliğinde yerine yazılırsa

$$\frac{H_0}{V_0^2 \tau} V_p^2 + R_1 V_p - H_N - R_1 V_N + \Delta t[V_N \sin \theta + R_2 V_N |V_N|] = 0 \quad (5.83)$$

elde edilir. Bu denklem de değişkeni V_p olan ikinci dereceden bir polinomdur. Buradan V_p bilinmeyeni kolaylıkla bulunabilir. Bulunan V_p değeri (5.82) ifadesinde yerine yazılarak H_p 'nin değeri elde edilir. τ değerinin zamanla değişimi vana tipine göre değişiklik göstermektedir. Bizim cihazımızda kullanılan vana tipi küresel vanalardır.

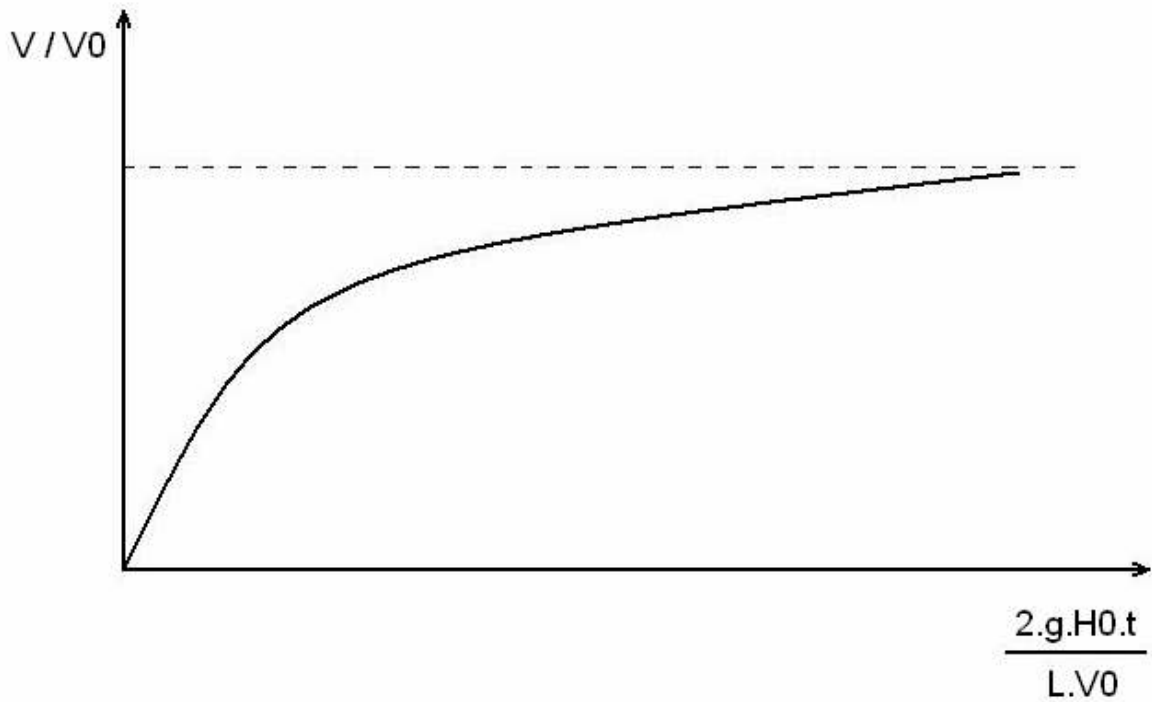
Vananın tam açık durumdan tam kapalı duruma gelmesi halinde, akım hızı kapanma süresi içinde sıfıra düşer. Açılma durumunda ise farklı bir durum söz konusudur. Vananın tam kapalı durumdan tam açık duruma gelmesi ile akım tam teşekkül etmeyebilir ve dolayısı ile akım hızı V_0 değerine ulaşmayabilir. Vananın aniden açılması durumunda akımın teşekkül zamanı için

$$t = \frac{LV_0}{2gH_0} \ln \frac{V_0 + V}{V_0 - V}$$

ifadesi verilebilir (Fox, 1977). Bu ifadeden, ani açılma durumunda akım hızı için

$$\frac{V}{V_0} = \frac{e^{\frac{2gH_0t}{LV_0}} - 1}{e^{\frac{2gH_0t}{LV_0}} + 1} \quad (5.84)$$

yazılabilir. Bu ifadeden de belirlenebileceği gibi akım hızı $t \rightarrow \infty$ için $V = V_0$ olmaktadır (Şekil 5.4). Ancak, örnek olarak $V = 0.99 V_0$ için hesap yapılabilir. Bu çalışmada, vananın belirli bir süre içinde tam kapalı durumdan tam açık duruma gelmesi halinde, (5.84) ifadesi ile hesaplanan akım hızları alan değişim oranı τ ile çarpılarak modifiye edilmiştir.



Şekil 5.4 Ani Açılma Durumunda Akım Hızının Gelişimi

Wood ve Jones(1973), değişik türde vanaların kapanma eğrilerini geometrik bağıntılardan yararlanarak elde etmiştir. Kullanılan vananın alan oranı, kapama elemanının pozisyonu Z 'nin tam kapanma pozisyonu D 'ye oranına bağlı olarak verilmiştir.

Bu oran;

$$\frac{A}{A_0} = 2 \frac{Z}{D} - \left(\frac{Z}{D} \right)^2$$

şeklinde verilmiştir.

5.6 Su Darbelerini Hesaplayan Programın Yazılması

Bu çalışmada programlama dili olarak C++ kullanılmıştır. Programın adımları aşağıdaki gibidir.

- 20*13 lük bir matris oluşturuldu.
- Akım şartlarına göre basınç dalgasının yayılma “C” hızı hesaplandı.
- 1 m seçilen Δx aralığına ve C’ye göre Δt hesaplandı. Böylece matrisin bütün gözlerinde x ve t belirlendi.
- Gerekli başlangıç değerleri okutuldu.
- Sınır şartlarının hesaplanması program içine kodlandı.
- Yukarıda açıklanan Şekil 5.3’e göre algoritma oluşturuldu.
- Program çıktıları yazdırıldı.

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
```

```
#ifndef g
#define g 9.81
#endif
```

```
void matrisSifirla(double ***matris)
{
    double **H;
    H=*matris;

    for(int i=0;i<20;i++)
    {
        for(int j=0;j<13;j++)
            H[i][j]=0.0;
    }
}
```

```
void matrisYazdir(double **Y)
{
    printf("in main\n");
    for(int i=0;i<10;i++)
    {
        for(int j=0;j<6;j++)
            printf("%lf\t",Y[i][j]);
        printf("\n");
    }
}
```

```

#include "main.h"

int main()
{
    int i,j, secim;

    double **H, **V;//basinc ve hiz matrisi
    double testBasinci;
    double tmp;//gecici degisken
    double degisenX;//her artimda dx kadar artar
    double x=12.0;//boru boyu
    double dx=1.0;//birim artim
    double lambda=0.043;//kayip katsayisi
    double Vilk;//ilk hiz
    double D;//boru capı
    double K=2.07e+9;//Hacimsel elastiklik modulu
    double ro=1000;//su icin yogunluk
    double E=2.1e+9;//Boru malzemesi elastisite modulu(disardan verilecek)
    double e=0.01;//boru et kalınlıgı(disardan verilecek)
    double fi=1;//Boru baglama parametresi
    double C;//Dalga yayılma hizi
    double dt;
    double R1;
    double R2;
    double k=0.5;//vana kayıp katsayisi
    double To;//Vana aciklik oranı
    double Z=0.009;//vana orifis capı

    H=(double **)malloc(20*sizeof(double *));
    for(i=0;i<20;i++)
        H[i]=(double *)malloc(13*sizeof(double));

    V=(double **)malloc(20*sizeof(double *));
    for(i=0;i<20;i++)
        V[i]=(double *)malloc(13*sizeof(double));

    matrisSifirla(&H);
    matrisSifirla(&V);

    printf("Test basinci: ");
    scanf("%lf", &testBasinci);

    printf("Boru capı: ");
    scanf("%lf", &D);

    /* Suyun yayılma hızı hesaplanıyor */
    C=sqrt( (K/ro) / (1+(K/E)*(D/e)*fi) );
    printf("C=%lf\n", C);

```

```

dt=dx/C;
printf("dt=%lf\n", dt);

R1=C/g;
R2=lambda*C/(2*g*D);

/* kuresel vana icin */
To=2*Z/D-((Z*Z)/(D*D));
printf("To=%lf\n",To);

printf("\n1- BASINC YUKSELTME (Pompa vanasi acik / Bosaltma vanasi
kapali)\n");
printf("2- BASINC DUSURME (Pompa vanasi kapali / Bosaltma vanasi acik)\n");
printf("\nSeciminizi yapin: ");
scanf("%d", &secim);

while(secim!=1 && secim!=2)
{
    printf("Hatali giris\nSeciminizi yapin: ");
    scanf("%d", &secim);
}

/* ilk seviye icin hesaplamalar */
H[0][0]=(testBasinci*10e+5)/(10e+3*9.81);
Vilk=0.0007/(D*D*(3.1415/4));
printf("Vilk=%lf\n",Vilk);
V[0][0]=Vilk;
//printf("V[%d][%d]=%lf\n",0,0,V[0][0]);

degisenX=dx;
j=1;
while(degisenX<=x)
{
    H[0][j]=H[0][j-1]-((lambda*dx*Vilk*Vilk/D*2*g));
    V[0][j]=Vilk;
    //printf("V[%d][%d]=%lf\n",0,j,V[0][j]);

    j++;
    degisenX+=dx;
}
/* ilk seviye icin hesaplamalar bitti */

for(i=0;i<20;i++)
{
    H[i][12]=H[0][12];
    V[i][12]=0;
}

i=1;

```

```

while(i<20){

    j=0;
    degisenX=0;
    while(degisenX<x)
    {
        switch(secim)
        {
            case 1://Basinc yukseleme
                V[i][0]= (-R1 + sqrt( R1*R1 - ( 4*k / (2*g) ) * R2* V[i-1][1] + H[i-
1][1] - H[0][0] ) ) / (k/g);
                //printf("V[%d][%d]=%lf\n",i,0,V[i][0]);
                H[i][j]=H[0][0]- (1+K)* V[i][0]*V[i][0]/2*g);
                //printf("V[%d][0]=%lf\nH[%d][0]=%lf\n", i, V[i][0], i, H[i][0]);
                break;
            case 2://Basinc dusurme
                V[i][0]=(-R1 + sqrt( R1*R1 - (4* H[0][0] / ( V[0][0] * V[0][0] * To ) ) *
( (dt * R2 * V[i-1][1] * V[i-1][1]) - H[i-1][1] - R1*V[i-1][0] ) ) ) / ( 2* H[0][0] / ( V[0][0] *
V[0][0] * To ) );
                //printf("V[%d][%d]=%lf\n",i,0,V[i][0]);
                H[i][0]=H[0][0]*(V[i][0]/(V[0][0] * To))*(V[i][0]/(V[0][0] * To));
                //printf("V[%d][0]=%lf\nH[%d][0]=%lf\n", i, V[i][0], i, H[i][0]);
                break;
        }
        degisenX+=dx;
        j++;
    }
    i++;
}

i=0;
while(i<13)
{
    j=0;
    while(j<20)
    {
        printf("H[%d][%d]=%lf\n", j,i,H[j][i]);
        j++;
    }
    i++;
    printf("\n-----\n");
}

printf("\nProgram bitti bir tusa basin...\n");
getchar();
getchar();
}

```

5.7 Programın Çıktıları ve Yorumlanması

Programın farklı başlangıç değerleri için çalıştırılması sonucunda en yüksek değerde su darbesinin en küçük çap olan 300'lük boruda görüldüğü saptanmıştır. Ayrıca basınç dalgasının hızı çok yüksek olduğundan boru boyunca her 1 m'de alınan çıktıların bir birine çok yakın oldukları gözlenmiştir. 30 bar'lık test için boru içinde başlangıçta basınç metre su sütunu cinsinden 305,81 m iken doldurma vanası açıldığı anda 308,09 m'ye yükselmiştir. Bu değer standartlarda belirtilen $\pm\%2$ değerine uygundur.

```
Test basincini giriniz (bar): 30
Boru capini giriniz (m): 0.3
Boru et kalinligini giriniz (m): 0.0075
Basinc dalgasinin yayilma hizi m/s (C)=226.277293
deltat=0.004419

1- BASINC YUKSELTME (Pompa vanasi acik / Bosaltma vanasi kapali)
2- BASINC DUSURME (Pompa vanasi kapali / Bosaltma vanasi acik)

Seciminizi yapin: 1
Uilk=0.099033
dx=0.000000
dt=0.000000 -> H[0][0]=305.810398
dt=0.004419 -> H[1][0]=308.094683
dt=0.008839 -> H[2][0]=307.980469
dt=0.013258 -> H[3][0]=307.866255
dt=0.017677 -> H[4][0]=307.752040
dt=0.022097 -> H[5][0]=307.637826
dt=0.026516 -> H[6][0]=307.523612
dt=0.030935 -> H[7][0]=307.409398
dt=0.035355 -> H[8][0]=307.295183
dt=0.039774 -> H[9][0]=307.180969
dt=0.044194 -> H[10][0]=307.066755
dt=0.048613 -> H[11][0]=306.952540
dt=0.053032 -> H[12][0]=306.838326
dt=0.057452 -> H[13][0]=306.724112
dt=0.061871 -> H[14][0]=306.609898
dt=0.066290 -> H[15][0]=306.495683
dt=0.070710 -> H[16][0]=306.381469
dt=0.075129 -> H[17][0]=306.267255
dt=0.079548 -> H[18][0]=306.153040
dt=0.083968 -> H[19][0]=306.038826

-----

dx=1.000000
dt=0.000000 -> H[0][1]=305.782817
dt=0.004419 -> H[1][1]=308.094683
dt=0.008839 -> H[2][1]=307.979090
dt=0.013258 -> H[3][1]=307.863497
dt=0.017677 -> H[4][1]=307.747903
dt=0.022097 -> H[5][1]=307.632310
dt=0.026516 -> H[6][1]=307.516717
dt=0.030935 -> H[7][1]=307.401123
dt=0.035355 -> H[8][1]=307.285530
dt=0.039774 -> H[9][1]=307.169937
dt=0.044194 -> H[10][1]=307.054343
dt=0.048613 -> H[11][1]=306.938750
dt=0.053032 -> H[12][1]=306.823157
dt=0.057452 -> H[13][1]=306.707564
dt=0.061871 -> H[14][1]=306.591970
dt=0.066290 -> H[15][1]=306.476377
dt=0.070710 -> H[16][1]=306.360784
dt=0.075129 -> H[17][1]=306.245190
dt=0.079548 -> H[18][1]=306.129597
dt=0.083968 -> H[19][1]=306.014004

-----
```

```

dx=2.000000
dt=0.000000 -> H[0][2]=305.755236
dt=0.004419 -> H[1][2]=308.094683
dt=0.008839 -> H[2][2]=307.977711
dt=0.013258 -> H[3][2]=307.860739
dt=0.017677 -> H[4][2]=307.743766
dt=0.022097 -> H[5][2]=307.626794
dt=0.026516 -> H[6][2]=307.509822
dt=0.030935 -> H[7][2]=307.392849
dt=0.035355 -> H[8][2]=307.275877
dt=0.039774 -> H[9][2]=307.158905
dt=0.044194 -> H[10][2]=307.041932
dt=0.048613 -> H[11][2]=306.924960
dt=0.053032 -> H[12][2]=306.807988
dt=0.057452 -> H[13][2]=306.691015
dt=0.061871 -> H[14][2]=306.574043
dt=0.066290 -> H[15][2]=306.457070
dt=0.070710 -> H[16][2]=306.340098
dt=0.075129 -> H[17][2]=306.223126
dt=0.079548 -> H[18][2]=306.106153
dt=0.083968 -> H[19][2]=305.989181
-----

```

```

dx=3.000000
dt=0.000000 -> H[0][3]=305.727656
dt=0.004419 -> H[1][3]=308.094683
dt=0.008839 -> H[2][3]=307.976332
dt=0.013258 -> H[3][3]=307.857981
dt=0.017677 -> H[4][3]=307.739629
dt=0.022097 -> H[5][3]=307.621278
dt=0.026516 -> H[6][3]=307.502926
dt=0.030935 -> H[7][3]=307.384575
dt=0.035355 -> H[8][3]=307.266224
dt=0.039774 -> H[9][3]=307.147872
dt=0.044194 -> H[10][3]=307.029521
dt=0.048613 -> H[11][3]=306.911170
dt=0.053032 -> H[12][3]=306.792818
dt=0.057452 -> H[13][3]=306.674467
dt=0.061871 -> H[14][3]=306.556115
dt=0.066290 -> H[15][3]=306.437764
dt=0.070710 -> H[16][3]=306.319413
dt=0.075129 -> H[17][3]=306.201061
dt=0.079548 -> H[18][3]=306.082710
dt=0.083968 -> H[19][3]=305.964359
-----

```

```

dx=4.000000
dt=0.000000 -> H[0][4]=305.700075
dt=0.004419 -> H[1][4]=308.094683
dt=0.008839 -> H[2][4]=307.974953
dt=0.013258 -> H[3][4]=307.855222
dt=0.017677 -> H[4][4]=307.735492
dt=0.022097 -> H[5][4]=307.615762
dt=0.026516 -> H[6][4]=307.496031
dt=0.030935 -> H[7][4]=307.376301
dt=0.035355 -> H[8][4]=307.256570
dt=0.039774 -> H[9][4]=307.136840
dt=0.044194 -> H[10][4]=307.017110
dt=0.048613 -> H[11][4]=306.897379
dt=0.053032 -> H[12][4]=306.777649
dt=0.057452 -> H[13][4]=306.657918
dt=0.061871 -> H[14][4]=306.538188
dt=0.066290 -> H[15][4]=306.418458
dt=0.070710 -> H[16][4]=306.298727
dt=0.075129 -> H[17][4]=306.178997
dt=0.079548 -> H[18][4]=306.059266
dt=0.083968 -> H[19][4]=305.939536
-----

```

```

dx=5.000000
dt=0.000000 -> H[0][5]=305.672495
dt=0.004419 -> H[1][5]=308.094683
dt=0.008839 -> H[2][5]=307.973574
dt=0.013258 -> H[3][5]=307.852464
dt=0.017677 -> H[4][5]=307.731355
dt=0.022097 -> H[5][5]=307.610246
dt=0.026516 -> H[6][5]=307.489136
dt=0.030935 -> H[7][5]=307.368027
dt=0.035355 -> H[8][5]=307.246917
dt=0.039774 -> H[9][5]=307.125808
dt=0.044194 -> H[10][5]=307.004698
dt=0.048613 -> H[11][5]=306.883589
dt=0.053032 -> H[12][5]=306.762480
dt=0.057452 -> H[13][5]=306.641370
dt=0.061871 -> H[14][5]=306.520261
dt=0.066290 -> H[15][5]=306.399151
dt=0.070710 -> H[16][5]=306.278042
dt=0.075129 -> H[17][5]=306.156932
dt=0.079548 -> H[18][5]=306.035823
dt=0.083968 -> H[19][5]=305.914714
-----

```

```

dx=6.000000
dt=0.000000 -> H[0][6]=305.644914
dt=0.004419 -> H[1][6]=308.094683
dt=0.008839 -> H[2][6]=307.972195
dt=0.013258 -> H[3][6]=307.849706
dt=0.017677 -> H[4][6]=307.727218
dt=0.022097 -> H[5][6]=307.604729
dt=0.026516 -> H[6][6]=307.482241
dt=0.030935 -> H[7][6]=307.359753
dt=0.035355 -> H[8][6]=307.237264
dt=0.039774 -> H[9][6]=307.114776
dt=0.044194 -> H[10][6]=306.992287
dt=0.048613 -> H[11][6]=306.869799
dt=0.053032 -> H[12][6]=306.747310
dt=0.057452 -> H[13][6]=306.624822
dt=0.061871 -> H[14][6]=306.502333
dt=0.066290 -> H[15][6]=306.379845
dt=0.070710 -> H[16][6]=306.257356
dt=0.075129 -> H[17][6]=306.134868
dt=0.079548 -> H[18][6]=306.012380
dt=0.083968 -> H[19][6]=305.889891
-----

```

```

dx=7.000000
dt=0.000000 -> H[0][7]=305.617334
dt=0.004419 -> H[1][7]=308.094683
dt=0.008839 -> H[2][7]=307.970816
dt=0.013258 -> H[3][7]=307.846948
dt=0.017677 -> H[4][7]=307.723081
dt=0.022097 -> H[5][7]=307.599213
dt=0.026516 -> H[6][7]=307.475346
dt=0.030935 -> H[7][7]=307.351478
dt=0.035355 -> H[8][7]=307.227611
dt=0.039774 -> H[9][7]=307.103743
dt=0.044194 -> H[10][7]=306.979876
dt=0.048613 -> H[11][7]=306.856008
dt=0.053032 -> H[12][7]=306.732141
dt=0.057452 -> H[13][7]=306.608273
dt=0.061871 -> H[14][7]=306.484406
dt=0.066290 -> H[15][7]=306.360539
dt=0.070710 -> H[16][7]=306.236671
dt=0.075129 -> H[17][7]=306.112804
dt=0.079548 -> H[18][7]=305.988936
dt=0.083968 -> H[19][7]=305.865069
-----

```

```

dx=8.000000
dt=0.000000 -> H[0][8]=305.589753
dt=0.004419 -> H[1][8]=308.094683
dt=0.008839 -> H[2][8]=307.969437
dt=0.013258 -> H[3][8]=307.844190
dt=0.017677 -> H[4][8]=307.718944
dt=0.022097 -> H[5][8]=307.593697
dt=0.026516 -> H[6][8]=307.468451
dt=0.030935 -> H[7][8]=307.343204
dt=0.035355 -> H[8][8]=307.217958
dt=0.039774 -> H[9][8]=307.092711
dt=0.044194 -> H[10][8]=306.967465
dt=0.048613 -> H[11][8]=306.842218
dt=0.053032 -> H[12][8]=306.716972
dt=0.057452 -> H[13][8]=306.591725
dt=0.061871 -> H[14][8]=306.466479
dt=0.066290 -> H[15][8]=306.341232
dt=0.070710 -> H[16][8]=306.215986
dt=0.075129 -> H[17][8]=306.090739
dt=0.079548 -> H[18][8]=305.965493
dt=0.083968 -> H[19][8]=305.840246
-----

```

```

dx=9.000000
dt=0.000000 -> H[0][9]=305.562172
dt=0.004419 -> H[1][9]=308.094683
dt=0.008839 -> H[2][9]=307.968058
dt=0.013258 -> H[3][9]=307.841432
dt=0.017677 -> H[4][9]=307.714807
dt=0.022097 -> H[5][9]=307.588181
dt=0.026516 -> H[6][9]=307.461556
dt=0.030935 -> H[7][9]=307.334930
dt=0.035355 -> H[8][9]=307.208305
dt=0.039774 -> H[9][9]=307.081679
dt=0.044194 -> H[10][9]=306.955053
dt=0.048613 -> H[11][9]=306.828428
dt=0.053032 -> H[12][9]=306.701802
dt=0.057452 -> H[13][9]=306.575177
dt=0.061871 -> H[14][9]=306.448551
dt=0.066290 -> H[15][9]=306.321926
dt=0.070710 -> H[16][9]=306.195300
dt=0.075129 -> H[17][9]=306.068675
dt=0.079548 -> H[18][9]=305.942049
dt=0.083968 -> H[19][9]=305.815424
-----

```

```

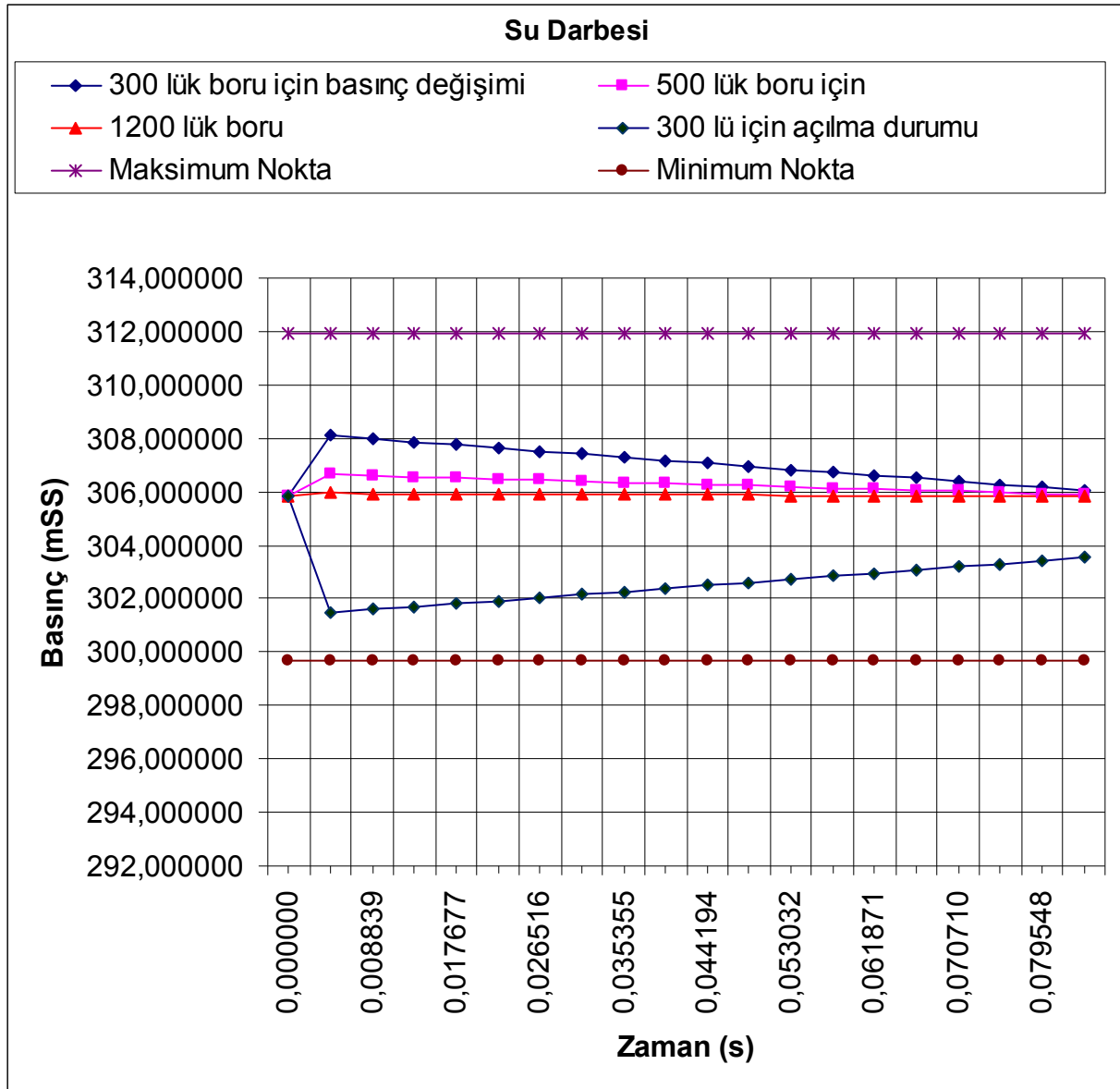
dx=12.000000
dt=0.000000 -> H[0][12]=305.479431
dt=0.004419 -> H[1][12]=308.094683
dt=0.008839 -> H[2][12]=307.963921
dt=0.013258 -> H[3][12]=307.833158
dt=0.017677 -> H[4][12]=307.702395
dt=0.022097 -> H[5][12]=307.571633
dt=0.026516 -> H[6][12]=307.440870
dt=0.030935 -> H[7][12]=307.310108
dt=0.035355 -> H[8][12]=307.179345
dt=0.039774 -> H[9][12]=307.048582
dt=0.044194 -> H[10][12]=306.917820
dt=0.048613 -> H[11][12]=306.787057
dt=0.053032 -> H[12][12]=306.656294
dt=0.057452 -> H[13][12]=306.525532
dt=0.061871 -> H[14][12]=306.394769
dt=0.066290 -> H[15][12]=306.264007
dt=0.070710 -> H[16][12]=306.133244
dt=0.075129 -> H[17][12]=306.002481
dt=0.079548 -> H[18][12]=305.871719
dt=0.083968 -> H[19][12]=305.740956
-----

```

Program bitti bir tusa basin...

Çizelge 5.1 Farklı boru çaplarında oluşan su darbeleri

Δt (s)	Δx (m)	P(300 lük boru) (mSS) Kapanma Durumu	P(300 lük boru) (mSS) Açılma Durumu	P(500 lük boru)(mSS)	P(1200 lük boru)(mSS)
0,000000	0	305,810398	305,810398	305,810398	305,810398
0,004419	0	308,094683	301,470255	306,632740	305,940996
0,008839	0	307,980469	301,584469	306,591623	305,934466
0,013258	0	307,866255	301,698683	306,550506	305,927936
0,017677	0	307,752040	301,812898	306,509389	305,921406
0,022097	0	307,637826	301,927112	306,468272	305,914876
0,026516	0	307,523612	302,041326	306,427155	305,908346
0,030935	0	307,409398	302,155540	306,386038	305,901816
0,035355	0	307,295183	302,269755	306,344920	305,895286
0,039774	0	307,180969	302,383969	306,303803	305,888756
0,044194	0	307,066755	302,498183	306,262686	305,882227
0,048613	0	306,952540	302,612398	306,221569	305,875697
0,053032	0	306,838326	302,726612	306,180452	305,869167
0,057452	0	306,724112	302,840826	306,139335	305,862637
0,061871	0	306,609898	302,955040	306,098218	305,856107
0,066290	0	306,495683	303,069255	306,057100	305,849577
0,070710	0	306,381469	303,183469	306,015983	305,843047
0,075129	0	306,267255	303,297683	305,974866	305,836517
0,079548	0	306,153040	303,411898	305,933749	305,829987
0,083968	0	306,038826	303,526112	305,892632	305,823457



Şekil 5.4 Farklı boru çapları için oluşan su darbeleri

En büyük su darbesi değeri 300 lük boru için oluşmuştur. 30 bar test basıncı için kararlı haldeki basınç 305,810398 m iken su darbesi sonucu bu değer maksimum 308,094683 m değerine ulaşmış ve minimum 301,470255 m değerini düşmüştür. Bu değerler maksimum ve minimum noktalar ile gösterilen $\pm\%2$ izin verilebilir sapma değerine uygundur. Eğer sistemde su akışı olmaz ise şekil 5.4 'de görüldüğü gibi su darbesi 0,079 saniye gibi çok kısa bir sürede sönümlenmektedir. Ancak pompa tarafındaki yüksek basınçlı su bu kadar kısa sürede kesmek imkansızdır. Piyasa kullanılabilir en hızlı açılıp kapanan vanalar 0,2 saniyede tepki vermektedir. Yapılan deneyler sonucu 4 valfli sıralı açılıp kapanan sistem kullanımı uygun görülmüştür. Sonuç olarak hem pompadan kaynaklanan ani basınç yükselmelerinin hem de su darbelerinden oluşan ani basınç dalgalanmalarının istenilen sınır aralıklarında kalması sağlanmıştır.

6 SONUÇLAR

Bu çalışmada CTP malzemenen yapılmış borular için hidrostatik basınç test cihazı tasarımı yapılmıştır. Bu tasarım yapılırken öncelikle neden böyle bir gereksimin olduğu açıklanmış CTP malzemenin üstün özellikleri anlatılmıştır. İlgili standartlar detaylı bir şekilde incelenmiş ve test senaryosu hazırlanmıştır.

İstenilen boru ebatlarına göre cihazın genel boyutlandırılması yapılmış ve bütün parçalar üç boyutlu olarak SolidWorks2007 katı modelleme programında tasarlanmıştır. Mukavemet analizi gerekli parçaların analizi de COSMOSxpress programında yapılmıştır. Hidrolik devreler Automation Studio 5.0 da tasarlanmış ve sistem kurulmadan önce test edilmiştir. Sonuç olarak tasarlanan bu cihaz dünya çapında CTP boru üretimi yapan bir firma tarafından kullanılmaya başlanmıştır.

İki valfli sistem için su darbesi analizi de yapılmıştır. Su darbesini idare eden diferansiyel denklemler elde edildikten sonra karakteristikler metodu ile çözüm yolu izlenmiştir. Bu test cihazına özel sınır şartları kullanılarak C++ programlama dilinde bir su darbesi programı yazılmış ve çalıştırılmıştır. En büyük su darbesinin en küçük çap olan 300 mm lik boruda olduğu gözlenmiş ve bu değer ilgili standartlara uygun olduğu gösterilmiştir. Ayrıca sistem 4 valfli olarak yapıldığından su darbesi açısından tam bir emniyet sağlanmıştır. 4 valfli sistem için analiz yapılmasına gerek kalmamıştır.

KAYNAKLAR

Akkurt, S., (1991), Plastik malzeme bilgisi, İ.T.Ü. Makine Fakültesi, İstanbul.

Allievi, L., (1903), Teoria Generale del Muto Perturbate dell acque Anei Tubi in Pressione, Ann. Soc. Ing. Arch. İtalya.

Aran, A., (1990), Elyaf takviyeli Karma Malzemeler İ.T.Ü. Rektörlük Ofset Atölyesi, İstanbul.

Aran,A., (1990) Elyaf takviyeli Karma Malzemeler İ.T.Ü. Rektörlük Ofset Atölyesi, İstanbul.

Arıkan, A.T., (2004), CTP Malzemelerinin Yapısal Strüktürlerde Kullanılmasına Yönelik Sorunların ve Strüktürel Davranışın İrdelenmesi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi,Gebze.

Azoury, P. H., Baasiri, M., and Najm, H., (1986), Effect of Valve-Closure Schedule on Water Hammer, ASCE, 112(10), 890-903

Broutman, L.J., Krock, R.H., (2001) “Modern Compozite Materials”, Addison- Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.

Hikmet, Y., (1992), ”Plastikler Dünyası”, MMO Yayın no:142,264.

Holmes, M. and JUST, D.J., (1983), GRP in Sutruktural Engineering, Applied Science Publishers Ltd., New York,.

Hull,D., (1992) Anintroduction to Composite Meterials, Cambridge University Pres,Combridge.

Joukowsky, N., (1897), Water Hammer (Translated by O. Simin), Proc. Awwa, 24, 341-424

Judge,J.F., (1996), ”The Coming Revolution”, Airline Management and Marketing.

Kırkgöz, M. S., Ardıçoğlu, M. and Selek, Z., (1994) Akışkanlar Mekaniği, Ç.O.Ü. Mühendislik Fakültesi s281 Adana

Mısıroğlu, M., (2001), Cam Malzemelerde Cam Elyaf Takviyenin Mekanik Özelliklere Etkisi, Sakarya.

Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik Yunus A. ÇENGEL, Michael A. BOLES, Mc. Graw Hill Yayınları

Nemet, A., (1978), Water Hammer Calculation and Security of Hydraulic İsnallations, Escher Wyss News, 1, 20-26

Shimada, M., Okushima, S., (1984), New Numerical Model and Tecnique for Water Hammer, J. Hydro. Engrg. ASCE 110(6), 736-748

Şahin, Y., (2000) Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Yayın Evi, Ankara.

Şişecam, (1985), CTP Teknolojisi, Cam Elyaf Sanayi A.Ş., İstanbul.

Şişecam, (1992) El Yatırması Yöntemi ile CTP Kalıplama, CTP Rehberi.

Şişecam, (1996), Cam Elyaf Sanayi A.Ş., Bülten 7, İstanbul.

Şişecam, (1996), Cam Elyaf Sanayi A.Ş., Bülten, 4, 1996a, İstanbul.

Şişecam, (1997) Cam Elyaf Sanayi A.Ş., Bülten1 İstanbul.

Şişecam, (1997), Cam Elyaf Sanayi A.Ş., Bülten 8, İstanbul.

Şişecam, (1998), Cam Elyaf Sanayi A.Ş., Bülten 1, İstanbul.

VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ‘Su Darbesi Projelendirme Hataları’ Levent KAVURMACI, Haluk KARADOĞAN, 2002

Watson J.C and Raghupathi N., (1989), Glass Fibers.

Watters, G. Z., Jeppson, R. W. And Flammer, G. H., (1976), Water Hammer in PVC and Reinforced Plastic Pipe. J. Hydro. Div. ASCE, 102(7) 831-843

Wiggert, D. C. and Sundquist, M. J., (1977), Fixed Grid Characteristics for Pipeline Transients. J. Hydro. Div. ASCE, 103(12), 1403-1416

Wood, D. J., Jones, S. E., (1973), Water Hammer Charts for Various Types Valves, J. Hydro. Div., ASCE, 99(1), 167-178

www.camelyaf.com.tr

www.ctpsander.org

www.fiberline.com

www.pilsa.com.tr

www.subor.com.tr

www.turkcadcam.net/rapor/kompozit-malzemeler/index.html

Wylie, E. B., (1983), The Microcomputer and Pipeline Transients, J. Hydro. Engrg. ASCE 109(12), 1723-1739

Yıldız Treyler San., (1985), Plastik Maddeler, Yıldız Treyler San.Ltd.Şti., İstanbul.

YTÜ Kosgeb Alarge Firması Basınç Test Cihazı İle İlgili Dokümanlar.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	17/03/1982	
Doğum yeri	Alanya	
Lise	1996-2000	Alanya Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi
Lisans	2000-2004	Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2004-2008	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programı

Çalıştığı Kurumlar:

2004-2006	Ülkem Yapı Denetim Ltd. Şti.
2007- 2008	Alarge Ltd. Şti.