

**ENDÜSTRİYEL DAMPERDE BASINÇ TÜPÜ
AKIŞ KANALI TASARIMI
ve OPTİMİZASYONU**

Emel ÖZKAN



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL DAMPERDE BASINÇ TÜPÜ AKIŞ KANALI TASARIMI
ve OPTİMİZASYONU**

Emel ÖZKAN

Yrd. Doç. Dr. Fatih KARPAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2013
Her Hakkı Saklıdır

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2.GENEL BİLGİLER.....	2
2.1.Sönümlleme Elemanları.....	2
2.2.Endüstriyel Darbe Emicilerin Gelişimi.....	3
2.3.Endüstriyel Darbe Emici Üreticileri.....	3
2.4.Endüstriyel Darbe Emici Çeşitleri.....	4
2.5.Endüstriyel Darbe Emici Kullanım Yeri ve Önemi.....	5
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	8
3.1.Materyal.....	8
3.1.2.Endüstriyel darbe emici iç yapısı ve çalışma şekli.....	8
3.2.Yöntem.....	11
3.2.1.Endüstriyel darbe emici kapasitesinin belirlenmesi.....	11
3.2.2.Endüstriyel darbe emici enerji kapasitesinin ölçülmesi.....	13
3.2.3.Akışkan seçimi.....	15
3.2.4.Toplam akış kanal kesiti hesabı.....	16
3.2.5.Basınç tüpü tasarımı.....	16
3.2.5.1.Bernoulli denklemi.....	19
3.2.5.2.Süreklilik denklemi.....	20
3.2.5.3.Denklem çözümleri.....	21
3.2.5.4.Sönümlleme süresi.....	28
3.2.6.Akış kanalları arasındaki mesafe değişiminin akış hızına etkisinin gözlenmesi.....	29
3.2.6.1. Süreklilik denklemi.....	30
3.2.6.2. Bernoulli denklemi.....	30
3.2.6.3 Denklem çözümleri.....	31
3.2.6.4.Sönümlleme süresi.....	32
3.2.7.Akış kanal sayısının akış hızına etkisinin gözlenmesi.....	33
3.2.7.1.Süreklilik denklemi.....	34
3.2.7.2.Bernoulli denklemi.....	34
3.2.7.3 Denklem çözümleri.....	36
3.2.7.4.Sönümlleme süresi.....	38
3.2.8.Akış kanal kesiti değişiminin akış hızına etkisinin gözlenmesi.....	38
3.2.8.1.Süreklilik denklemi.....	41
3.2.8.2.Akış kanalları için genel Bernoulli denklemi.....	41
3.2.8.3 Denklem çözümleri.....	43
3.2.8.4.Sönümlleme süresi.....	45
4.BULGULAR ve TARTIŞMA.....	46
4.1.Tasarımların Karşılaştırılması.....	46

5. HAD ANALİZİ ile BASINÇ DAĞILIMININ İNCELENMESİ	50
5.1.Nihai Tasarım.....	50
5.2.Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Nihai Tasarımın Analizi.....	53
5.2.1.Problemin tanımlanması.....	54
5.2.2.Modelleme.....	55
5.2.3.Mesh.....	57
5.2.4.FLUENT ile HAD analizi.....	60
5.2.5.Analiz sonuçları.....	65
6. SONUÇ.....	69
KAYNAKLAR.....	71
EKLER.....	73
EK 1.....	73
EK 2.....	74
EK 3.....	75
EK 4.....	76
EK 5.....	77
EK 6.....	78
EK 7.....	79
EK 8.....	80
EK 9.....	81
EK 10.....	82
EK 11.....	83
EK 12.....	84
ÖZGEÇMİŞ.....	85

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ENDÜSTRİYEL DAMPERDE BASINÇ TÜPÜ AKIŞ KANALI TASARIMI ve OPTİMİZASYONU

Emel ÖZKAN

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Fatih KARPAT

Endüstriyel damper, hareket eden cisimlerin bir yere çarparak durdurulmasıyla ortaya çıkan enerjiyi absorbe ederek tahrip edici darbeleri ve titreşimi önleyen, özellikle endüstriyel uygulamalarda hareket kontrolü sağlayan, kompakt yapıya sahip bir makine parçasıdır. Kullanım yeri dolayısıyla endüstriyel damper olarak adlandırılan bu elemanlar, titreşimleri ve darbeleri önleyerek makine hasarlarının, gürültüsünün ve bakım maliyetlerinin düşürülmesini sağlar.

Bu tez çalışması kapsamında endüstriyel damperin çalışma prensibi ve diğer titreşim sönümleme elemanları arasındaki fark açıklanmıştır.

Endüstriyel damperde sönümleme, basınç tüpü içerisindeki hidrolik yağın akış kanallarından geçmesi ile gerçekleşir. Başlangıç olarak, minimum akış kanal kesitine sahip ve sabit enerji yutma kapasiteli bir basınç tüpü tasarlanmıştır. Başlangıç tasarımı referans alınarak, bazı parametrelerin (*akış kanalları arasındaki mesafe, akış kanal sayısı ve akış kanal kesiti*) sönümleme süresine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda nihai tasarım oluşturulmuş ve bu tasarım üzerinde CFD analiz (FLUENT) ile basınç dağılımı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Endüstriyel damper, darbe emici, sönümleme, basınç tüpü

2013, viii + 85 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DESIGN And OPTIMIZATION Of PRESSURE TUBE FLOW CHANNEL in
INDUSTRIAL DAMPERS

Emel ÖZKAN

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Fatih KARPAT

Industrial dampers are compact designed machine parts that are used as a motion control equipment particularly in industrial applications and reduce destructive impulses and vibration impacts of moving objects by absorbing their kinetic energy. Due to their place of use, these elements are referred to as industrial dampers and prevent vibrations and impacts of moving loads thereby reduce the noise and maintenance costs.

In this thesis, the working principle of industrial dampers and the differences between them and other vibration damping elements are described.

Dampening in industrial damper is provided by hydraulic oil flowing through the channel on the pressure tube. To start with, a pressure tube having a constant capacity of energy absorption and minimum cross-section of flow channels was designed. Taking the starting design as reference, the effect of some parameters (*The distance between flow channels, number of flow channels and flow channel cross-section*) upon the duration of damping was examined. As a result of the studies carried out, the final design was created and the flow behavior was observed with CFD analysis (FLUENT).

Key words: Industrial damper, shock absorber, dampening, pressure tube

2013, viii + 85 pages.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada endüstriyel uygulamalarda kullanılan damperlerin iç yapısı incelenmiş ve basınç tüpü üzerindeki akış kanalları için optimum tasarım yöntemi ortaya koyulmuştur.

Çalışma kapsamında beni yönlendiren ve böyle bir tezin ortaya çıkmasını sağlayan değerli danışmanlarım Yard. Doç. Dr. Fatih KARPAT ve Doç. Dr. Kadir ÇAVDAR'a, akışkanlar mekaniği hesap ve analiz yöntemlerinde yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ ve Makine Yüksek Mühendisi Mehmet TEKE'ye, Endüstriyel damperlerin sanayide kullanım alanları ve çalışma prensibi hakkında tecrübelerini paylaşan Makine Yüksek Mühendisi Sabahattin ÖZKAN'a, değerli katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
ρ	Hidrolik yağ yoğunluğu
μ	Hidrolik yağ dinamik viskozitesi
ν	Hidrolik yağ kinematik viskozitesi
k	Hidrolik yağ ısı iletkenliği
C_p	Hidrolik yağ ısı kapasitesi
σ_s	Hidrolik yağ yüzey gerilimi
k_A	Hidrolik yağ hava yutma katsayısı
s	Endüstriyel darbe emici stroku
h	Kütle düşme yüksekliği
ϵ	Yüzey pürüzlülük değeri
C_D	Boşaltma katsayısı
P	Basınç
ΔP_K	Basınç kaybı
E	Toplam enerji [J]
E_p	Potansiyel enerji
E_K	Kinetik enerji
C_f	Sürtünme katsayısı
Re	Reynold sayısı
u	Hız
Kısaltmalar	Açıklama
CFD	Computational fluid dynamics
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
EPDM	Ethylene propylene diene monomer (M-class) rubber (Etilen propilen dien monomer (M- Sınıfı) kauçuk)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Sönümlenme elemanları Kuvvet-Strok eğrileri karşılaştırılması	2
Şekil 2.2. Endüstriyel darbe emici üreticileri	4
Şekil 2.3. Endüstriyel darbe emicilerde akış kanal çeşitleri	5
Şekil 2.4. Endüstriyel darbe emici kullanılan makineler	6
Şekil 2.5. Düşey uygulamada yay ve darbe emici arasındaki fark (ACE Controls Inc.)	7
Şekil 2.6. Yatay uygulamada yay ve darbe emici arasındaki fark (ACE Controls Inc.)	7
Şekil 3.1. Çeşitli boyutlardaki endüstriyel darbe emiciler (ITT, ENIDINE Inc.)	9
Şekil 3.2. Endüstriyel darbe emici iç yapısı (ACE Controls Inc.,2013 Katalogundan değiştirilerek alınmıştır.)	10
Şekil 3.3. Endüstriyel darbe emicinin enerji kapasite tayini için düşme uygulaması	12
Şekil 3.4. Düşme Test Cihazı (Zhang ve ark. 2008'den değiştirilerek alınmıştır)	14
Şekil 3.5. Endüstriyel darbe emicide yutulan enerji	14
Şekil 3.6. Basınç tüpü tasarımı	17
Şekil 3.7. Piston hareketi ile basınç tüpü üzerindeki 1. akış kanalının kapanması	18
Şekil 3.8. Basınç tüpü tasarımı-1	20
Şekil 3.9. Moody diyagramı (http://www.dur.ac.uk/g.l.ingram/download/moody.png değiştirilerek alınmıştır.)	23
Şekil 3.10. İterasyon tablosu-1	27
Şekil 3.11. İterasyon tablosu 1-a	28
Şekil 3.12. Basınç tüpü tasarımı-2	29
Şekil 3.13. İterasyon tablosu-2	32
Şekil 3.14. Basınç tüpü tasarımı-3	33
Şekil 3.15. İterasyon tablosu-3	37
Şekil 3.16. İterasyon tablosu-3a	37

Şekil 3.17. Basınç tüpü tasarımı-4	40
Şekil 3.18. İterasyon tablosu-4	44
Şekil 3.19. İterasyon tablosu-4a	44
Şekil 5.1. Tasarımın kesit ve genel görünümü	50
Şekil 5.2. Eksenel akış kanalı uygulaması	52
Şekil 5.3. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği özet şeması	53
Şekil 5.4. Profil dosyası (Piston hızı – Zaman)	54
Şekil 5.5. Geometrinin Design Modelera aktarılması	55
Şekil 5.6. Geometrinin parçalara ayrılması (A- cilindir, B- 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 Numaralı akış kanalları, C- Transfer kanalı)	56
Şekil 5.7. Hareketli (cilindir) ve hareketsiz (transfer ve 1...10 numaralı kanallar) akış hacminin oluşturulması	57
Şekil 5.8. Sweep Method	57
Şekil 5.9. Sınır tabaka ve örtüşen nodların görünümü	58
Şekil 5.10. <i>Name Selection-1</i>	58
Şekil 5.11. <i>Name Selection-2</i>	59
Şekil 5.12. <i>Name Selection-3</i>	59
Şekil 5.13. Mesh dosyalarının ayrı ayrı kaydedilmesi	60
Şekil 5.14. Fluent açılış ekranı	60
Şekil 5.15. Çözüm ayarları ve mesh kontrolü	61
Şekil 5.16. Akış modeli seçimi	61
Şekil 5.17. Akışkanın tanımlanması	62
Şekil 5.18. Profil dosyasının FLUENT’te görünümü	62
Şekil 5.19. Mesh Interface	63
Şekil 5.20. Dinamik Mesh	63
Şekil 5.21. Dinamik Mesh-2	64
Şekil 5.22. Çözüm ayarları ve çözüm dosyaların kaydedilmesi	64

Şekil 5.23. Pistonun ilk hareketi esnasında oluşan basınç	65
Şekil 5.24. 1.Akış kanalı kapandığında oluşan basınç	66
Şekil 5.25. 2.Akış kanalı kapandığında oluşan basınç	67
Şekil 5.26. 3.Akış kanalı kapanırken oluşan basınç	67
Şekil 5.27. 7.Akış kanalı kapandığında oluşan basınç	68
Şekil 5.28. 8.Akış kanalı kapandığında oluşan basınç	68
Şekil 6.1. Deney sonucu ile ideal eğrinin karşılaştırılması	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Mineral bazlı hidrolik yağ temsili özellikleri (Dixon, 1996)	15
Çizelge 3.2. Sürtünme katsayıları başlangıç değerleri	24
Çizelge 3.3. Çözümü yapılan denklemler	27
Çizelge 3.4. Akış hızı karşılaştırma tablosu-1	32
Çizelge 3.5. Bernoulli ve süreklilik denklemlerinde kullanılan yeni değerler	34
Çizelge 3.6. Sürtünme katsayıları başlangıç değerleri-2	36
Çizelge 3.7. Akış hızı karşılaştırma tablosu-2	38
Çizelge 3.8. Bernoulli ve süreklilik denklemlerinde kullanılan yeni değerler-2	40
Çizelge 3.9. Sürtünme katsayıları başlangıç değerleri-3	43
Çizelge 4.1. Tasarımların karşılaştırılması-1	46
Çizelge 4.2. Tasarımların karşılaştırılması-2	46
Çizelge 4.3. Tasarımların karşılaştırılması-3	47
Çizelge 4.4. Hız grafiği-1	48
Çizelge 4.5. Hız grafiği-2	48
Çizelge 4.6. Hız grafiği-3	49
Çizelge 4.7. Hız grafiği-4	49
Çizelge 5.1. Parça indeksi	51

1. GİRİŞ

Araçlarda, makinalarda, titreşimli çalışan mekanizmalarda, yaylar ile birlikte kullanılan damperler, yayların gereksiz salınım hareketlerini önleyen ve oluşan titreşimleri en aza indirgeyen sönümleyici elemanlardır. Genellikle endüstriyel darbe emici olarak adlandırılan endüstriyel damperler de hareket eden cisimlerin taşıdıkları kinetik enerjiyi yutarak durmalarını sağlarlar.

Endüstriyel damperlerin klasik damperlerden farkı, lineer bir direnç kuvveti ile yükleri daha yavaş ve yumuşak bir şekilde durdurmalarıdır.

İmalat süreçlerinde ortaya çıkan düzlemsel aktarmalar, döner indeks hareketleri, hızlı beslemeler gibi hareketler sonucu hareketli cisimler kinetik enerji ile yüklenir. Kinetik enerji yüklü cisimler bir yere çarparak durdurulduğunda, sahip olduğu enerjiyi çarptıkları aksamın üzerine aktarır. Bu aktarmalar esnasında makinenin çalışan parçaları içerisinde oluşan tahrip edici darbeler makine hasarlarına, çalışma gürültüsüne ve üretimde verimsizliğe neden olur.

Bu tez çalışması kapsamında:

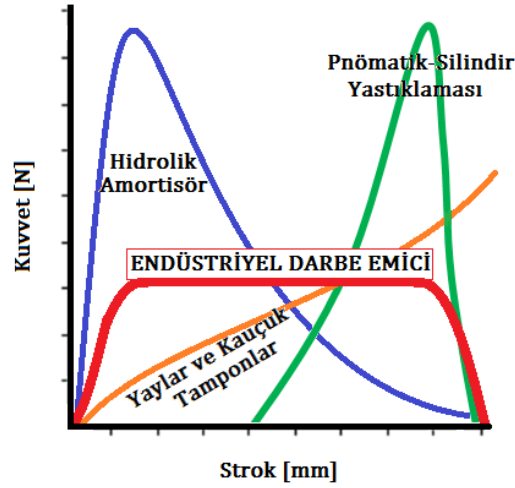
Endüstriyel *darbe emici*¹ içerisinde yer alan basınç tüpü üzerindeki akış kanalları tasarlanmış, Bernoulli Denklemi ile sönümleme hızı hesaplanmıştır. Oluşturulan nihai tasarım üzerinde CFD analiz (FLUENT) yapılarak basınç tüpü, akış kanalları ve transfer kanalında oluşan basınç dağılımı incelenmiştir.

¹ Literatürde kullanılan "*Shock-Absorber*" kelimesinin Türkçe karşılığıdır. Damper; darbeleri karşılayan sönümleme elemanı anlamına gelse de dilimize İngilizceden geçtiği ve farklı uygulamalarla karıştırıldığı için tez yazımı içerisinde *Darbe Emici* olarak kullanılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Sönümlenme Elemanları

Hareket eden cisimlerin taşıdıkları kinetik enerjiyi yutarak durmalarını sağlayan elemanlara örnek olarak, kauçuk tamponlar, yaylar, pnömatik silindir yastıklar ve hidrolik amortisörler gösterilebilir. Endüstriyel damperler özel bir sönümlenme elemanı çeşididir. Klasik darbe emiciler lineer bir sönümlenme sağlayamadıklarından bazı uygulamalarda endüstriyel damperlere ihtiyaç duyulmaktadır. Sönümlenme elemanlarının izafi kuvvet-strok eğrisi Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Sönümlenme elemanları Kuvvet-Strok eğrileri karşılaştırılması

- a. **Hidrolik amortisör:** Hareketli yük, strok başında aniden yavaşlatılır. Frenleme kuvveti strok başında oldukça yükselerek pik yapar. Bu da ilk darbe anında şoklara neden olur. Ardından kuvvet hızla düşer.
- b. **Yaylar ve kauçuk tamponlar:** Kuvvet karşısında sıkışır, strok sonunda yüksek durdurma kuvveti ortaya çıkartırlar. Gelen enerjiyi yutmak yerine yükün geri tepmesine neden olurlar.
- c. **Havali tamponlar, pnömatik silindir yastıklar:** Havanın sıkışabilme özelliğinden dolayı strok sonunda kuvvet karakteristiği keskin şekilde yükselir. Enerjinin büyük bölümü strok sonunda emilir.
- d. **Endüstriyel darbe emiciler:** Hareketli yük yumuşak ve yavaş biçimde strok boyunca bir direnç kuvveti ile durdurulur. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi lineer bir

yavaşlatma kuvvet-strok sayesinde hasar verici kuvvet pikleri önlenir. Böylece makineler ve iç ekipmanlarında oluşan şok ve hasarlar azaltılır.

2.2. Endüstriyel Darbe Emicilerin Gelişimi

Hareketli cisimleri bir tepki kuvveti ile durdurarak kinetik enerjilerini yutan, sönümleme elemanına *Darbe Emici* denir.

- Frederick O. Kilgore,1907 tarafından alınan US 889,619 numaralı patent ile darbe emicilerin temelleri atılmış, günümüzdeki tasarımların gelişmesine katkı sağlanmıştır.
- Dwight F. Kilgour, 1909 ise US 984,377 numaralı patenti ile darbe emicilerde değişken akış kanal kesitlerine bağlı olarak sönümlemenin lineerleştirilebileceğini göstermiştir.
- George Cawley, 1955 bir basınç bölmesi üzerinde kurs boyunca açılan sabit akış kanalları ile ilgili tasarımıyla (US 2,846,029) patentini almıştır.
- Horold W. Scholin, akış kanal kesitlerini bir ayar mekanizması ile değiştirerek ayarlı darbe emici tasarımının 1967 yılında (US 3,510,117) patentini almıştır.
- Zimmer Herbert'in, 1993 yılında, basınç tüpü üzerine delinen akış kanalları yerine yüzeye açılan heliks kanal tasarımıyla (EP 0 630 448) patent almıştır.
- Harold D. Wiard, 1996 yılında almış olduğu US 5,566,794 numaralı patentte, sabit akış kanalına sahip darbe emicilerdeki akış kanal kesitlerin, kuvvet değişimine etkisi gösterilmiştir.

Tüm bu gelişmeler sonucunda günümüzde, hassas çalışma ve konumlamamanın gerektiği durumlarda sönümleme ihtiyacını karşılamak için daha kompakt, hafif, güvenli, lineere yakın sönümleme eğrisine sahip endüstriyel darbe emiciler üretilmektedir.

2.3. Endüstriyel Darbe Emici Üreticileri

Endüstriyel darbe emici üretimi yapan firmalara ITT ENIDINE Inc., Weforma Dämpfungstechnik GmbH, ZIMMER GmbH ve ACE Controls Inc. örnek gösterilebilir (Şekil 2.2). Tasarım ve imalat yöntemi olarak hidrolik amortisörlere göre daha zor bir uygulama olan endüstriyel darbe emicilerin üretimi henüz ülkemizde yapılmamaktadır.



Şekil 2.2. Endüstriyel darbe emici üreticileri

2.4. Endüstriyel Darbe Emici Çeşitleri

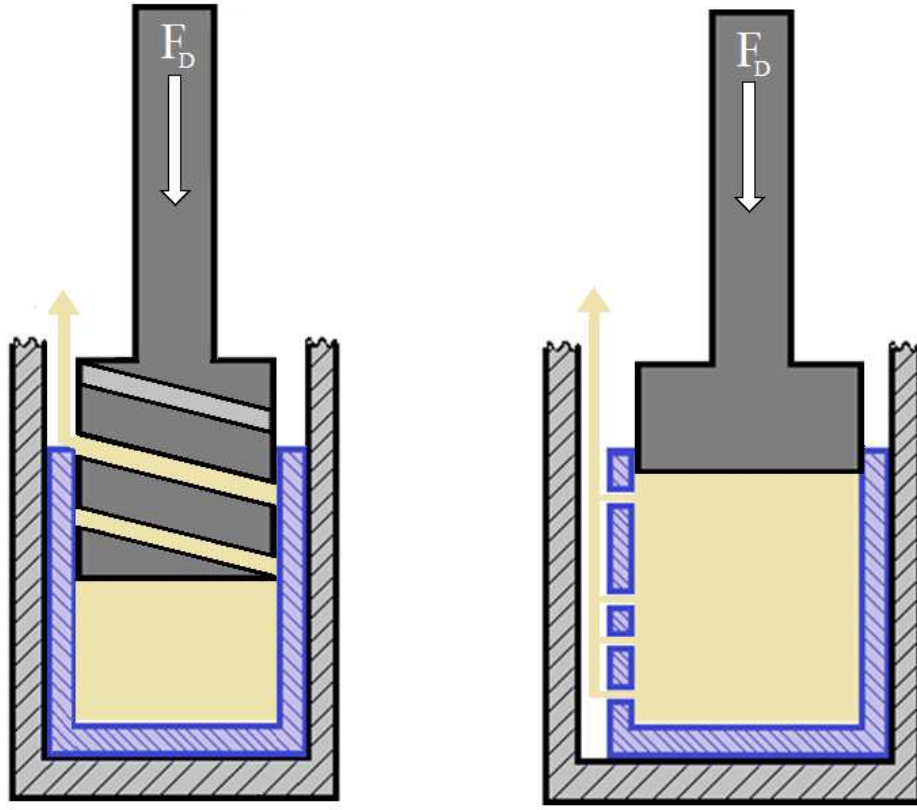
Endüstriyel darbe emiciler ayarlı ve ayarsız olarak iki tiptedir.

Ayarlı darbe emiciler bir ayar mekanizmasına sahip olup, ayar parçasının çevrilmesiyle akış kanalları kesiti azaltılıp arttırılabilir (bkz. Şekil 3.2). Bu sayede darbe emicinin dizaynına bağlı olarak enerji yutma kapasitesi belli sınırlar içerisinde değiştirilebilir.

Ayarsız darbe emicilerde akış kanal kesitleri sabit olduğundan enerji yutma kapasiteleri sınırlıdır (Harold ve ark. , 1996).

Endüstriyel darbe emiciler enerji yutma kapasitesine göre boyutsal farklılıklar göstermektedir. Üretici kataloglarına göre, çevrim başına 0.68J'den 44.000J'e enerji yutma kapasitesine sahip darbe emiciler bulunmaktadır (ACE Inc. Capacity Chart, Main Catalogue,1/2013).

Endüstriyel darbe emicilerde akışkan, helisel veya akış kanallarından geçirilerek sönümlenme gerçekleşir (Şekil 2.3). Helisel kanal piston üzerine açıldığından darbe emici stroku uzundur. Delikli akış kanalları ise basınç tüpü üzerine açılır ve daha kısa kursta sönümlenme gerçekleşir.



Şekil 2.3. Endüstriyel darbe emicilerde akış kanal çeşitleri

2.5. Endüstriyel Darbe Emici Kullanım Yeri ve Önemi

Hemen hemen tüm imalat süreçlerinde hareket eden nesnelere söz konusudur. Hareketli nesnenin hareketinin yön değiştirmesi ya da durdurulması esnasında sahip oldukları kinetik enerjiyi çarptıkları mekanizmaya aktarırken tahrip edici güçlere neden olurlar. Lineer kızaklı sistemlerde, bantlı transportörlerde, özel test cihazlarında ve çeşitli makinelerde kullanılan endüstriyel darbe emiciler sayesinde darbelerden kaynaklanan hasarın önüne geçilerek bakım maliyetleri azaltılır (Şekil 2.4).

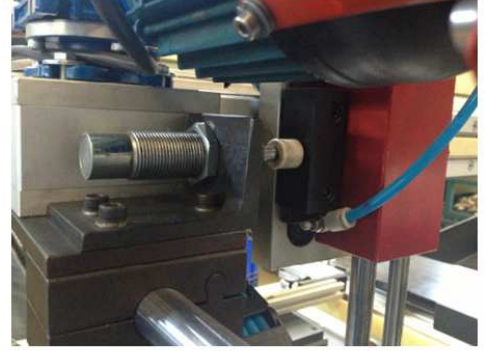
Endüstriyel darbe emicilerin kullanım yerine montaj pozisyonu yükü karşılayacak şekilde yatay, düşey veya açılı olabilir. Önemli olan yükün mil veya tampon üzerine dik olarak çarpmasıdır. Mile gelen yan kuvvetler milin eğilmesine, eksen kaçıklıklarına neden olur. Bu durumda keçelerden yağ sızar ve darbe emici işlevini yitirir.

Endüstriyel darbe emiciler endüstride kullanımının dışında emniyet tedbiri olarak trenlerde, krenlerde, asansörlerde, depreme karşı yapıların ve binaların temellerinde, büyük halatlı köprülerde de kullanılmakta ancak emniyet ön planda olduğundan iç yapıları ve imalat yöntemleri endüstriyel darbe emicilere göre farklılık göstermektedir.

a- Drop Weight Test Cihazı



b- Parça Taşıma Makinesi



c- Otomatik Parça Besleme Makinesi



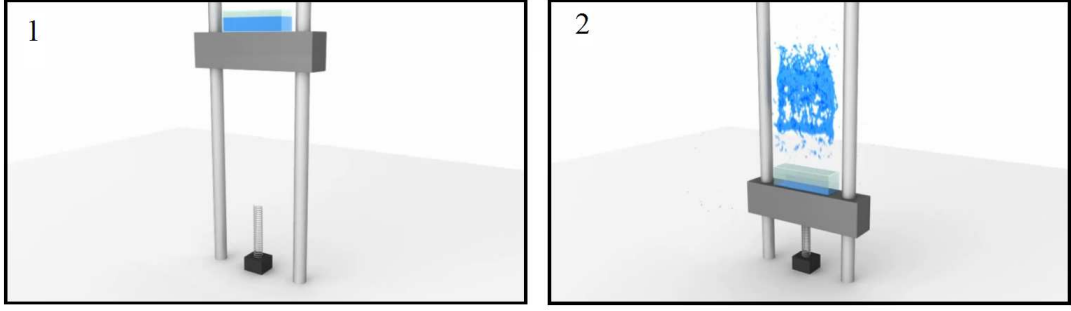
Şekil 2.4. Endüstriyel darbe emici kullanılan makineler

Aşağıda verilen iki örnekte aynı uygulamada yay veya endüstriyel darbe emici kullanılması halinde ortaya çıkan durum özetlenmiştir.

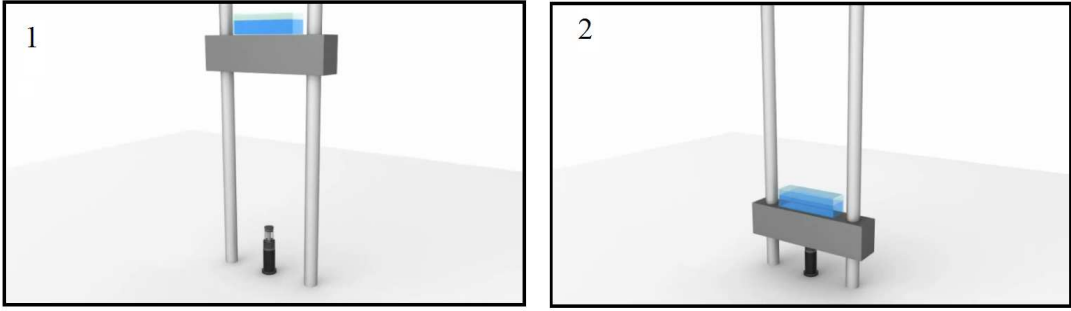
Örnek:

- İki silindir ile yataklanmış içi su dolu bir kap yukarıdan yay üzerine bırakıldığında çarpma anında suyun taşıdığı gözlenir. Yay sıkıştıktan sonra geri teperek yük durana kadar salınım hareketi yapar. Aynı uygulamada endüstriyel darbe emici kullanıldığında ise su kap dışına bir damla bile taşmaz ve yük geri tepmez (Şekil 2.5).
- Bant üzerinde ilerleyen paketlerin durdurulması için yay kullanıldığında paketler yayı sıkıştırır ve sıkışan yay paketi tekrar geri iter. Endüstriyel darbe emici kullanılması durumunda ise hassas bir konumlama sağlanarak, strok sonunda paket durdurulur (Şekil 2.6).

a- Yay

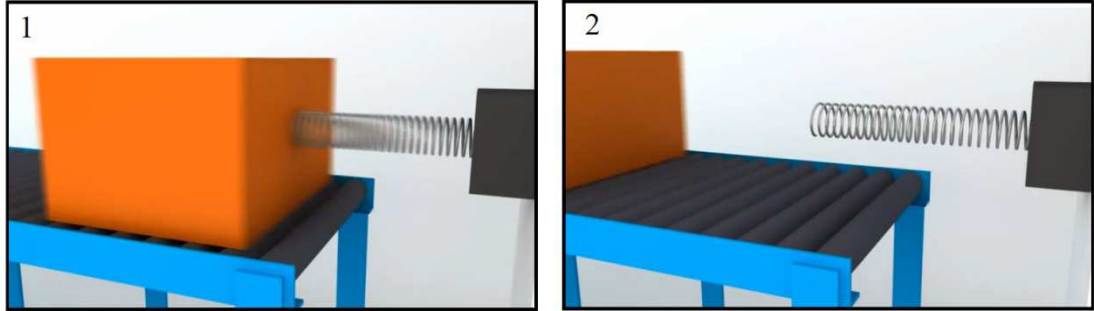


b- Endüstriyel Darbe Emici

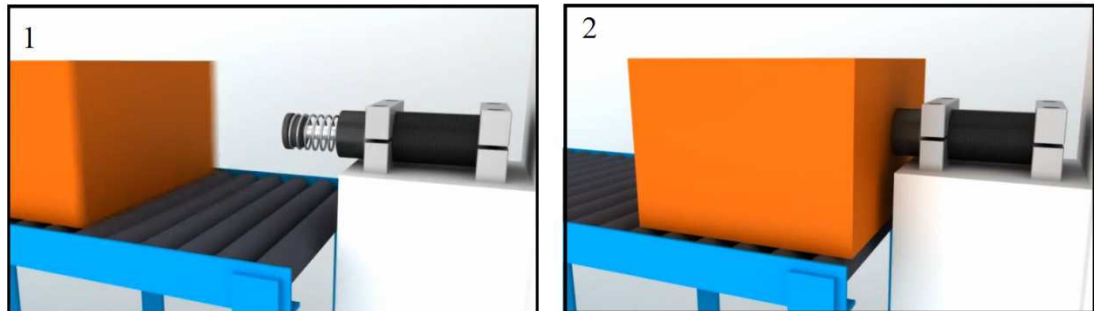


Şekil 2.5. Düşey uygulamada yay ve darbe emici arasındaki fark (ACE Controls Inc.)

a- Yay



b- Endüstriyel Darbe Emici



Şekil 2.6. Yatay uygulamada yay ve darbe emici arasındaki fark (ACE Controls Inc.)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Tez çalışması kapsamında ayarsız, silindirik delikli akış kanallarına sahip endüstriyel darbe emici incelenmiştir.

3.1.2 Endüstriyel darbe emici iç yapısı ve çalışma şekli

Darbe emiciyi oluşturan başlıca elemanlar, tampon, yay, mil, boğaz yatağı, genişleme balonu, piston, basınç tüpü ve gövde olarak sıralanabilir. Şekil 3.2’de ayarlanabilir (soldaki) ve ayarsız (sağdaki) darbe emicilerin iç yapısı gösterilmiştir. Darbe emici çalışma prensibi, piston ile sıkıştırılan hidrolik yağın akış kanalları içerisinden geçirilerek darbe enerjisinin yutulması şeklindedir. Kullanım yerlerine göre darbe emicilerin boyutları oldukça farklılık göstermektedir. Çeşitli endüstriyel darbe emici örnekleri Şekil 3.1’de verilmiştir.

Hareketli yük belirli bir çarpma hızı ile endüstriyel darbe emicinin tamponuna çarpar. İlk şok (çarpma) anında en yüksek direnç kuvveti ile yük karşılanır. Çarpmanın ardından mil basınç tüpü içerisine doğru itilir ve yay sıkışır. Mil ucuna sabitlenen piston üzerindeki deliklerde (veya tasarıma bağlı olarak tek bir delikte) tek yönlü çek valf bulunur. Piston ilerlerken karşı basınç dolayısıyla valf kapanır ve basınç tüpü içerisinde bulunan hidrolik yağ akış kanallarından geçmeye zorlanır. Çarpma anında akış kanallarının hepsinden yağ geçişi olurken, piston basınç tüpü içerisinde ilerledikçe akış kanallarını sırasıyla kapatarak lineer bir direnç kuvveti oluşturur. Strok - akış kanalı ilişkisi sayesinde endüstriyel darbe emiciler diğer sönümlenme elemanlarına göre lineer bir sönümlenme sağlarlar (bkz. Şekil 2 .1).

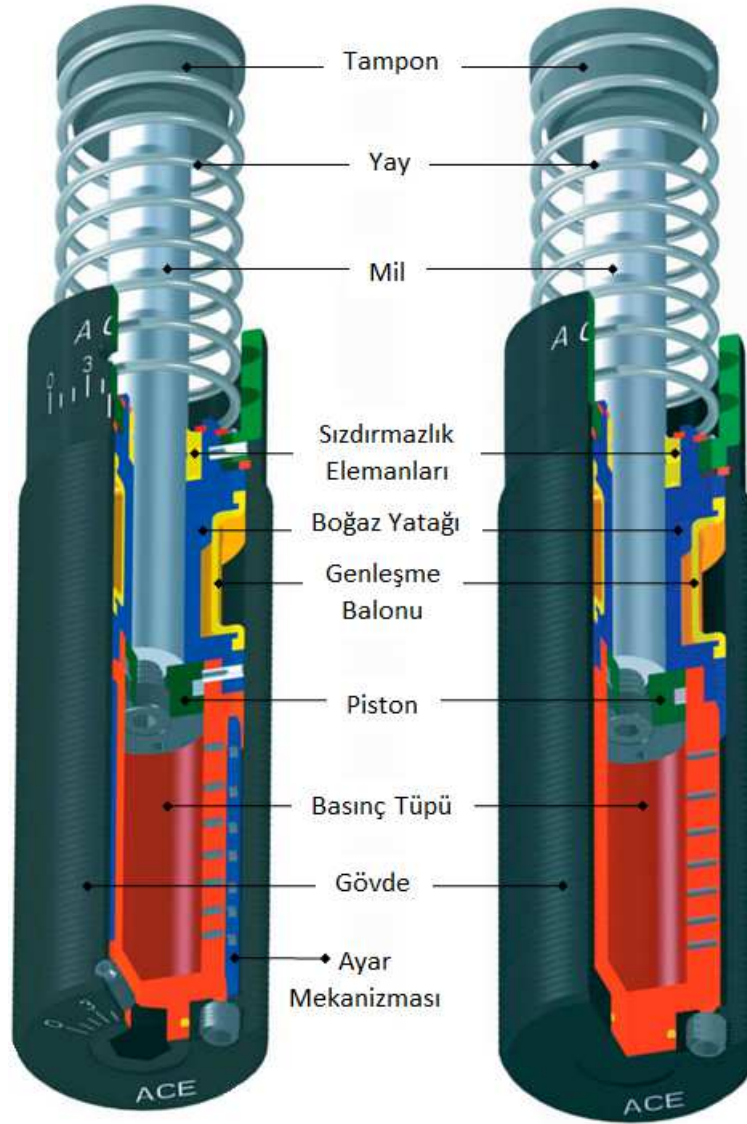


Şekil 3.1. Çeşitli boyutlardaki endüstriyel darbe emiciler (ITT, ENIDINE Inc.)

Darbe emiciler tek yönlü olarak çalışır. Mil ve piston basınç tüpü içerisindeki hareketini tamamladığında enerji sönmülmüş olur ve mili geri iterek sistemi başlangıç durumuna getirilmesini sağlamak amacı ile yay kullanılır. Hazneler arasında dengeli bir basınç dağılımının sağlanması ve negatif basıncın hidrolik yağ üzerindeki kavitasyon etkisinin azaltılması için kullanılan *EPDM*¹¹ genleşme balonu kullanılır.

Yay kullanılmayan endüstriyel darbe emicilerde geri dönüşü sağlamak için döner membran kullanılmaktadır. Döner membran sayesinde akış hazneleri arasında basınç dengesi daha kolay sağlanır ve darbe emici çalışma ömrü uzar.

¹¹ EPDM; ısıya ve asitlerin, alkollerin, oksitlenen kimyasalların kimyasal etkilerine karşı dirençli kauçuk sünger çeşididir. EPDM malzeme kapalı hücrelerden oluşmaktadır ve hücreler içerisindeki gaz boşlukları nedeniyle elastik bir yapıya sahiptir.



Şekil 3.2. Endüstriyel darbe emici iç yapısı (ACE Controls Inc.,2013 Katalogundan değiştirilerek alınmıştır.)

3.2. Yöntem

Tez çalışması kapsamında yaklaşık 1000 J enerji yutma kapasiteli bir endüstriyel darbe Emicinin genel tasarımı yapılmış ve sönümlenmenin gerçekleştiği basınç tüpü üzerinde durulmuştur.

- Akış kanalları arasındaki mesafe değişiminin akış hızı değişimine etkisi,
- Akış kanal kesiti sabit tutularak akış kanal sayısındaki değişimin akış hızı değişimine etkisi ve
- Akış kanal kesiti değiştirildiğinde akış hızı değişimi incelenmiştir.

3.2.1. Endüstriyel darbe emici enerji kapasitesinin belirlenmesi

Endüstriyel darbe emici tasarımı için öncelikle uygulama şekli ve bazı gerekli ölçüler belirlenmiştir.

Belirlenen uygulama 2 m yükseklikten serbest düşmeye bırakılan 50 kg'lık kütle darbe emiciye çarptıktan 100 mm sonra durdurulmasıdır (Şekil 3.3). Serbest düşmeye bırakılan bir cismin bir yere çarpmadan önceki son hızı enerjinin korunumu denklemi ile ifade edilir:

$$E_{Ph} = m \cdot g \cdot h \quad (3.1)$$

$$E_{Ps} = m \cdot g \cdot s \quad (3.2)$$

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 \quad (3.3)$$

3.1 ve 3.3 denklemi eşitlendiğinde;

$$m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2$$

kütlenin darbe emiciye çarptığı andaki hızı,

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (3.4)$$

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 2} = 6,26 \text{ m/s}$$

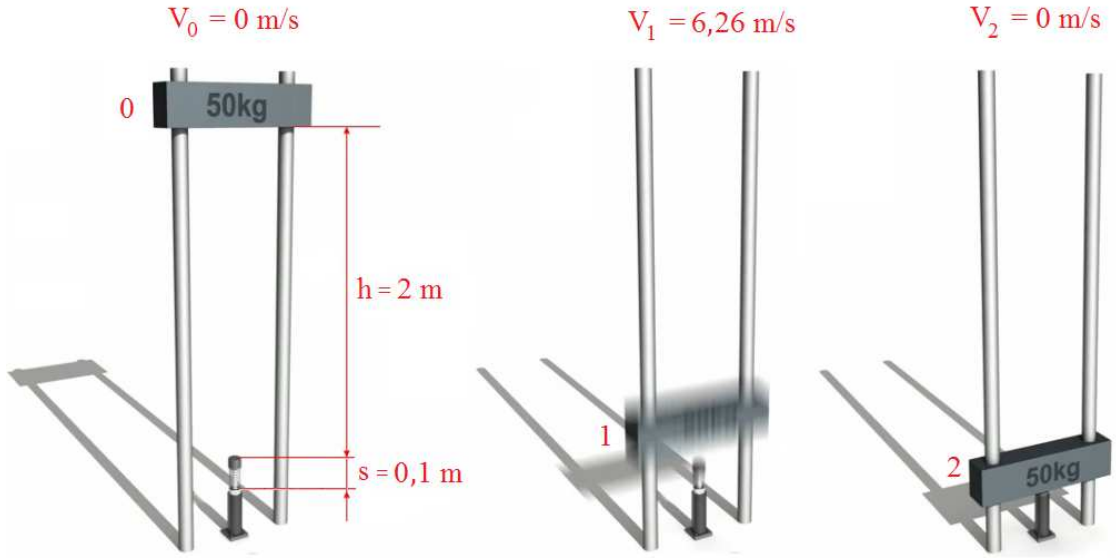
olarak elde edilir.

Darbe emicinin enerji yutma kapasitesi Denklem 3.1 ve 3.2' nin toplamından elde edilir:

$$E = E_{Ph} + E_{Ps} \quad (3.5)$$

$$E = m \cdot g \cdot (h + s) = 50 \cdot 9,81 \cdot (2 + 0.1)$$

$$E = 1030,05 \text{ J}$$



Şekil 3.3. Endüstriyel darbe emicinin enerji kapasite tayini için düşme uygulaması

Çarpışmalar, çarpışma sonrasındaki kinetik enerji kaybı olup olmadığına göre sınıflandırılırlar. Eğer, çarpışma sırasında kütle transferi olmaz ve ilk kinetik enerjinin tümü çarpışma sonrasında cisimlere aktarılarak korunursa bu tür çarpışmalara *esnek çarpışma* denir. Çarpışma sonunda kütlelerin birleştiği ve ortak bir hızla hareket ettiği duruma *esnek olmayan tam çarpışma* denir. Bu tür çarpışmalarda kinetik enerji kaybı maksimum olur.

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi serbest düşmeye bırakılan kütle ilk konumda sıfırdır. Strok değeri 100 mm olarak kabul edilmiştir. Çarpma anında hızı 6,26 m/s olan kütle 100 mm strok sonunda sıfırlanmaktadır.

Bir çarpışmada sadece momentumun korunumunu şartından tüm bilinmeyenler hesaplanamaz, örneğin ilk hızları bilinen cisimlerin çarpışmadan sonra son hızları bulunur. Çarpışmalarda her zaman enerjinin korunumundan da söz edilemez. Örneğin sürtünme söz konusu olduğunda sistemin enerjisinin tümü hareket enerjisine dönüşmez; aksine enerji harcanır. İki aracın çarpışması esnasında enerjinin büyük bir bölümü kaportanın deformasyonu sırasında kaybolur. Endüstriyel darbe emiciler de bir aracın kaportasına benzetilirse, kaportadan farklı olarak, çarpışma (darbe) esnasında hareketli yükün enerjisinin tamamen yuttukları ve sisteme hareket aktarılmasını önledikleri söylenebilir.

3.2.2. Endüstriyel darbe emici enerji kapasitesinin ölçülmesi

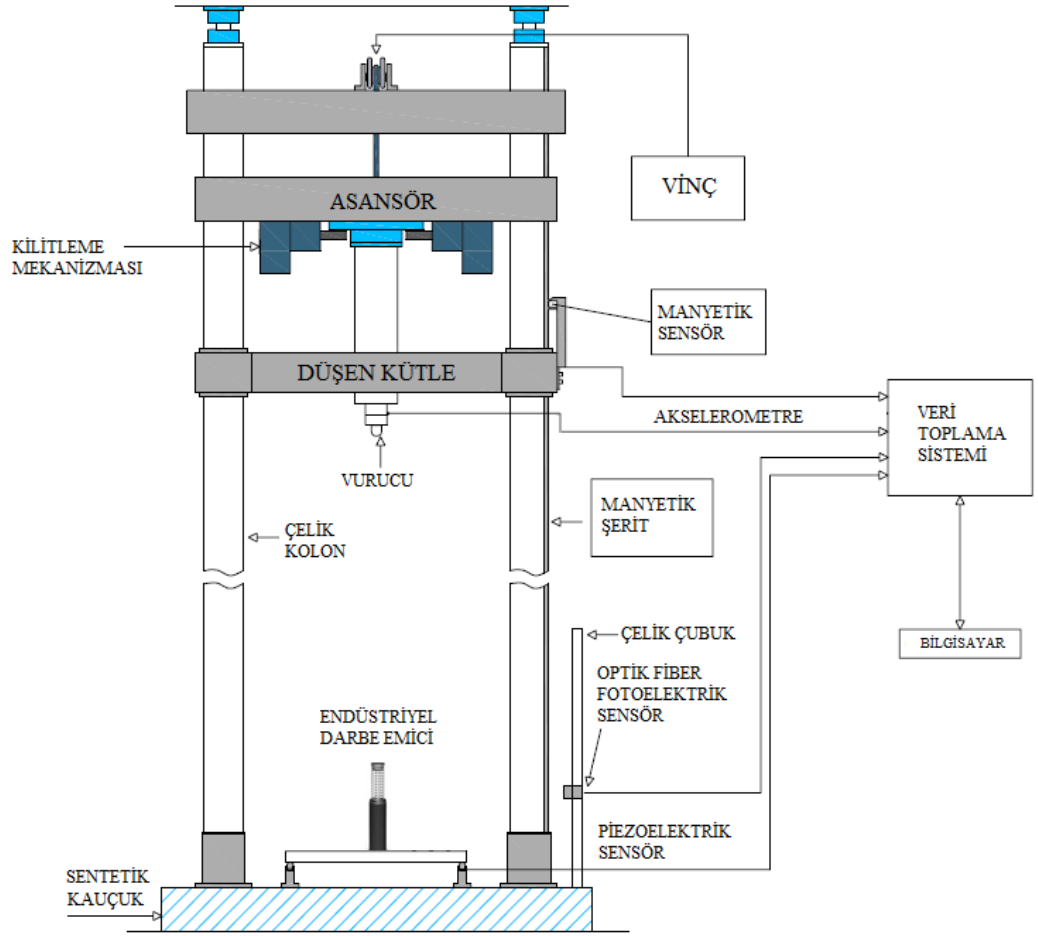
Endüstriyel darbe emicide absorbe edilen enerjiyi ölçmek için düşme testi uygulanır. Düşme test sistemi; veri toplama cihazı, sensörler, düşen kütle, kütleyi yukarıya kaldıran asansör ve destekleyici kolonlardan oluşur. Düşme darbe test sisteminin şematik görünümü Şekil 3.4'te verilmiştir.

Statik kuvvet ölçümünde genelde *Strain-Guage* (yük hücresi) kullanılırken yapılan çalışmalarda dinamik kuvvet (darbe) ölçümünde piezoelektrik kuvvet sensörü kullanımının uygun olduğu saptanmıştır (X. X. Zhang ve ark. 2008, Metz 2007).

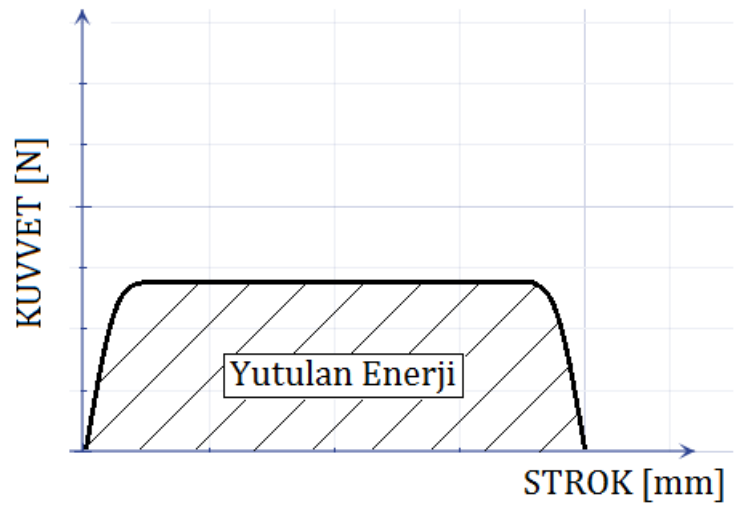
Düşme mesafesinin ölçümü için mesafe ölçüm sensörleri kullanılır.

Düşen kütlenin çarpma anındaki hızı ivme ölçer ve mesafe sensöründen gelen verilerin veri toplama cihazında işlenmesiyle elde edilir.

Sensörlerden alınan tüm sinyaller zamana bağlı olarak veri toplama cihazında işlenir ve bilgisayara aktarılır. Darbe testi sonucu elde edilen kuvvet strok eğrisi altında kalan alan endüstriyel darbe emicinin yuttuğu enerjiyi verir (Şekil 3.5).



Şekil 3.4. Düşme test cihazı (Zhang ve ark. 2008'den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 3.5. Endüstriyel darbe emicide yutulan enerji

3.2.3. Akışkan seçimi

Damperlerde genellikle hafif mineral yağlar bazen de sentetik yağlar kullanılır. Saf yağlar sıkıştırılabilirlikleri 0,05 %/MPa'dan az olduğu için sıkıştırılmaz kabul edilir. Ancak normal koşullardaki yağların molekülleri içerisinde az miktarda hava, gaz baloncukları bulunması nedeniyle bazı özel uygulamalarda yağların sıkışma özelliği, gazlarındaki kadar dikkate alınmalıdır. 'Sıkıştırılmaz akışkan' gerçekte 'uygulama şartları altında yoğunluğu neredeyse sabit' anlamına gelir (Dixon,1996).

Darbe emici içerisinde kullanılan hidrolik yağlar genellikle ortam şartlarına (sıcak, soğuk), çalışma koşullarına (devereye alınma sıklığı) ve çalışma yerine (gıda endüstrisi, denizcilik) göre seçilir. Enerji kapasitesi ve çalışma frekansı yüksek olan bazı endüstriyel darbe emicilerde otomatik şanzıman yağı kullanılırken, belirlenen enerji kapasitesinde mineral bazlı sentetik yağ yeterli performansı sağlayacaktır.

Çizelge 3.1. Mineral bazlı hidrolik yağ temsili özellikleri (Dixon, 1996)

1	15°C deki yoğunluk	ρ	≈ 860	kg/m ³
2	15°C deki viskozite	μ	≈ 40	mPa.s
3	Sıcaklık aralığı	T	$\approx -40 - +130$	°C
4	Basınç aralığı	P	$\approx 0 - 20$	MPa
5	Sıkıştırılabilirlik	$(d\rho/dP)/\rho$	$\approx 0,05$	%/MPa
6	Isı iletkenliği	k	$\approx 0,14$	W/m.K
7	Isı kapasitesi	C _p	$\approx 2,5$	kJ/kgK
8	Isıl genleşme	$(d\rho/dT)/\rho$	$\approx 0,1$	%/°C
9	Viskozite-sıcaklık duyarlılığı	$(d\mu/dT)\mu$	≈ -2	%/°C
10	Viskozite-basınç duyarlılığı	$(d\mu/dP)\mu$	$\approx +3$	%/MPa
11	Yüzey gerilimi	σ_s	≈ 25	mN/m
12	Hava yutma katsayısı	k _A	$\approx 1,0$	kg/m ³ MPa

3.2.4. Toplam akış kanal kesiti hesabı

Minimum toplam kesit alanı A_T , 5 parametreye bağlı olarak Bernoulli enerji denkleminde elde edilir (Denklem 3.6).

$$A_T = \frac{1}{C_D \cdot 12} \sqrt{\frac{A_P^3 \cdot \rho \cdot s}{m}} \quad (3.6)$$

1 – C_D : Boşaltma katsayısı darbe emicilerde teorik olarak 0,7 kabul edilir. (Segel&Lang, 1981)

2 – A_P : Piston kesit alanı , $1,25 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

3 – m : Düşen cismin kütlesi, 50 Kg

4 – ρ : Hidrolik yağ yoğunluğu, 860 Kg/m^3

5 – s : Sönümleme mesafesi (strok), 0,1 m

Yukarıda verilen 5 parametreye göre Denklem 4.1 çözüldüğünde toplam akış kanal kesit alanı A_T ;

$$A_T = \frac{1}{0.7 \cdot 12} \sqrt{\frac{(0.02^2 \pi)^3 \cdot 860 \cdot 0.1}{50}} = 6,95 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ olarak elde edilir.}$$

3.2.5. Basınç tüpü tasarımı

Basınç tüpü üzerine kuvveti dengelemek için strok boyunca çapı azalacak şekilde 5 adet akış kanalı belirlenmiştir.

$$A_T = \pi r_1^2 + \pi r_2^2 + \pi r_3^2 + \pi r_4^2 + \pi r_5^2$$

$$A_T = \pi(r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_4^2 + r_5^2) = 6,95 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_4^2 + r_5^2 = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Yarı çapların akış kanallarına göre dağılımı:

$$r_1 = 0,85 \text{ mm}$$

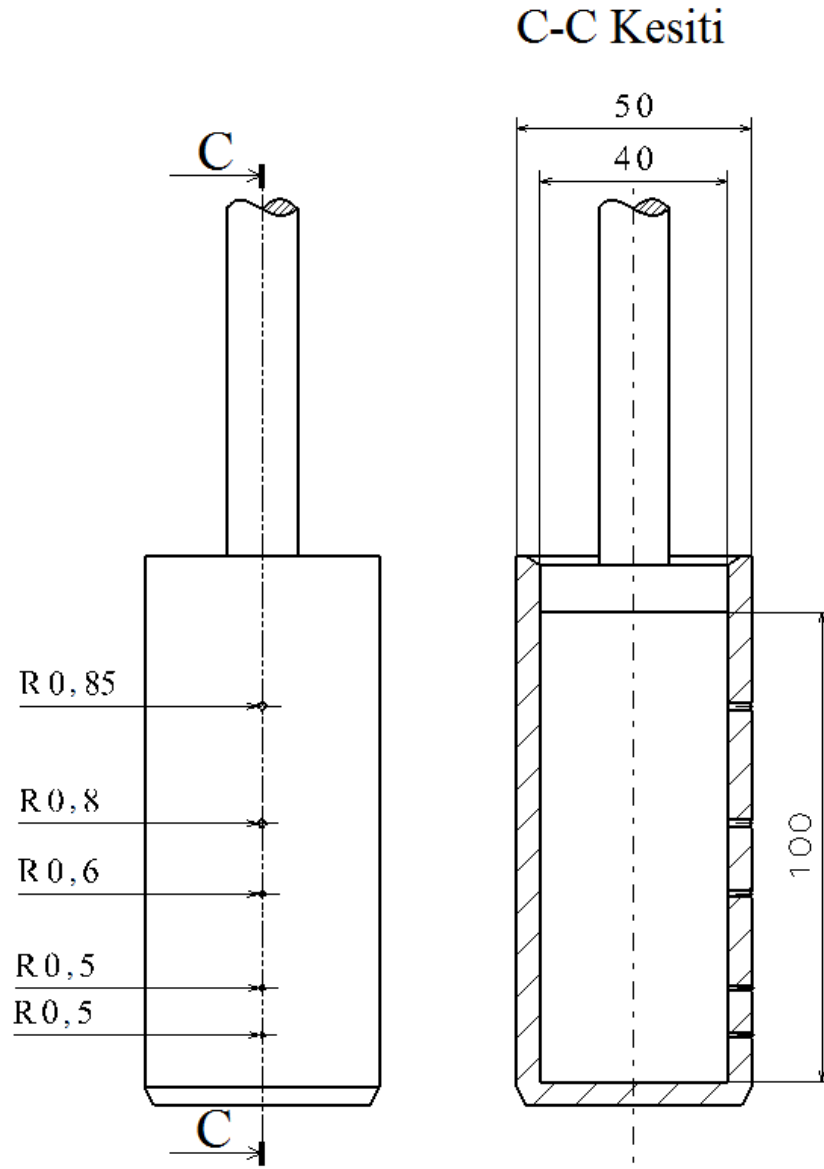
$$r_2 = 0,8 \text{ mm}$$

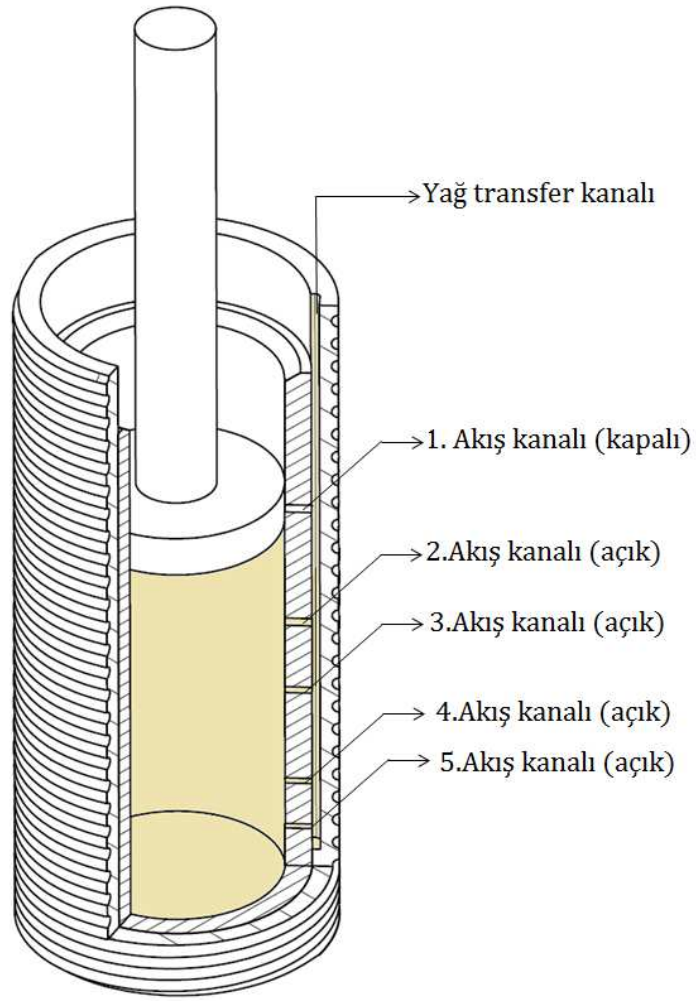
$$r_3 = 0,6 \text{ mm}$$

$$r_4 = 0,5 \text{ mm}$$

$$r_5 = 0,5 \text{ mm}$$

Basınç tüpü akış kanalı kesit çapları toplam kesit alanına göre hesaplanmış, 5 delik ve arasındaki mesafe dağılımı bilgisayar destekli tasarım aşamasında piston kalınlığına göre geometrik belirlenmiştir. Strok başlangıcında tüm akış deliklerinin açık olduğu Şekil 3.6'da görülmektedir. Pistona gelen ilk darbeden 20 mm sonra 1. akış kanalı piston yüzeyi tarafından kapatılır (Şekil 3.7). Pistonun hareketi ardından bir miktar akışkan transfer kanalından geçerek boğaz yatağı rezerv hacmine dolar. Akış kanallarının sırasıyla kapanması sonucunda strok boyunca akış kesit alanı azaldığından teoride lineere yakın bir sönümlenme gerçekleşir (bkz. Şekil 3.5).





Şekil 3.7. Piston hareketi ile basınç tüpü üzerindeki 1. akış kanalının kapanması

Akış kanalları arasındaki mesafeyi tasarım aşamasında belirlenirken geometrik ölçüler dikkate alınmıştır. Kanallar arasındaki mesafenin değişimi akış hızını dolayısıyla sönümleme hızını ve kuvvetini etkileyen bir parametre olduğundan optimum mesafe değerlerine yaklaşmak için bazı hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Akış kanallarından çıkan yağın hızı A-B noktaları arasında her bir akış kanalı için yazılan Bernoulli denklemleri ve süreklilik denklemi ile hesaplanmıştır.

3.2.5.1. Bernoulli denklemi

Piston yüzeyi ve basınç tüpü dış yüzeyi arasındaki genelleştirilmiş Bernoulli denklemi (Şekil 3.8):

$$P_A + \frac{1}{2}\rho u_A^2 + \rho g z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho u_{Bn}^2 - \rho g z_{Bn} + \Delta P_K, \quad n = 1,2,3,4,5 \quad (3.7)$$

Denklem 3.7’de verilen kayıplar ise ΔP_K şu şekilde ifade edilir:

$$\Delta P_K = (\Delta P_{LS} + \Delta P_{LK}) + (\Delta P_{KG} + \Delta P_{KÇ})$$

$$\Delta P_K = C_{f_A} \cdot \frac{L_A}{d_A} \cdot 2 \cdot \rho \cdot u_A^2 + C_{f_{Bn}} \cdot \frac{L_{Bn}}{d_{Bn}} \cdot 2 \cdot \rho \cdot u_{Bn}^2 + K_G \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_A^2 + K_Ç \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_{Bn}^2 \quad (3.8)$$

ΔP_{LS} : Basınç tüpü içerisindeki lokal kayıplar

ΔP_{LK} : Akış kanalı içerisindeki lokal kayıplar

ΔP_{KG} : Keskin giriş kayıpları, $\Delta P_{KÇ}$: Keskin çıkış kayıpları

Her bir akış kanalı için A-B noktaları arasında genelleştirilmiş Bernoulli denklemi (3.7):

$$P_A + \frac{1}{2}\rho u_A^2 + \rho g z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho u_{B1}^2 - \rho g z_{B1} + \Delta P_{K1} \quad (3.7a)$$

$$P_A + \frac{1}{2}\rho u_A^2 + \rho g z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho u_{B2}^2 - \rho g z_{B2} + \Delta P_{K2} \quad (3.7b)$$

$$P_A + \frac{1}{2}\rho u_A^2 + \rho g z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho u_{B3}^2 - \rho g z_{B3} + \Delta P_{K3} \quad (3.7c)$$

$$P_A + \frac{1}{2}\rho u_A^2 + \rho g z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho u_{B4}^2 - \rho g z_{B4} + \Delta P_{K4} \quad (3.7d)$$

$$P_A + \frac{1}{2}\rho u_A^2 + \rho g z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho u_{B5}^2 - \rho g z_{B5} + \Delta P_{K5} \quad (3.7e)$$

Her bir akış kanalı için kayıplar (3.8):

$$\Delta P_{K1} = C_{f_A} \cdot \frac{L_{A1}}{d_A} \cdot 2 \cdot \rho \cdot u_A^2 + C_{f_{B1}} \cdot \frac{L_{B1}}{d_{B1}} \cdot 2 \cdot \rho \cdot u_{B1}^2 + K_G \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_A^2 + K_Ç \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_{B1}^2 \quad (3.8a)$$

$$\Delta P_{K2} = C_{f_A} \cdot \frac{L_{A2}}{d_A} \cdot 2 \cdot \rho \cdot u_A^2 + C_{f_{B2}} \cdot \frac{L_{B2}}{d_{B2}} \cdot 2 \cdot \rho \cdot u_{B2}^2 + K_G \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_A^2 + K_Ç \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_{B2}^2 \quad (3.8b)$$

$$\Delta P_{K3} = C_{f_A} \cdot \frac{L_{A3}}{d_A} \cdot 2 \cdot \rho \cdot u_A^2 + C_{f_{B3}} \cdot \frac{L_{B3}}{d_{B3}} \cdot 2 \cdot \rho \cdot u_{B3}^2 + K_G \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_A^2 + K_Ç \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_{B3}^2 \quad (3.8c)$$

$$\Delta P_{K4} = C_{f_A} \cdot \frac{L_{A4}}{d_A} \cdot 2 \cdot \rho \cdot u_A^2 + C_{f_{B4}} \cdot \frac{L_{B4}}{d_{B4}} \cdot 2 \cdot \rho \cdot u_{B4}^2 + K_G \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_A^2 + K_Ç \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_{B4}^2 \quad (3.8d)$$

$$\Delta P_{K5} = C_{f_A} \cdot \frac{L_{A5}}{d_A} \cdot 2 \cdot \rho \cdot u_A^2 + C_{f_{B5}} \cdot \frac{L_{B5}}{d_{B5}} \cdot 2 \cdot \rho \cdot u_{B5}^2 + K_G \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_A^2 + K_Ç \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_{B5}^2 \quad (3.8e)$$

3.2.5.2. Süreklilik denklemi

Piston yüzeyi ve basınç tüpü dış yüzeyi arasındaki süreklilik denklemi (Şekil 3.8):

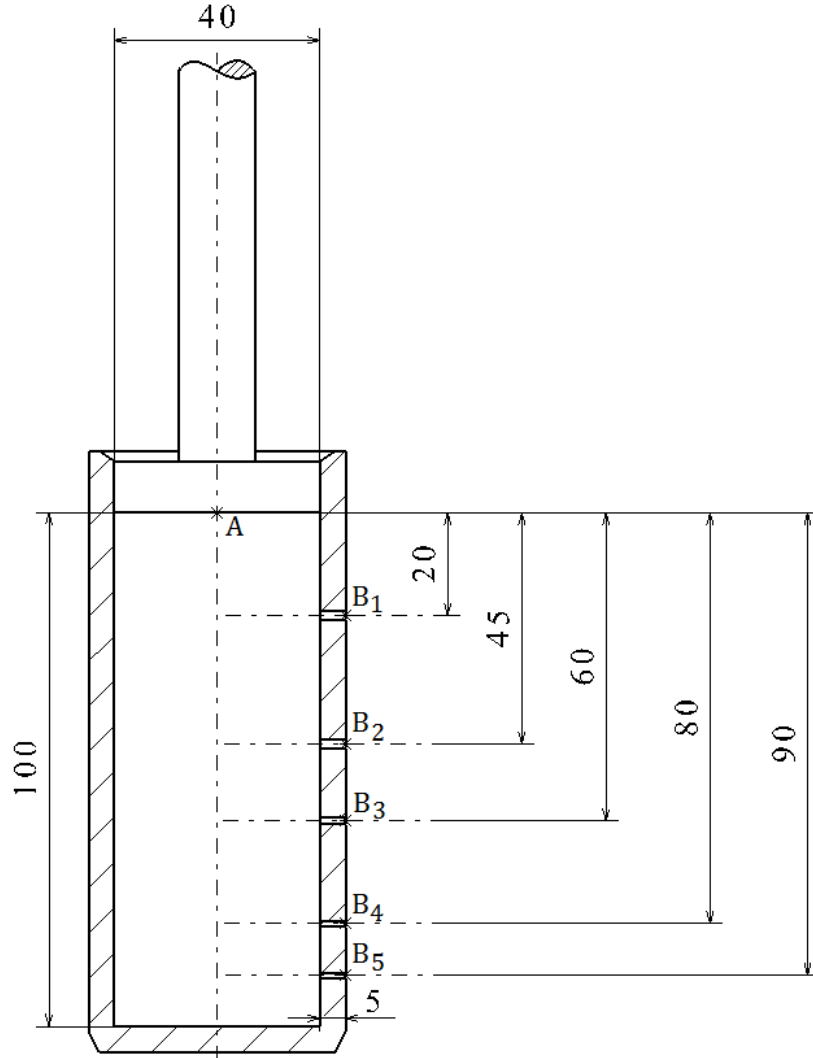
$$Q = A_P \cdot u_A = A_{B1} \cdot u_{B1} + A_{B2} \cdot u_{B2} + A_{B3} \cdot u_{B3} + A_{B4} \cdot u_{B4} + A_{B5} \cdot u_{B5} \quad (3.9)$$

$$\frac{\pi}{4} \cdot d_A^2 \cdot u_A = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{B1}^2 \cdot u_{B1} + d_{B2}^2 \cdot u_{B2} + d_{B3}^2 \cdot u_{B3} + d_{B4}^2 \cdot u_{B4} + d_{B5}^2 \cdot u_{B5})$$

$$\frac{\pi}{4} \cdot 0,04^2 \cdot u_A = \frac{\pi}{4} \cdot (1,7^2 \cdot u_{B1} + 1,6^2 \cdot u_{B2} + 1,2^2 \cdot u_{B3} + 1^2 \cdot u_{B4} + 1^2 \cdot u_{B5}) \cdot 10^{-6}$$

$$1,25 \cdot 10^{-3} \cdot u_A = (2,27 \cdot u_{B1} + 2,01 \cdot u_{B2} + 1,13 \cdot u_{B3} + 0,78 \cdot u_{B4} + 0,78 \cdot u_{B5}) \cdot 10^{-6}$$

$$u_A = (1,816 \cdot u_{B1} + 1,608 \cdot u_{B2} + 0,904 \cdot u_{B3} + 0,624 \cdot u_{B4} + 0,624 \cdot u_{B5}) \cdot 10^{-3}$$



Şekil 3.8. Basınç tüpü tasarımı-1

3.2.5.3. Denklem çözümleri

Akışkanın akış kanallarından çıkış hızını hesaplamak için her bir akış kanalı için yazılan Bernoulli denklemleri süreklilik denklemi ile ortak çözüm yapılmalıdır. Denklemlerde bilinmeyenler değerler; akış kanallarındaki hızlar ($u_{B1}, u_{B2}, u_{B3}, u_{B4}, u_{B5}$) ve sürtünme katsayılarıdır ($C_{f_{B1}}, C_{f_{B2}}, C_{f_{B3}}, C_{f_{B4}}, C_{f_{B5}}$).

Piston yüzeyi (A) ve akış kanalları (B1,B2,B3,B4,B5) arasındaki mesafe:

Başlangıç noktası A sıfır ($z_A = 0$) ve

$$z_{B1} = 20 \text{ mm}$$

$$z_{B2} = 45 \text{ mm}$$

$$z_{B3} = 60 \text{ mm}$$

$$z_{B4} = 80 \text{ mm}$$

$$z_{B5} = 90 \text{ mm}$$

olarak kabul edilmiştir (bkz. Şekil 3.8).

Lokal kayıp hesabı için akışkanın silindir ve kanallar içerisinde katettiği mesafe:

$$L_{A1} = 20 \text{ mm}$$

$$L_{A2} = 45 \text{ mm}$$

$$L_{A3} = 60 \text{ mm}$$

$$L_{A4} = 80 \text{ mm}$$

$$L_{A5} = 90 \text{ mm}$$

$$L_{B1} = L_{B2} = L_{B3} = L_{B4} = L_{B5} = 5 \text{ mm (bkz. Şekil 3.8).}$$

Keskin giriş ve çıkış kayıpları:

$$K_G = 0,5 \text{ (Umur, 2010) , } K_C = 1 \text{ (Umur, 2010)}$$

Piston ve akış kanalları kesit çapları:

$$d_A = 40 \text{ mm}$$

$$d_{B1} = 1,7 \text{ mm}$$

$$d_{B2} = 1,6 \text{ mm}$$

$$d_{B3} = 1,2 \text{ mm}$$

$$d_{B4} = 1 \text{ mm}$$

$$d_{B5} = 1 \text{ mm (bkz. Şekil 3.6).}$$

A ve B yüzeyindeki statik basınçlar :

Piston yüzeyindeki basıncı bulmak için ilk darbe anında pistona gelen dik kuvvetin piston kesit alanına dağılımı hesaplanmalıdır. Bu durumda piston yüzeyinde oluşan anlık statik basınç:

$$P_A = \frac{F_D}{A_P} \quad (3.10)$$

olarak ifade edilir.

F_D kuvveti darbe emicinin enerji yutma kapasite eğrisinden yola çıkarak hesaplanır (bkz.Şekil 3.5). Sönümleme kuvveti lineer olarak kabul edildiği için yutulan enerji *kuvvet · strok'*a eşittir.

$$F_D = \frac{E}{s} = \frac{m \cdot g \cdot (h + s)}{s} = \frac{50 \cdot 9,81 \cdot 2,1}{0,1} = 10300,5 \text{ N}$$

Hesaplanan darbe kuvvetine göre piston yüzeyinde oluşan basınç:

$$P_A = \frac{10300,5}{1,25 \cdot 10^{-3}} = 8,2 \text{ MPa}$$

olarak elde edilir.

Akış transfer kanalındaki basınç değeri (bkz.Şekil 3.7), bize basınç tüpü dış yüzeydeki statik basıncı verir. Bu ölçüm transfer kanalına bağlanan manometre ile yapılmaktadır. Teorik olarak bu basınç 1-5 bar arası kabul edilir. Hesaplamalarda P_B basıncı 3 bar olarak kullanılmıştır.

$$P_B = 0,3 \text{ MPa}$$

Yüzey pürüzlülük değerleri :

Bir silindir içerisinde hareket eden piston varsa silindir iç yüzeylerine genellikle honlama işlemi uygulanır. Honlanan yüzeylerin pürüzlülük değeri honlama fırçası ve honlama makinesine göre değişmekte olup tez çalışması kapsamında tasarımı yapılan basınç tüpü iç yüzeyi için $\varepsilon_A = 0,0005$ mm kabul edilmiştir.

Akış kanalları, basınç tüpü üzerine matkap ile delindiği kabul edilerek delik iç yüzeyleri için pürüzlülük değeri $\varepsilon_B = 0,0063$ mm olarak alınmıştır.

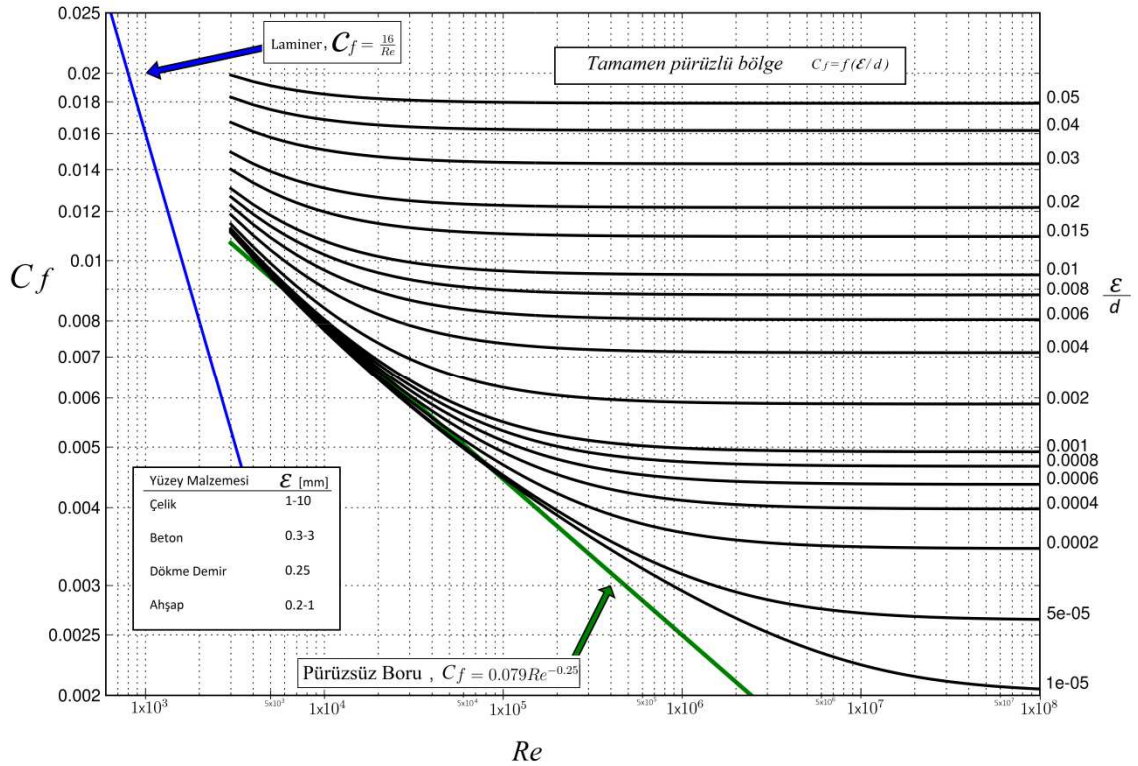
Akışkanlar mekaniğinde **Reynolds sayısı**, bir akışkanın, atalet kuvvetlerinin (ρv) nin viskozite kuvvetlerine (μ/d) olan oranıdır ve sonuç olarak bu değer bu iki tip kuvvetin belli bir akış şartı altında birbirine olan göreceli önemini verir. Reynolds sayısı, düzgün akış ve türbülanslı akış gibi değişik akış rejimlerini nitelemek için kullanılır.

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} = \frac{\text{Atalet kuvvetleri}}{\text{Viskozite kuvvetleri}} \quad (3.11)$$

Boru içi sıkıştırılmaz sürtünmeli akışta;

$Re < 2300$ ise akış düzgündür ve $C_f = \frac{16}{Re}$ olarak hesaplanır.

$Re > 2300$ ise akış türbülanslı kabul edilir. Sürtünme katsayısı (C_f); hidrolik olarak tamamen pürüzsüz ve tamamen pürüzlü bölgelerde Re sayısının bir ($C_f = f(Re)$) fonksiyonudur. Geçiş bölgesinde ise sürtünme katsayısı Re ve ε/d değerine bağlıdır ($C_f = f(Re, \varepsilon/d)$). C_f değeri bu bölgelerde verilen bağıntılardan hesaplanır veya Moody diyagramından okunur (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Moody diyagramı

(<http://www.dur.ac.uk/g.l.ingram/download/moody.png>'dan değiştirilerek alınmıştır.)

Basınç tüpü iç yüzeyindeki sürtünme katsayısı C_{f_A} :

Yükün tampona çarptığı andaki hızı 6,26 m/s olduğundan pistonun ilk hızı $u_A = 6,26$ m/s olarak kabul edilmiştir.

Buna göre Re sayısı;

$$Re_A = \frac{860 \cdot 6,26 \cdot 0,04}{40 \cdot 10^{-3}} = 5383.6$$

Pürüzlülük katsayısı;

$$\varepsilon_A/d_A = \frac{0,0005}{40} = 1,25 \cdot 10^{-5}$$

olarak hesaplanmıştır.

Moody diyagramından Re_A ve ε_A/d_A ' ya göre C_{f_A} değeri 0,0092 olarak okunmuştur (Şekil 3.9).

Basınç tüpü dış yüzeyindeki sürtünme katsayıları C_{f_B} :

İlk darbe anında akış kanallarından hidrolik sıvının çıkış hızları bilinmediğinden Re sayısı hesaplanamamıştır. Denklemden başlangıç olarak yerine koyulması gereken değerler Moody diyagramından pürüzlülük katsayısına göre okunmuştur (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Sürtünme katsayıları başlangıç değerleri

n	ε_B/d_{Bn}	$C_{f_{Bn}}$
1	$\frac{0,0063}{1,7} = 3,7 \cdot 10^{-3}$	0,0068
2	$\frac{0,0063}{1,6} = 3,94 \cdot 10^{-3}$	0,007
3	$\frac{0,0063}{1,2} = 5,25 \cdot 10^{-3}$	0,0078
4	$\frac{0,0063}{1} = 6,3 \cdot 10^{-3}$	0,0082
5	$\frac{0,0063}{1} = 6,3 \cdot 10^{-3}$	0,0082
Re	ε_A/d_A	C_{f_A}
5383.6	$1,25 \cdot 10^{-5}$	0,0092

1. Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

Denklem 3.7'ye göre $z_A = 0$, $K_C = 1$ ve $K_G = 0,5$ için genelleştirilmiş denklem:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{Bn}^2 - 0,5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{Bn} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{An}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{f_{Bn}} \cdot \frac{L_{Bn}}{d_{Bn}} \cdot u_{Bn}^2 \right) \right]$$
$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{B1}^2 - 0,5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{B1} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A1}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{f_{B1}} \cdot \frac{L_{B1}}{d_{B1}} \cdot u_{B1}^2 \right) \right]$$
$$(8,2 - 0,3) \cdot 10^6 = \frac{860}{2} \left[2 \cdot u_{B1}^2 - 0,5 \cdot u_A^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,02 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{20}{40} \cdot u_A^2 + C_{f_{B1}} \cdot \frac{5}{1,7} \cdot u_{B1}^2 \right) \right]$$
$$18372,48 = u_A^2 \cdot (2 \cdot C_{fA} - 0,5) + u_{B1}^2 \cdot (2 + 11,76 \cdot C_{f_{B1}})$$
$$u_{B1} = \sqrt{\frac{18372,48 - u_A^2 \cdot (2 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 11,76 \cdot C_{f_{B1}}}}$$

2. Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

Denklem 3.7'ye göre:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{B2}^2 - 0,5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{B2} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A2}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{f_{B2}} \cdot \frac{L_{B2}}{d_{B2}} \cdot u_{B2}^2 \right) \right]$$
$$(8,2 - 0,3) \cdot 10^6 = \frac{860}{2} \left[2 \cdot u_{B2}^2 - 0,5 \cdot u_A^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,045 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{45}{40} \cdot u_A^2 + C_{f_{B2}} \cdot \frac{5}{1,6} \cdot u_{B2}^2 \right) \right]$$
$$18372,97 = u_A^2 \cdot (4,5 \cdot C_{fA} - 0,5) + u_{B2}^2 \cdot (2 + 12,5 \cdot C_{f_{B2}})$$
$$u_{B2} = \sqrt{\frac{18372,97 - u_A^2 \cdot (4,5 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 12,5 \cdot C_{f_{B2}}}}$$

3. Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

Denklem 3.7'ye göre:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{B3}^2 - 0,5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{B3} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A3}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{f_{B3}} \cdot \frac{L_{B3}}{d_{B3}} \cdot u_{B3}^2 \right) \right]$$
$$(8,2 - 0,3) \cdot 10^6 = \frac{860}{2} \left[2 \cdot u_{B3}^2 - 0,5 \cdot u_A^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,06 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{60}{40} \cdot u_A^2 + C_{f_{B3}} \cdot \frac{5}{1,2} \cdot u_{B3}^2 \right) \right]$$
$$18373,27 = u_A^2 \cdot (6 \cdot C_{fA} - 0,5) + u_{B3}^2 \cdot (2 + 16,67 \cdot C_{f_{B3}})$$
$$u_{B3} = \sqrt{\frac{18373,27 - u_A^2 \cdot (6 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 16,67 \cdot C_{f_{B3}}}}$$

4. Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

Denklem 3.7'ye göre:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{B4}^2 - 0.5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{B4} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A4}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{fB4} \cdot \frac{L_{B4}}{d_{B4}} \cdot u_{B4}^2 \right) \right]$$
$$(8,2 - 0,3) \cdot 10^6 = \frac{860}{2} \left[2 \cdot u_{B4}^2 - 0.5 \cdot u_A^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,08 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{80}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB4} \cdot \frac{5}{1} \cdot u_{B4}^2 \right) \right]$$
$$18373,66 = u_A^2 \cdot (8 \cdot C_{fA} - 0,5) + u_{B4}^2 \cdot (2 + 20 \cdot C_{fB4})$$
$$u_{B4} = \sqrt{\frac{18373,66 - u_A^2 \cdot (8 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 20 \cdot C_{fB4}}}$$

5. Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

Denklem 3.7'ye göre:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{B5}^2 - 0.5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{B5} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A5}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{fB5} \cdot \frac{L_{B5}}{d_{B5}} \cdot u_{B5}^2 \right) \right]$$
$$(8,2 - 0,3) \cdot 10^6 = \frac{860}{2} \left[2 \cdot u_{B5}^2 - 0.5 \cdot u_A^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,09 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{90}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB5} \cdot \frac{5}{1} \cdot u_{B5}^2 \right) \right]$$
$$18373,86 = u_A^2 \cdot (9 \cdot C_{fA} - 0,5) + u_{B5}^2 \cdot (2 + 20 \cdot C_{fB5})$$
$$u_{B5} = \sqrt{\frac{18373,86 - u_A^2 \cdot (9 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 20 \cdot C_{fB5}}}$$

Her bir akış kanalı için Bernoulli denklemi çözüldüğünde hızların; piston hızına ve sürtünme katsayılarına bağlı olduğu görülmüştür.

Denklemlerin ortak çözümü için sürtünme katsayılarına göre iterasyon tablosu oluşturulmuş ve başlangıç değerleri girilmiştir (Şekil 3.10). Sürtünme katsayıları başlangıç değerleri Çizelge 3.2'de ve çözümü yapılan denklemler Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Çözümü yapılan denklemler

Bernoulli denklem çözümlerinden elde edilen, akış kanallarındaki hızlar:	
1	$u_{B1} = \sqrt{\frac{18372,48 - u_A^2 \cdot (2 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 11,76 \cdot C_{fB1}}}$
2	$u_{B2} = \sqrt{\frac{18372,97 - u_A^2 \cdot (4,5 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 12,5 \cdot C_{fB2}}}$
3	$u_{B3} = \sqrt{\frac{18373,27 - u_A^2 \cdot (6 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 16,67 \cdot C_{fB3}}}$
4	$u_{B4} = \sqrt{\frac{18373,66 - u_A^2 \cdot (8 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 20 \cdot C_{fB4}}}$
5	$u_{B5} = \sqrt{\frac{18373,86 - u_A^2 \cdot (9 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 20 \cdot C_{fB5}}}$
Süreklilik denklemine göre piston hızı:	
6	$u_A = (1,816 \cdot u_{B1} + 1,608 \cdot u_{B2} + 0,904 \cdot u_{B3} + 0,624 \cdot u_{B4} + 0,624 \cdot u_{B5}) \cdot 10^{-3}$

i	u_A	C_{fA}	C_{fB1}	C_{fB2}	C_{fB3}	C_{fB4}	C_{fB5}	u_{B1}	u_{B2}	u_{B3}	u_{B4}	u_{B5}
1	0,0092	0,0068	0,007	0,0078	0,0082	0,0082	6,26	94,03261427	93,86176977	92,91946172	92,1881	92,18594352
2	0,0092	0,0118	0,0119	0,013	0,0080725	0,008072663	0,51274153	92,68374984	92,46949382	91,04166966	92,1991	92,1995103
3	0,005727	0,01181	0,01192	0,0132	0,0080715	0,008071475	0,51437093	92,68115843	92,46396995	90,97317054	92,1995	92,19985161
4	0,003617	0,01185	0,01195	0,0134	0,0080715	0,008071445	0,51429598	92,67986786	92,45590214	90,90493511	92,1995	92,19986168
5	0,0036175	0,01186	0,01196	0,0136	0,0080715	0,008071444	0,51420283	92,66842081	92,45321371	90,83685469	92,1995	92,19986198
6	0,0036182	0,01186	0,01196	0,0136	0,0080715	0,008071444	0,51413324	92,66842072	92,45321363	90,83685462	92,1995	92,19986192

Şekil 3.10. İterasyon tablosu-1

6. iterasyon adımında yakınsama ($e = 10^{-5}$) sağlanmış ve iterasyon durdurulmuştur (Şekil 3.10). Çözümüne göre piston hızındaki değişim şu şekilde elde edilmiştir:

$$u_{A1} = 0,514 \text{ m/s}$$

$$u_{A2} = 0,346 \text{ m/s}$$

$$u_{A3} = 0,197 \text{ m/s}$$

$$u_{A4} = 0,115 \text{ m/s}$$

$$u_{A5} = 0,057 \text{ m/s}$$

Piston ilerledikçe akış kanalları sırasıyla kapanmaktadır. İterasyon tablosunda 1. 2. 3. ve 4. Akış kanalı kapatılarak iterasyona devam edildiğinde piston hızının 0,05 m/s'ye kadar düştüğü görülmektedir (Şekil 3.11). İterasyon tablosunda elde edilen değerler EK-1'de ayrıntılı olarak incelenebilir.

Şekil 3.11. İterasyon tablosu 1-a

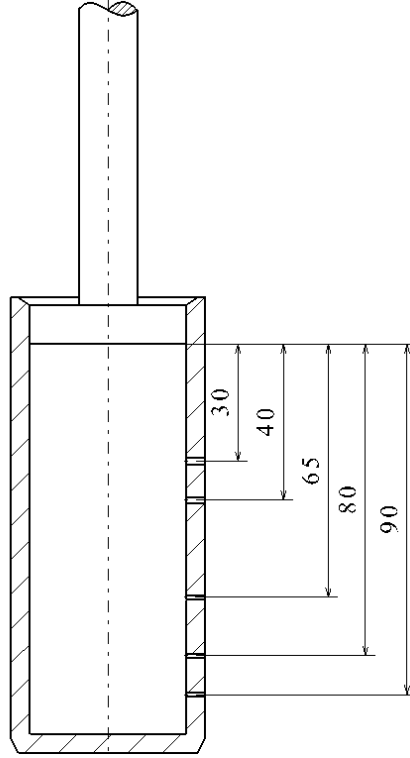
3.2.5.4. Sönümleme süresi

Darbe emicinin üzerine çarpan kütleyi durdurana kadar geçen süreye *sönümleme süresi* denir. Sönümleme süresi teoride *strok/ortalama piston hızı*'a eşittir. Minimum akış kesitine göre yapılmış 1. Tasarımda, hesaplamalara göre, pistonun ortalama hızı 0,246m/s'dir. Bu durumda sönümleme süresi:

$$t_h = \frac{V}{Q} = \frac{A_{\overline{P}} \cdot L}{u_{A0} \cdot A_{\overline{P}}} = \frac{L}{u_{A0}}$$

$$t_h = \frac{0,1}{0,246 \text{ m/s}} = 0,406 \text{ s' dir.}$$

3.2.6. Akış kanalları arasındaki mesafe değişiminin akış hızına etkisinin gözlenmesi
Çalışma kapsamında öncelikle; başlangıçta oluşturulan tasarım üzerinde akış kanalları arasındaki mesafeler değiştirilerek t_h zamanının düşürülmesi hedeflenmiştir. Akışkan özellikleri, serbest düşme yüksekliği, düşme kütlesi, basınç tüpü iç çapı, akış kanal kesitleri, strok gibi diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur. Akış kanalları arasındaki mesafenin değiştirilmesi ile oluşan yeni tasarım Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12 Basınç tüpü tasarımı-2

3.2.6.1. Süreklilik denklemi

Kesit çaplarında ve delik sayısında bir değişiklik olmadığından süreklilik denklemi (bkz. Denklem 3.9) değiştirilmeden kullanılabilir.

3.2.6.2. Bernoulli denklemi

Değiştirilen mesafeye göre her bir akış kanalı için Bernoulli denklemleri tekrar yazılmıştır.

1. Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

Denklem 3.7'ye göre $z_A = 0$, $K_C = 1$ ve $K_G = 0,5$ için genelleştirilmiş denklem:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{Bn}^2 - 0,5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{Bn} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A1}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{f_{Bn}} \cdot \frac{L_{Bn}}{d_{Bn}} \cdot u_{Bn}^2 \right) \right]$$

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{B1}^2 - 0,5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{B1} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A1}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{f_{B1}} \cdot \frac{L_{B1}}{d_{B1}} \cdot u_{B1}^2 \right) \right]$$

$$(8,2 - 0,3) \cdot 10^6 = \frac{860}{2} \left[2 \cdot u_{B1}^2 - 0,5 \cdot u_A^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,030 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{30}{40} \cdot u_A^2 + C_{f_{B1}} \cdot \frac{5}{1,7} \cdot u_{B1}^2 \right) \right]$$

$$18372,093 + 2 \cdot 9,81 \cdot 0,030 = u_A^2 \cdot (3 \cdot C_{fA} - 0,5) + u_{B1}^2 \cdot (2 + 11,76 \cdot C_{f_{B1}})$$

$$u_{B1} = \sqrt{\frac{18372,68 - u_A^2 \cdot (3 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 11,76 \cdot C_{f_{B1}}}}$$

2. Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

Denklem 3.7'ye göre:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{B2}^2 - 0,5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{B2} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A2}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{f_{B2}} \cdot \frac{L_{B2}}{d_{B2}} \cdot u_{B2}^2 \right) \right]$$

$$(8,2 - 0,3) \cdot 10^6 = \frac{860}{2} \left[2 \cdot u_{B2}^2 - 0,5 \cdot u_A^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,04 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{40}{40} \cdot u_A^2 + C_{f_{B2}} \cdot \frac{5}{1,6} \cdot u_{B2}^2 \right) \right]$$

$$18372,093 + 2 \cdot 9,81 \cdot 0,04 = u_A^2 \cdot (4 \cdot C_{fA} - 0,5) + u_{B2}^2 \cdot (2 + 12,5 \cdot C_{f_{B2}})$$

$$u_{B2} = \sqrt{\frac{18372,87 - u_A^2 \cdot (4 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 12,5 \cdot C_{f_{B2}}}}$$

3. Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

Denklem 3.7'ye göre:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{B3}^2 - 0,5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{B3} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A3}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{f_{B3}} \cdot \frac{L_{B3}}{d_{B3}} \cdot u_{B3}^2 \right) \right]$$

$$(8,2 - 0,3) \cdot 10^6 = \frac{860}{2} \left[2 \cdot u_{B3}^2 - 0,5 \cdot u_A^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,065 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{65}{40} \cdot u_A^2 + C_{f_{B3}} \cdot \frac{5}{1,2} \cdot u_{B3}^2 \right) \right]$$

$$18372,093 + 2 \cdot 9,81 \cdot 0,065 = u_A^2 \cdot (6,5 \cdot C_{fA} - 0,5) + u_{B3}^2 \cdot (2 + 16,67 \cdot C_{f_{B3}})$$

$$u_{B3} = \sqrt{\frac{18373,36 - u_A^2 \cdot (6,5 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 16,67 \cdot C_{f_{B3}}}}$$

4. Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

Denklem 3.7'ye göre:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{B4}^2 - 0.5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{B4} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A4}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{fB4} \cdot \frac{L_{B4}}{d_{B4}} \cdot u_{B4}^2 \right) \right]$$

$$(8,2 - 0,3) \cdot 10^6 = \frac{860}{2} \left[2 \cdot u_{B4}^2 - 0.5 \cdot u_A^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,08 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{80}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB4} \cdot \frac{5}{1} \cdot u_{B4}^2 \right) \right]$$

$$18373,66 = u_A^2 \cdot (8 \cdot C_{fA} - 0,5) + u_{B4}^2 \cdot (2 + 20 \cdot C_{fB4})$$

$$u_{B4} = \sqrt{\frac{18373,66 - u_A^2 \cdot (8 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 20 \cdot C_{fB4}}}$$

5. Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

Denklem 3.7'ye göre:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{B5}^2 - 0.5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{B5} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A5}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{fB5} \cdot \frac{L_{B5}}{d_{B5}} \cdot u_{B5}^2 \right) \right]$$

$$(8,2 - 0,3) \cdot 10^6 = \frac{860}{2} \left[2 \cdot u_{B5}^2 - 0.5 \cdot u_A^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,09 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{90}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB5} \cdot \frac{5}{1} \cdot u_{B5}^2 \right) \right]$$

$$18373,86 = u_A^2 \cdot (9 \cdot C_{fA} - 0,5) + u_{B5}^2 \cdot (2 + 20 \cdot C_{fB5})$$

$$u_{B5} = \sqrt{\frac{18373,86 - u_A^2 \cdot (9 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 20 \cdot C_{fB5}}}$$

3.2.6.3 Denklem çözümleri

Akış kanalları arasındaki mesafe değiştirilerek oluşturulan tasarım için denklem çözümleri Şekil 3.13'teki iterasyon tablosunda verilmiştir. (İterasyon tablosu EK-2'de ayrıntılı olarak verilmiştir.) İterasyon sonucu elde edilen piston hızları:

$$u_{A1} = 0,514 \text{ m/s}$$

$$u_{A2} = 0,346 \text{ m/s}$$

$$u_{A3} = 0,197 \text{ m/s}$$

$$u_{A4} = 0,115 \text{ m/s}$$

$$u_{A5} = 0,057 \text{ m/s}$$

Şekil 3.13. İterasyon tablosu-2

Kanallar arasındaki mesafe değiştirildiğinde elde edilen denklemler ile 2. İterasyon tablosu oluşturulmuş ve akış kanallarından çıkış hızlarındaki değişimi gözlenmiştir (bkz. Şekil 3.13). Kanallar arasındaki mesafenin değiştirilmesi piston hızını doğrudan etkilememiş ancak kanallardan çıkış hızlarında değişim gözlenmiştir.

Çizelge 3.4. Akış hızı karşılaştırma tablosu-1

Akış kanal sayısı (n)	1. Tasarım (bkz. Şekil 3.8)		2. Tasarım (bkz. Şekil 3.12)	
	L_{An} [mm]	u_{Bn} [m/s]	L_{An} [mm]	u_{Bn} [m/s]
1	20	92,67	30	92,68
2	40	92,45	40	92,46
3	60	90,84	65	90,95
4	80	92,20	80	92,20
5	90	92,20	90	92,20

3.2.6.4. Sönümleme süresi

2. Tasarımda, pistonun ortalama hızı 0,246m/s'dir. Bu durumda sönümleme süresi:

$$t_h = \frac{0,1}{0,246 \text{ m/s}} = 0,406 \text{ s' dir.}$$

3.2.7. Akış kanal sayısının akış hızına etkisinin gözlenmesi

Toplam akış kanal kesiti Denklem 3.6'ya göre $6,95 \cdot 10^{-6} m^2$ olarak hesaplanmıştı. Toplam akış kanal kesiti sabit tutularak delik sayısı altıya çıkartılmış ve toplam akış kanal kesitine göre akış kanal yarı çapları yeniden hesaplanmıştır (Şekil 3.14).

$$A_T = \pi(r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_4^2 + r_5^2 + r_6^2 + r_7^2) = 6,95 \cdot 10^{-6} m^2$$

$$r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_4^2 + r_5^2 + r_6^2 = 2,2 \cdot 10^{-6} m^2$$

$$r_1 = 0,9 mm$$

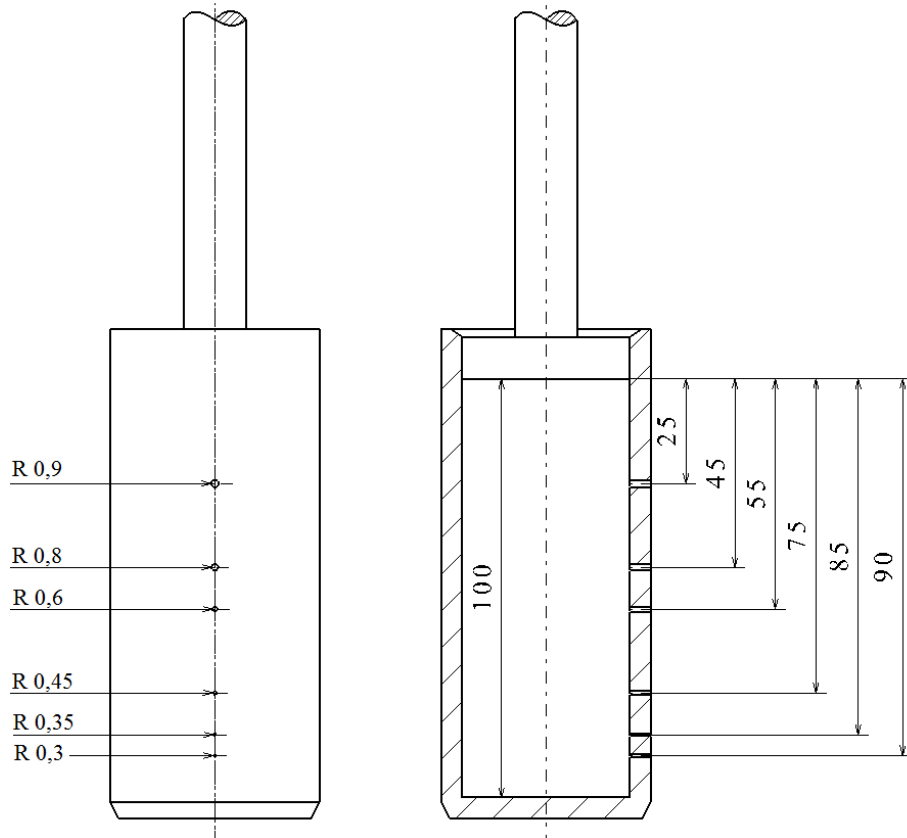
$$r_2 = 0,8 mm$$

$$r_3 = 0,6 mm$$

$$r_4 = 0,45 mm$$

$$r_5 = 0,35 mm$$

$$r_6 = 0,3 mm$$



Şekil 3.14. Basınç tüpü tasarımı-3

3.2.7.1. Süreklilik denklemi

Yeni oluşturulan tasarım için (Şekil 3.12) süreklilik denklemi:

$$Q = A_P \cdot u_A = A_{B1} \cdot u_{B1} + A_{B2} \cdot u_{B2} + A_{B3} \cdot u_{B3} + A_{B4} \cdot u_{B4} + A_{B5} \cdot u_{B5} + A_{B6} \cdot u_{B6}$$

$$\frac{\pi}{4} \cdot d_A^2 \cdot u_A = \pi \cdot (R_{B1}^2 \cdot u_{B1} + R_{B2}^2 \cdot u_{B2} + R_{B3}^2 \cdot u_{B3} + R_{B4}^2 \cdot u_{B4} + R_{B5}^2 \cdot u_{B5} + R_{B6}^2 \cdot u_{B6})$$

$$\frac{\pi}{4} \cdot 0,04^2 \cdot u_A = \pi \cdot (0,9^2 \cdot u_{B1} + 0,8^2 \cdot u_{B2} + 0,6^2 \cdot u_{B3} + 0,45^2 \cdot u_{B4} + 0,35^2 \cdot u_{B5} + 0,3^2 \cdot u_{B6}) \cdot 10^{-6}$$

$$1,25 \cdot 10^{-3} \cdot u_A = (2,54 \cdot u_{B1} + 2,01 \cdot u_{B2} + 1,13 \cdot u_{B3} + 0,64 \cdot u_{B4} + 0,38 \cdot u_{B5} + 0,28 \cdot u_{B6}) \cdot 10^{-6}$$

$$u_A = (2,032 \cdot u_{B1} + 1,608 \cdot u_{B2} + 0,904 \cdot u_{B3} + 0,51 \cdot u_{B4} + 0,304 \cdot u_{B5} + 0,224 \cdot u_{B6}) \cdot 10^{-3}$$

3.2.7.2. Bernoulli denklemi

Piston yüzeyi ve basınç tüpü dış yüzeyi arasında her bir akış kanalı için bernoulli denklemleri yeniden oluşturulmuştur.

$z_A = 0$, $K_\zeta = 1$ ve $K_G = 0,5$ için genelleştirilmiş denklem:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{Bn}^2 - 0,5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{Bn} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{An}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{fBn} \cdot \frac{L_{Bn}}{d_{Bn}} \cdot u_{Bn}^2 \right) \right]$$

Çizelge 3.5. Bernoulli ve süreklilik denklemlerinde kullanılan yeni değerler

n	L_{An} [mm]	z_{Bn} [mm]	d_{Bn} [mm]	A_{Bn} [mm ²]
1	25	25	1,8	2,54
2	45	45	1,6	2,01
3	55	55	1,2	1,13
4	75	75	0,9	0,64
5	85	85	0,7	0,38
6	90	90	0,6	0,28

1. Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{B1}^2 - 0,5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{B1} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A1}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{fB1} \cdot \frac{L_{B1}}{d_{B1}} \cdot u_{B1}^2 \right) \right]$$

$$(8,2 - 0,3) \cdot 10^6 \cdot \frac{2}{860} = \left[2 \cdot u_{B1}^2 - 0,5 \cdot u_A^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,025 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{25}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB1} \cdot \frac{5}{1,8} \cdot u_{B1}^2 \right) \right]$$

$$18372,58 = u_A^2 \cdot (2,5 \cdot C_{fA} - 0,5) + u_{B1}^2 \cdot (2 + 11,1 \cdot C_{fB1})$$

$$u_{B1} = \sqrt{\frac{18372,58 - u_A^2 \cdot (2,5 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 11,1 \cdot C_{fB1}}}$$

2. Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{B2}^2 - 0.5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{B2} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A2}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{fB2} \cdot \frac{L_{B2}}{d_{B2}} \cdot u_{B2}^2 \right) \right]$$
$$(8,2 - 0,3) \cdot 10^6 \cdot \frac{2}{860} = \left[2 \cdot u_{B2}^2 - 0.5 \cdot u_A^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,045 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{45}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB2} \cdot \frac{5}{1,6} \cdot u_{B2}^2 \right) \right]$$
$$18373 = u_A^2 \cdot (4,5 \cdot C_{fA} - 0,5) + u_{B2}^2 \cdot (2 + 12,5 \cdot C_{fB2})$$
$$u_{B2} = \sqrt{\frac{18373 - u_A^2 \cdot (4,5 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 12,5 \cdot C_{fB2}}}$$

3. Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{B3}^2 - 0.5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{B3} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A3}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{fB3} \cdot \frac{L_{B3}}{d_{B3}} \cdot u_{B3}^2 \right) \right]$$
$$(8,2 - 0,3) \cdot 10^6 \cdot \frac{2}{860} = \left[2 \cdot u_{B3}^2 - 0.5 \cdot u_A^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,055 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{55}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB3} \cdot \frac{5}{1,2} \cdot u_{B3}^2 \right) \right]$$
$$18373,2 = u_A^2 \cdot (5,5 \cdot C_{fA} - 0,5) + u_{B3}^2 \cdot (2 + 16,67 \cdot C_{fB3})$$
$$u_{B3} = \sqrt{\frac{18373,2 - u_A^2 \cdot (5,5 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 16,67 \cdot C_{fB3}}}$$

4. Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{B4}^2 - 0.5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{B4} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A4}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{fB4} \cdot \frac{L_{B4}}{d_{B4}} \cdot u_{B4}^2 \right) \right]$$
$$(8,2 - 0,3) \cdot 10^6 \cdot \frac{2}{860} = \left[2 \cdot u_{B4}^2 - 0.5 \cdot u_A^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,075 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{75}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB4} \cdot \frac{5}{0,9} \cdot u_{B4}^2 \right) \right]$$
$$18373,56 = u_A^2 \cdot (7,5 \cdot C_{fA} - 0,5) + u_{B4}^2 \cdot (2 + 22,2 \cdot C_{fB4})$$
$$u_{B4} = \sqrt{\frac{18373,56 - u_A^2 \cdot (7,5 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 22,2 \cdot C_{fB4}}}$$

5. Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{B5}^2 - 0.5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{B5} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A5}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{fB5} \cdot \frac{L_{B5}}{d_{B5}} \cdot u_{B5}^2 \right) \right]$$
$$(8,2 - 0,3) \cdot 10^6 \cdot \frac{2}{860} = \left[2 \cdot u_{B5}^2 - 0.5 \cdot u_A^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,085 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{85}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB5} \cdot \frac{5}{0,7} \cdot u_{B5}^2 \right) \right]$$
$$18373,76 = u_A^2 \cdot (9 \cdot C_{fA} - 0,5) + u_{B5}^2 \cdot (2 + 28,5 \cdot C_{fB5})$$
$$u_{B5} = \sqrt{\frac{18373,76 - u_A^2 \cdot (9 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 28,5 \cdot C_{fB5}}}$$

6. Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{B6}^2 - 0.5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{B6} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{A6}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{fB6} \cdot \frac{L_{B6}}{d_{B6}} \cdot u_{B6}^2 \right) \right]$$

$$(8,2 - 0,3) \cdot 10^6 \cdot \frac{2}{860} = \left[2 \cdot u_{B6}^2 - 0.5 \cdot u_A^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,09 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{90}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB6} \cdot \frac{5}{0,6} \cdot u_{B6}^2 \right) \right]$$

$$18373,86 = u_A^2 \cdot (9 \cdot C_{fA} - 0,5) + u_{B6}^2 \cdot (2 + 33,3 \cdot C_{fB6})$$

$$u_{B6} = \sqrt{\frac{18373,86 - u_A^2 \cdot (9 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 33,3 \cdot C_{fB6}}}$$

3.2.7.3. Denklem çözümleri

Akış kanal sayısı artırılarak oluşturulan tasarım için denklem çözümleri Şekil 3.16'daki iterasyon tablosunda verilmiştir. (İterasyon tablosu EK-3'de ayrıntılı olarak incelenebilir.)

Çizelge 3.6. Sürtünme katsayıları başlangıç değerleri-2

n	ε_B/d_{Bn}	$C_{f_{Bn}}$
1	$\frac{0,0063}{1,8} = 3,5 \cdot 10^{-3}$	0,0068
2	$\frac{0,0063}{1,6} = 3,94 \cdot 10^{-3}$	0,007
3	$\frac{0,0063}{1,2} = 5,25 \cdot 10^{-3}$	0,0078
4	$\frac{0,0063}{0,9} = 7 \cdot 10^{-3}$	0,0086
5	$\frac{0,0063}{0,7} = 9 \cdot 10^{-3}$	0,0092
6	$\frac{0,0063}{0,6} = 10,5 \cdot 10^{-3}$	0,0098
Re	ε_A/d_A	C_{f_A}
5383.6	$1,25 \cdot 10^{-5}$	0,0092

Çizelge 3.7. Akış hızı karşılaştırma tablosu-2

Akış kanal sayısı (n)	1. Tasarım (bkz. Şekil 3.8)		2.Tasarım (bkz. Şekil 3.11)		3.Tasarım (bkz. Şekil 3.15)	
	L_{An} [mm]	u_a [m/s]	L_{An} [mm]	u_a [m/s]	L_{An} [mm]	u_a [m/s]
1	20	0,514	30	0,514	25	0,519
2	40	0,346	40	0,346	45	0,328
3	60	0,197	65	0,197	55	0,177
4	80	0,115	80	0,115	75	0,094
5	90	0,057	90	0,057	85	0,047
6					90	0,019

3.2.7.4.Sönümleme süresi

3. Tasarımda, pistonun ortalama hızı 0,197m/s'ye düşmüştür. Bu durumda sönümleme süresi:

$$t_h = \frac{0,1}{0,197 \text{ m/s}} = 0,506 \text{ s ' dir.}$$

3.2.8. Akış kanal kesiti değişiminin akış hızına etkisinin gözlenmesi

Akış kanal kesiti sabit tutularak yapılan çalışmalarda sönümleme hızının değişmediği, hatta 3.tasarımda sönümleme süresinin uzadığı görülmüştür. Bu nedenle piston hızını arttırarak (dolayısı ile debiyi), sönümlemenin daha kısa sürede gerçekleşmesini sağlamak için akış kanal kesitinin arttırılması gerektiği görülmektedir.

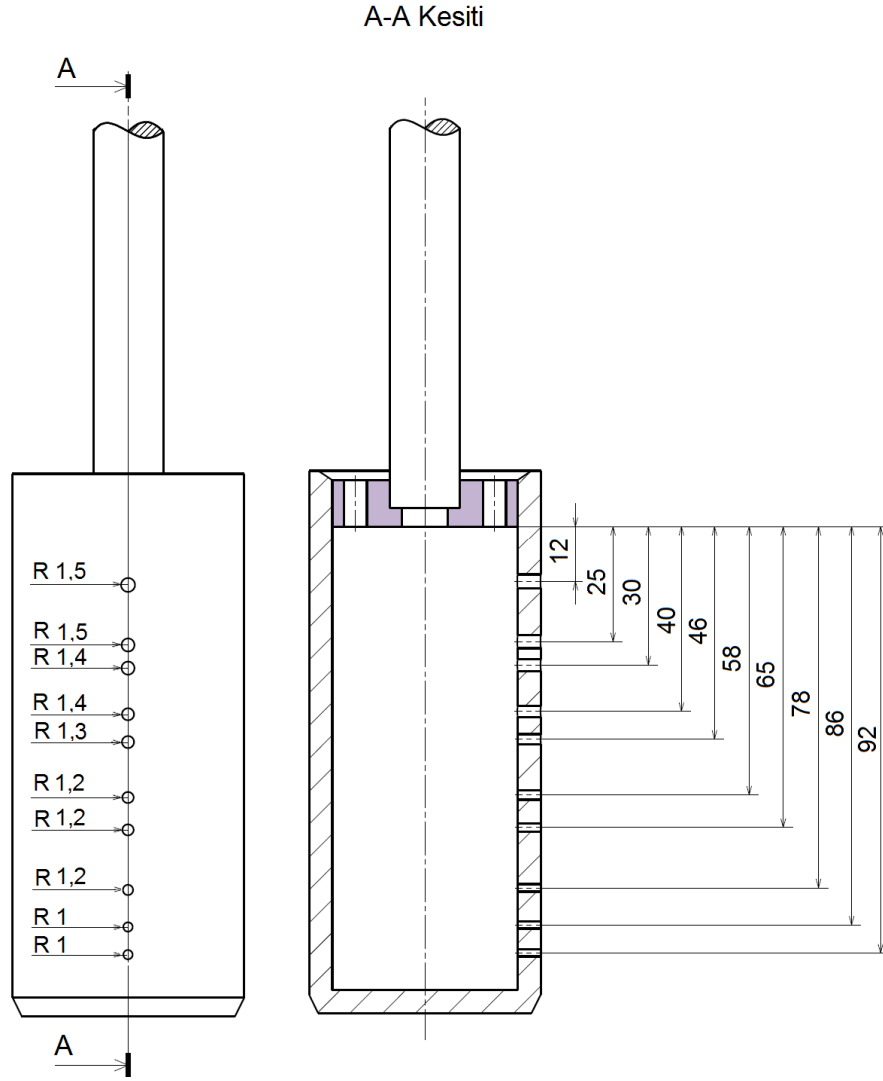
Endüstride kullanılan bir makinenin çalışma hızı 100-120 m/dak olduğu düşünülürse bu makinede kullanılan s=0,1m stroka sahip bir endüstriyel darbe emicinin sönümleme süresi 55 milisaniyeden fazla olmamalıdır. Üretici kataloglarında verilen sönümleme süreleri de makine hızlarına göre hesaplanmıştır.

$$s = V_o \cdot t_m$$
$$t_m = \frac{0,1 \text{ m}}{1,83 \text{ m/s}} = 0,0546 \text{ s}$$

Tasarımı yapılan endüstriyel darbe emici sönümle süresini belirleyecek en büyük etken debidir. 1. 2. ve 3. tasarımda hesaplanan ortalama sönümleme süresi $t_h = 0,4\sim 0,5$ saniyedir. Bu sürenin çalışma koşullarına çekilmesi için pistonun ortalama hızının 1,83 m/s'ye yakın olması gerekmektedir. Ortalama hızı yakalayabilmek için iterasyonlar yapılmış, iterasyon sonuçlarına göre en uygun akış kanal kesiti ve kanal sayısı tespit edilmiştir.

Daha kısa sürede lineere yakın bir sönümleme gerçekleştiren endüstriyel darbe emici basınç tüpü tasarımında on adet akış kanalına göre tasarım yapılmıştır. Akış kanalları birbirine seri bağlı olduğundan, kanallar arasındaki mesafe, bernoulli ve süreklilik denklemleri sonucu oluşturulan iterasyon tablosundaki hızlar lineere yakın olana kadar denemeler yapılarak belirlenmiştir.

İlk 3 tasarımda toplam akış kesiti $6,95 \text{ mm}^2$ olacak şekilde hesaplamalar yapılmıştı. 4. Tasarımda toplam akış kesiti belirlenirken sönümleme süresine göre kesit arttırılmıştır. Toplam akış kesiti 5 mm^2 aralıklarla arttırılmış ve her artış sonucunda piston hızının arttığı ve sönümleme süresinin azaldığı gözlenmiştir. Toplam akış kanal kesiti $51,6 \text{ mm}^2$ 'ye ulaştığında sönümleme süresinin 0,05 saniyelere indiği gözlenmiş ve iterasyon durdurulmuştur. Bu hesaplamalar sonucunda ortaya çıkan tasarım Şekil 3.17'de ve nihai değerleri gösteren iterasyon tablosu Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.17. Basınç tüpü tasarımı-4

Çizelge 3.8. Bernoulli ve süreklilik denklemlerinde kullanılan yeni değerler-2

n	d_{Bn} [m]	z_{Bn} [m]	L_{An} [m]
1	$3 \cdot 10^{-3}$	0,012	0,012
2	$3 \cdot 10^{-3}$	0,025	0,025
3	$2,8 \cdot 10^{-3}$	0,030	0,030
4	$2,8 \cdot 10^{-3}$	0,040	0,040
5	$2,6 \cdot 10^{-3}$	0,046	0,046
6	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,058	0,058
7	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,065	0,065
8	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,078	0,078
9	$2 \cdot 10^{-3}$	0,086	0,086
10	$2 \cdot 10^{-3}$	0,092	0,092

3.2.8.1. Süreklilik denklemi

Yeni oluşturulan tasarım için (Şekil 3.17) süreklilik denklemi:

$$Q = A_P \cdot u_A = A_{B1} \cdot u_{B1} + A_{B2} \cdot u_{B2} + A_{B3} \cdot u_{B3} + A_{B4} \cdot u_{B4} + A_{B5} \cdot u_{B5} + A_{B6} \cdot u_{B6} \\ + A_{B7} \cdot u_{B7} + A_{B8} \cdot u_{B8} + A_{B9} \cdot u_{B9} + A_{B10} \cdot u_{B10}$$

$$Q = A_P \cdot u_A = 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot u_A$$

$$u_A = (5,625 \cdot u_{B1} + 5,625 \cdot u_{B2} + 4,9 \cdot u_{B3} + 4,9 \cdot u_{B4} + 4,225 \cdot u_{B5} + 3,6 \cdot u_{B6} \\ + 3,6 \cdot u_{B7} + 3,6 \cdot u_{B8} + 2,5 \cdot u_{B9} + 2,5 \cdot u_{B10}) \cdot 10^{-3}$$

3.2.8.2. Akış kanalları için genel Bernoulli denklemi

Denklem 3.7'ye göre $z_A = 0$, $K_C = 1$ ve $K_G = 0,5$ için genelleştirilmiş denklem:

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[(2 \cdot u_{Bn}^2 - 0,5 \cdot u_A^2) - 2 \cdot g \cdot z_{Bn} + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{An}}{d_A} \cdot u_A^2 + C_{fBn} \cdot \frac{L_{Bn}}{d_{Bn}} \cdot u_{Bn}^2 \right) \right] \\ 18372,093 + 19,62 \cdot z_{Bn} = 2 \cdot u_B^2 - 0,5 \cdot u_A^2 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{L_{An}}{40} \cdot u_A^2 + C_{fBn} \cdot \frac{5}{d_{Bn}} \cdot u_{Bn}^2 \right)$$

1.Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

$$18372,093 + 19,62 \cdot 0,012 = 2 \cdot u_B^2 - 0,5 \cdot u_A^2 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{12}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB1} \cdot \frac{5}{3} \cdot u_{B1}^2 \right) \\ u_{B1} = \sqrt{\frac{18372,33 - u_A^2 \cdot (1,2 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 6,67 \cdot C_{fB1}}}$$

2.Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

$$18372,093 + 19,62 \cdot 0,025 = 2 \cdot u_B^2 - 0,5 \cdot u_A^2 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{25}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB2} \cdot \frac{5}{3} \cdot u_{B2}^2 \right) \\ u_{B2} = \sqrt{\frac{18372,58 - u_A^2 \cdot (2,5 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 6,67 \cdot C_{fB2}}}$$

3.Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

$$18372,093 + 19,62 \cdot 0,03 = 2 \cdot u_B^2 - 0,5 \cdot u_A^2 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{30}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB3} \cdot \frac{5}{2,8} \cdot u_{B3}^2 \right) \\ u_{B3} = \sqrt{\frac{18372,68 - u_A^2 \cdot (3 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 7,14 \cdot C_{fB3}}}$$

4.Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

$$18372,093 + 19,62 \cdot 0,040 = 2 \cdot u_B^2 - 0,5 \cdot u_A^2 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{40}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB4} \cdot \frac{5}{2,8} \cdot u_{B4}^2 \right)$$

$$u_{B4} = \sqrt{\frac{18372,87 - u_A^2 \cdot (4 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 7,14 \cdot C_{f_{B4}}}}$$

5.Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

$$18372,093 + 19,62 \cdot 0,046 = 2 \cdot u_B^2 - 0,5 \cdot u_A^2 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{46}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB5} \cdot \frac{5}{2,6} \cdot u_{B5}^2 \right)$$

$$u_{B5} = \sqrt{\frac{18373 - u_A^2 \cdot (4,6 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 7,69 \cdot C_{f_{B5}}}}$$

6.Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

$$18372,093 + 19,62 \cdot 0,058 = 2 \cdot u_B^2 - 0,5 \cdot u_A^2 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{58}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB6} \cdot \frac{5}{2,4} \cdot u_{B6}^2 \right)$$

$$u_{B6} = \sqrt{\frac{18373,23 - u_A^2 \cdot (5,8 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 8,33 \cdot C_{f_{B6}}}}$$

7.Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

$$18372,093 + 19,62 \cdot 0,065 = 2 \cdot u_B^2 - 0,5 \cdot u_A^2 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{65}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB7} \cdot \frac{5}{2,4} \cdot u_{B7}^2 \right)$$

$$u_{B7} = \sqrt{\frac{18373,37 - u_A^2 \cdot (6,5 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 8,33 \cdot C_{f_{B7}}}}$$

8.Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

$$18372,093 + 19,62 \cdot 0,078 = 2 \cdot u_B^2 - 0,5 \cdot u_A^2 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{78}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB8} \cdot \frac{5}{2,4} \cdot u_{B8}^2 \right)$$

$$u_{B8} = \sqrt{\frac{18373,62 - u_A^2 \cdot (7,8 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 8,33 \cdot C_{f_{B8}}}}$$

9.Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

$$18372,093 + 19,62 \cdot 0,086 = 2 \cdot u_B^2 - 0,5 \cdot u_A^2 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{86}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB9} \cdot \frac{5}{2} \cdot u_{B9}^2 \right)$$

$$u_{B9} = \sqrt{\frac{18373,78 - u_A^2 \cdot (8,6 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 10 \cdot C_{f_{B9}}}}$$

10.Akış kanalı için Bernoulli denklemi:

$$18372,093 + 19,62 \cdot 0,092 = 2 \cdot u_B^2 - 0,5 \cdot u_A^2 + 4 \cdot \left(C_{fA} \cdot \frac{92}{40} \cdot u_A^2 + C_{fB10} \cdot \frac{5}{2} \cdot u_{B10}^2 \right)$$

$$u_{B10} = \sqrt{\frac{18373,9 - u_A^2 \cdot (9,2 \cdot C_{fA} - 0,5)}{2 + 10 \cdot C_{f_{B10}}}}$$

3.2.8.3 Denklem çözümleri

Akış kanal kesiti değiştirilerek oluşturulan tasarım için denklem çözümleri Şekil 3.19'daki iterasyon tablosunda verilmiştir. (İterasyon tablosu EK-4'te ayrıntılı olarak incelenebilir.)

Çizelge 3.9. Sürtünme katsayıları başlangıç değerleri-3

n	ε_B/d_{Bn}	$C_{f_{Bn}}$
1	$\frac{0,0063}{3} = 2,1 \cdot 10^{-3}$	0,0059
2	$\frac{0,0063}{3} = 2,1 \cdot 10^{-3}$	0,0059
3	$\frac{0,0063}{2,8} = 2,25 \cdot 10^{-3}$	0,0061
4	$\frac{0,0063}{2,8} = 2,25 \cdot 10^{-3}$	0,0061
5	$\frac{0,0063}{2,6} = 2,42 \cdot 10^{-3}$	0,0062
6	$\frac{0,0063}{2,4} = 2,625 \cdot 10^{-3}$	0,0063
7	$\frac{0,0063}{2,4} = 2,625 \cdot 10^{-3}$	0,0063
8	$\frac{0,0063}{2,4} = 2,625 \cdot 10^{-3}$	0,0063
9	$\frac{0,0063}{2} = 3,15 \cdot 10^{-3}$	0,0065
10	$\frac{0,0063}{2} = 3,15 \cdot 10^{-3}$	0,0065
Re	ε_A/d_A	C_{f_A}
5383.6	$1,25 \cdot 10^{-5}$	0,0092

Şekil 3.18. İterasyon tablosu-4

Şekil 3.19. İterasyon tablosu-4a

4. Tasarım için piston hızları:

$$u_{A1} = 3,858m/s$$

$$u_{A2} = 3,327m/s$$

$$u_{A3} = 2,795m/s$$

$$u_{A4} = 2,335m/s$$

$$u_{A5} = 1,874m/s$$

$$u_{A6} = 1,477m/s$$

$$u_{A7} = 1,139m/s$$

$$u_{A8} = 0,802m/s$$

$$u_{A9} = 0,465m/s$$

$$u_{A10} = 0,232m/s$$

3.2.8.4.Sönümleme süresi

4. Tasarım için yapılan iterasyon sonucunda pistonun ortalama hızı $u_{Ao} = 1,83$ m/s olarak hesaplanmıştır. Bu durumda sönümleme süresi:

$$s = u_{Ao} \cdot t_s$$

$$t_s = \frac{0,1}{1,83} = 0,0546 \text{ s' dir.}$$

Akış kanal kesiti arttırıldığında sönümleme süresi belirlenen koşullara uygun hale gelmiştir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1.Tasarımların Karşılaştırılması

Yapılan tasarımlara göre piston hızındaki değişim Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Tasarımların karşılaştırılması-1

Akış kanal sayısı (n)	1. Tasarım (bkz. Şekil 3.8)		2.Tasarım (bkz. Şekil 3.11)		3.Tasarım (bkz. Şekil 3.15)		4.Tasarım (bkz. Şekil 3.17)	
	L_{An} [mm]	u_A [m/s]	L_{An} [mm]	u_A [m/s]	L_{An} [mm]	u_A [m/s]	L_{An} [mm]	u_A [m/s]
1	20	0,514	30	0,514	25	0,519	12	3,858
2	40	0,346	40	0,346	45	0,328	25	3,327
3	60	0,197	65	0,197	55	0,177	30	2,795
4	80	0,115	80	0,115	75	0,094	40	2,335
5	90	0,057	90	0,057	85	0,047	46	1,874
6					90	0,019	58	1,477
7							65	1,139
8							78	0,802
9							86	0,465
10							92	0,232

Akış kanallarından çıkan hidrolik yağın son hızları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Tasarımların karşılaştırılması-2

Akış kanal sayısı (n)	1. Tasarım (bkz. Şekil 3.8)		2.Tasarım (bkz. Şekil 3.11)		3.Tasarım (bkz. Şekil 3.15)		4.Tasarım (bkz. Şekil 3.17)	
	L_{An} [mm]	u_B [m/s]	L_{An} [mm]	u_B [m/s]	L_{An} [mm]	u_B [m/s]	L_{An} [mm]	u_B [m/s]
1	20	92,668	30	92,680	25	94,036	12	94,364
2	40	92,453	40	92,462	45	93,732	25	94,320
3	60	90,836	65	90,956	55	92,839	30	94,152
4	80	92,199	80	92,199	75	91,483	40	94,108
5	90	92,199	90	92,199	85	89,952	46	93,914
6					90	88,871	58	93,714
7							65	93,677
8							78	93,678
9							86	93,130
10							92	93,071

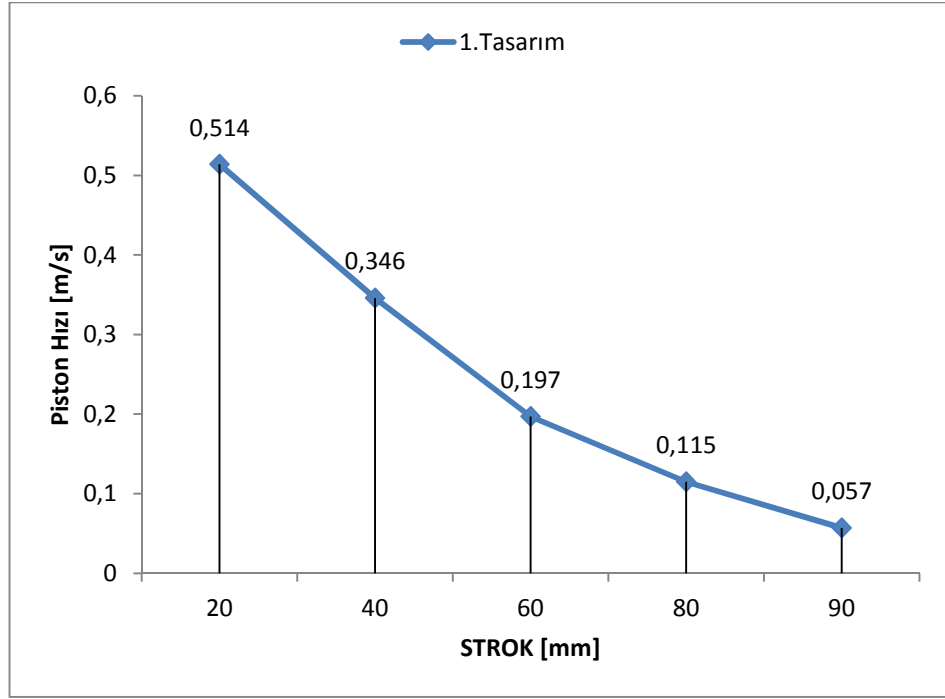
Çizelge 4.3.'te tasarımlara göre toplam akış kanal kesiti, ortalama piston hızları ve ortalama sönümlenme süreleri verilmiştir.

Çizelge 4.3. Tasarımların karşılaştırılması-3

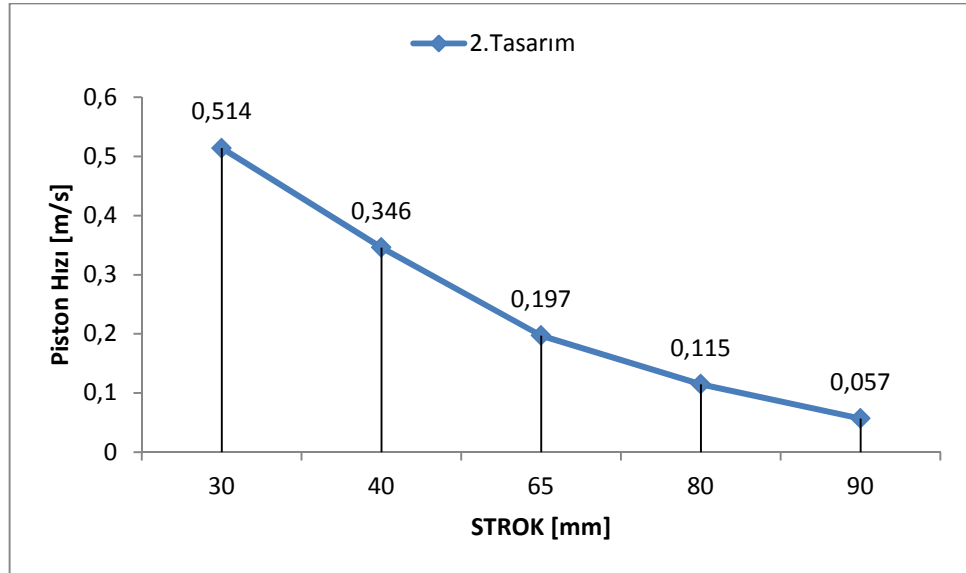
	1. Tasarım (bkz. Şekil 3.8)	2.Tasarım (bkz. Şekil 3.11)	3.Tasarım (bkz. Şekil 3.15)	4.Tasarım (bkz. Şekil 3.17)
A_T	6,95 mm ²	6,95 mm ²	6,95 mm ²	51,6 mm ²
u_o	0,246 m/s	0,246 m/s	0,197 m/s	1,83 m/s
t_s	0,406 s	0,406 s	0,506 s	0,0546 s

- ❖ 1.Tasarımda, minimum akış kanal kesitine göre akış kanal çapları ve geometriye göre kanallar arasındaki mesafe belirlenmiştir.
- ❖ 2.Tasarımda akış kanalları arasındaki mesafeler değiştirilmiş kanal çıkış hızlarında değişim olsa da piston ortalama hızında 1. Tasarıma göre büyük bir farklılık görülmemiştir.
- ❖ 3. Tasarımda akış kanal sayısı artırılmış ancak kesit sabit kaldığından sönümlenme süresinin arttığı görülmüştür.
- ❖ 2. ve 3. tasarımda amaç sönümlenme süresini kullanılan mekanizmaya göre uygun hale getirmek ve sönümlenme hızını (piston ortalama hızını) lineerleştirmektir.
- ❖ İlk üç tasarımdan elde edilen sonuçlara göre nihai tasarım oluşturulmuş ve kullanım yerinin sönümlenme süresine uygun bir basınç tüpü dizayn edilmiştir (4.Tasarım).
- ❖ Piston ortalama hızları, tasarımlara göre sırasıyla çizelge 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7 'deki grafiklerde verilmiştir. Nihai tasarımda (Çizelge 4.7) piston ortalama hızının lineere yakın olduğu görülmektedir.

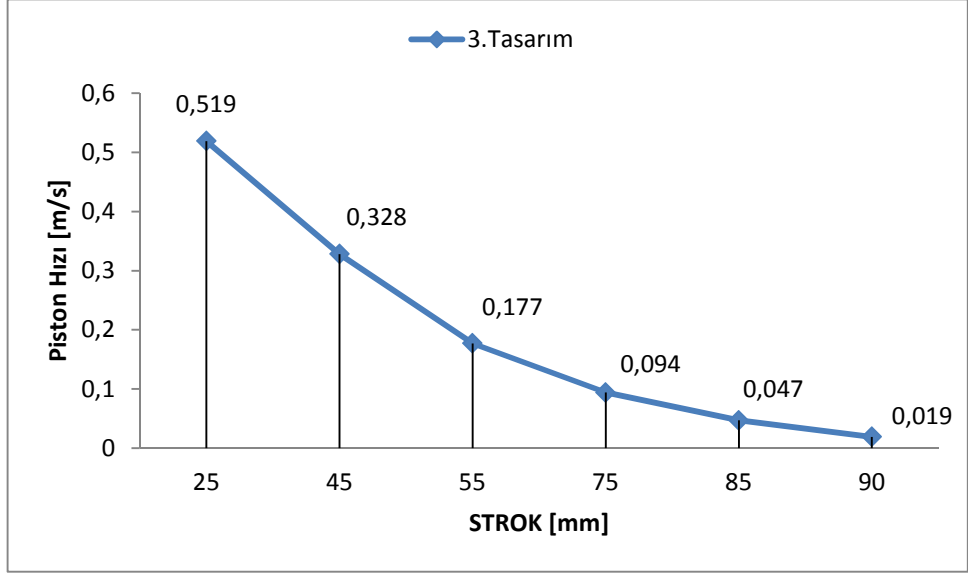
Çizelge 4.4. Hız grafiği-1



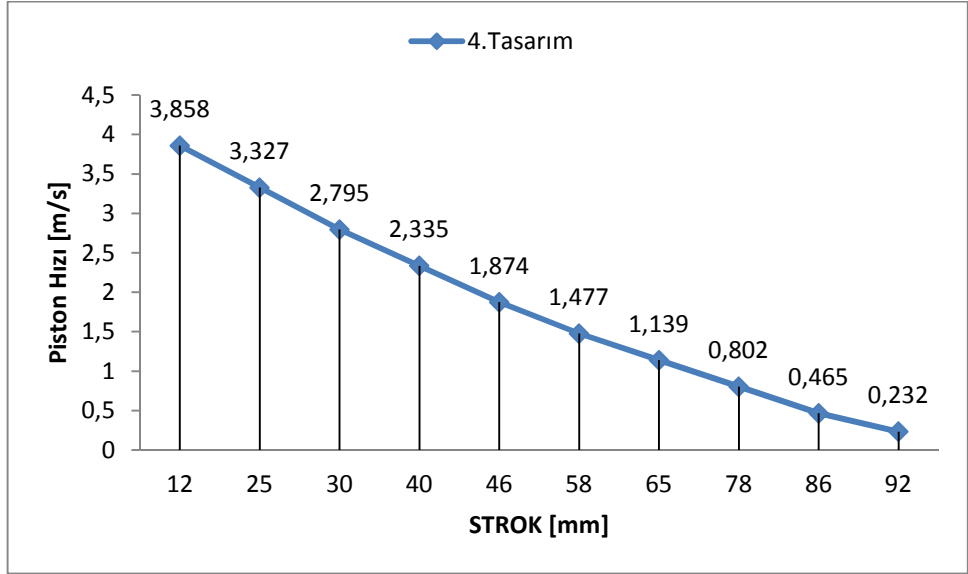
Çizelge 4.5. Hız grafiği-2



Çizelge 4.6. Hız grafiği-3



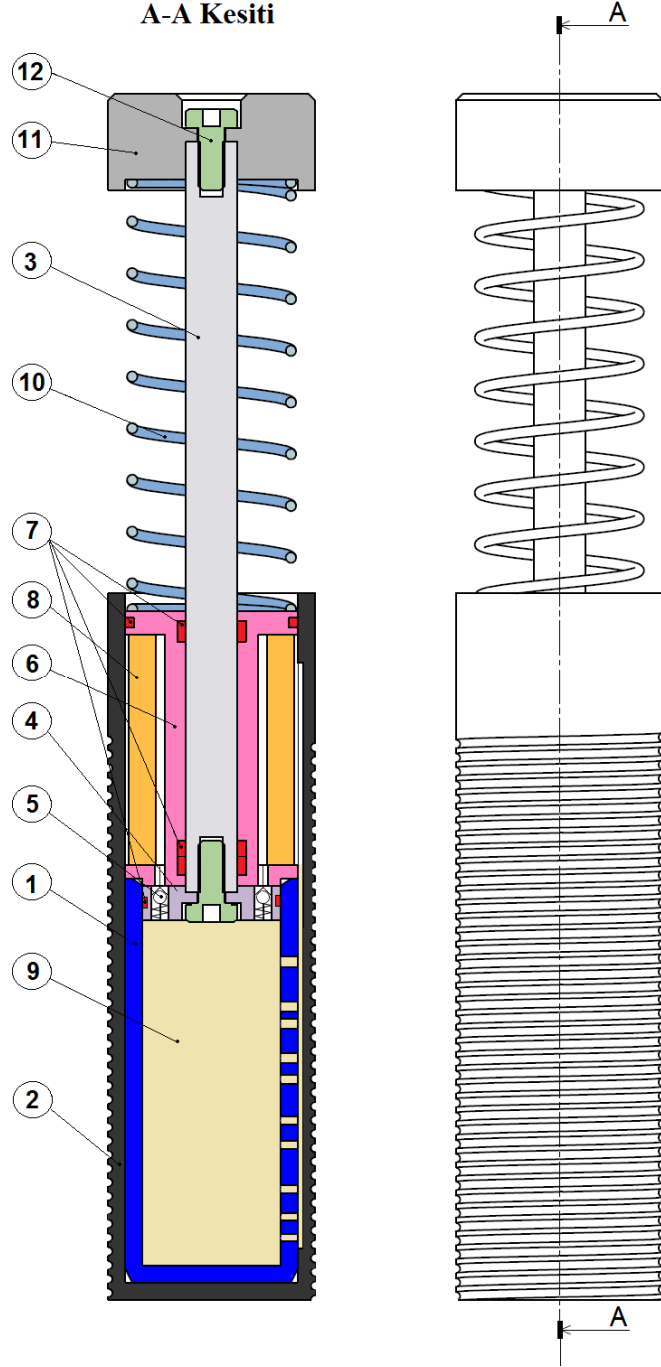
Çizelge 4.7. Hız grafiği-4



5. HAD ANALİZ ile BASINÇ DAĞILIMININ İNCELENMESİ

5.1.Nihai Tasarım

Darbe emiciyi oluşturan elemanlar ve açıklamaları Çizelge 5.1 'de, genel ve kesit görünümü Şekil 5.1' de verilmiştir.



Şekil 5.1. Tasarımın kesit ve genel görünümü

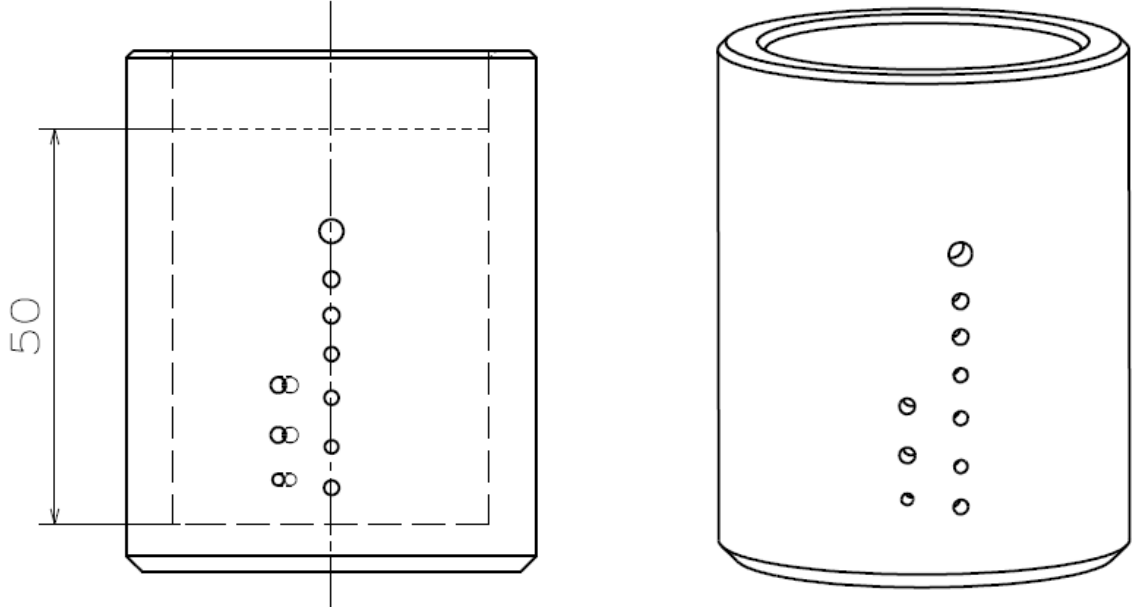
Çizelge 5.1. Parça indeksi

Parça No	Parça Adı	Fonksiyon
1	Basınç Tüpü	Sönümlenmenin gerçekleştiği, üzerinde akış kanalları bulunan, yüksek basınca dayanıklı, tek parçadan imal edilen çelik tüp.
2	Gövde	Vidalı dış yüzeyi sayesinde kullanıldığı mekanizmaya montaj kolaylığı sağlayan, yüksek mukavemet için tek parçadan imal edilen ve darbe emici elemanlarını içerisinde barındıran çelik dış gövde.
3	Mil	Burkulmalara karşı mukavim, dış yüzeyi parlatılmış, çelik mil.
4	Piston	Üzerinde akış delikleri bulunan çelik piston.
5	Bilyalı Çek-Valf	Boğaz yatağı haznesi ile basınç tüpü haznesi arasında akış yönünü kontrol eden valf.
6	Boğaz Yatağı	Mil ve gövde arasında yataklama elemanı vazifesi gören, aynı zamanda akış hacmi sağlayan çelik parça.
7	Sızdırmazlık Elemanları	Boğaz yatağı - gövde arasında ve mil - boğaz yatağı arasında bulunan sızdırmazlık elemanları içeriye toz girmesini ve dışarıya yağ sızmasını önleyen oring ve keçeler.
8	Genleşme Balonu	Negatif basınç etkisini azaltarak kavitasyonu önleyen, sıkışarak hazneler arasında basınç dengesini kuran EPDM sünger.
9	Hidrolik Yağ	Kanallar ve deliklerden geçerek kinetik enerjiyi ısı enerjisine dönüştüren sıkıştırılmaz akışkan.
10	Yay	Sönümlenmenin ardından endüstriyel darbe emiciyi başlangıç konumuna getirerek bir sonraki darbeye hazırlayan parça.
11	Tampon	Yükün ilk çarptığı, darbeyi mile ileten, kullanım yerine göre naylon, çelik veya üretan parça.
12	Cıvata	Piston ve tamponu mile sabitler.

Darbe emici üretimindeki en önemli faktör basınç tüpü üzerindeki akış kanallarıdır. Basınç tüpünün boyuna ve çapına göre diğer elemanların ölçüleri değişeceğinden darbe emicinin genel tasarımı basınç tüpü belirlendikten sonra yapılmıştır.

Başlangıçta hesaplamalarda ve tasarım geçişlerinde kolaylık sağlaması açısından darbe emicinin stroku 100 mm olarak belirlenmiş ve basınç tüpü buna göre oluşturulmuştur.

Akış kanal sayısı ve kanal kesiti hesaplanarak darbe emicinin stroğunu kullanım şartlarına göre belirlemek de mümkündür. Örneğin bir makinede kullanmak istediğiniz darbe emicinin stroğu 50 mm ile sınırlı ise akış kanalları arasındaki mesafe yeterli olmayacağından kanallar aksel olarak da kullanılabilir (Şekil 5.2). Ancak strok azaldığında darbe emicinin tepki süresinin artması gerektiği dikkate alınmalıdır.

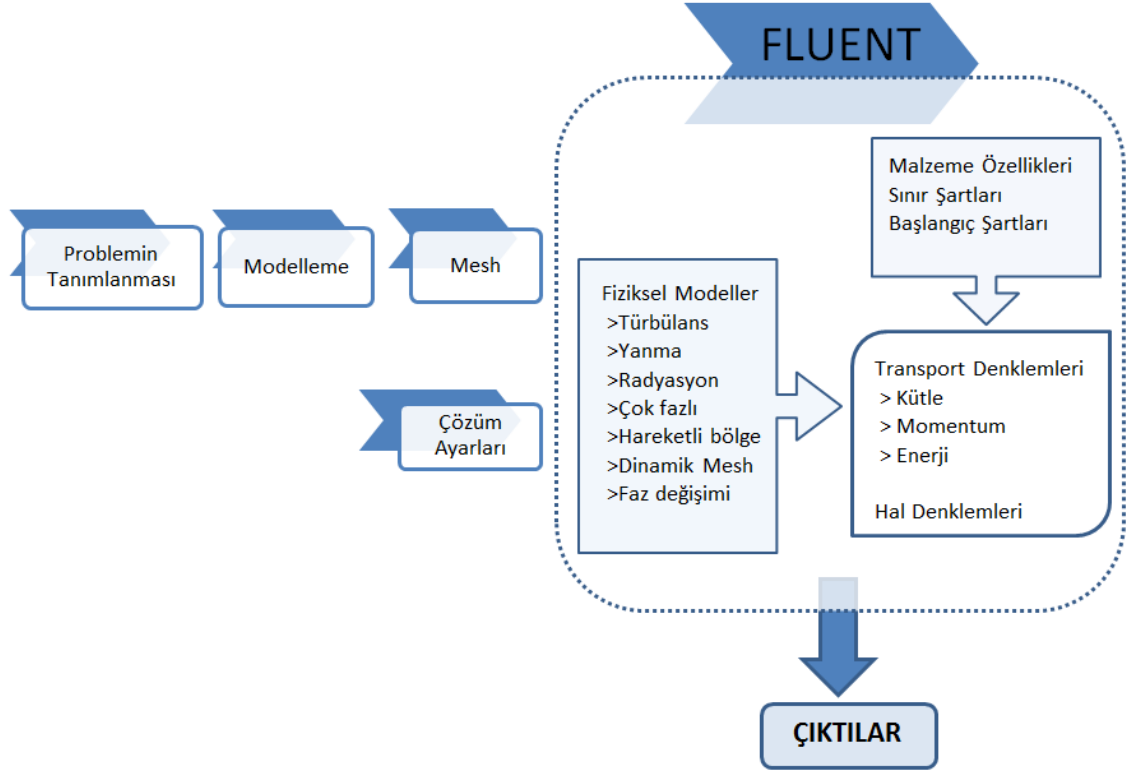


Şekil 5.2. Aksel akış kanalı uygulaması

5.2.Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Nihai Tasarımın Analizi

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) her türlü akışkanın farklı koşullardaki akışlarını analiz etmeye yarayan bir yöntemdir. Bu yöntemde temel olarak üç ana denklem (süreklilik, momentum ve enerji denklemleri) esas alınarak çözüm yapılır ve akış içerisindeki basınç, hız ve sıcaklık dağılımları gibi verilere ulaşılır.

Nihai tasarım olarak belirlenen basınç tüpü (bkz. Şekil 3.17) içerisindeki hidrolik yağın akış hareketini gözlemlemek için FLUENT paket programında HAD analizi yapılmıştır. HAD özet şeması Şekil 5.3'te verilmiştir. Analizin amacı basınç tüpü, akış kanalları ve transfer kanalında oluşan basınç dağılımını incelemektir.

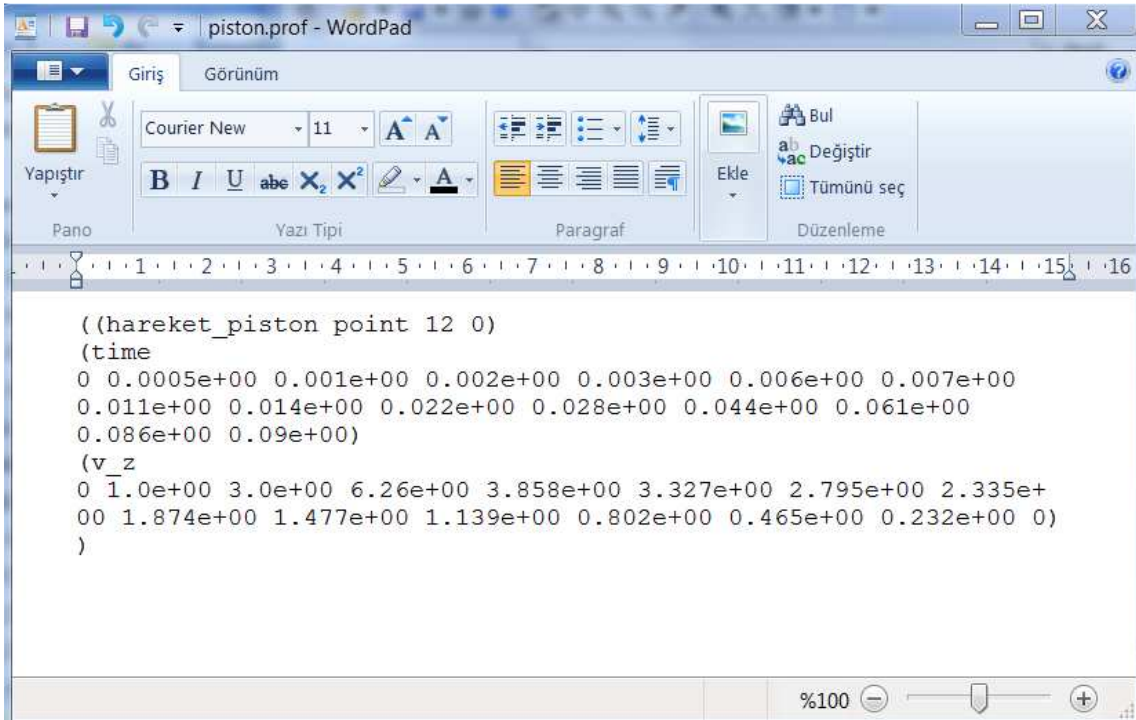


Şekil 5.3. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği özet şeması

5.2.1. Problemin tanımlanması

Problemin doğru tanımlanması HAD analizi için oldukça önemlidir. Piston basınç tüpü içerisine doğru hareket ettiğinde hidrolik yağ akış kanallarından dışarıya çıkarak transfer kanalına geçeceğinden problemde Dinamik Mesh kullanılmalıdır. Bu nedenle geometri, modelleme ve mesh FLUENT Dinamik Mesh aracına uygun olarak oluşturulmuştur.

Analitik çözüm sonucunda elde edilen *piston hızı - strok* eğrisinden (bkz Çizelge 4.7) *piston hızı - zaman* değerleri çekilmiştir. Zamana bağlı (transient) bir HAD analizi yapmak için elde edilen piston hızı-zaman değerlerini içeren bir profil dosyası oluşturulmuş ve FLUENT'e bu dosya okutularak çözüm yapılmıştır. Oluşturulan profil dosyası Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

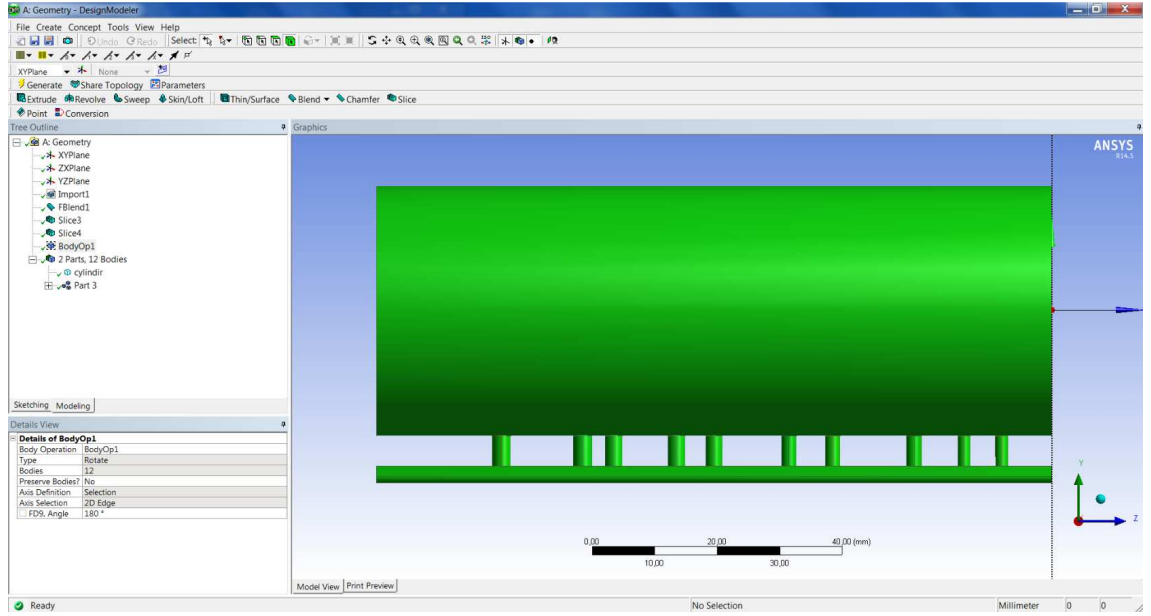


```
((hareket_piston point 12 0)
(time
0 0.0005e+00 0.001e+00 0.002e+00 0.003e+00 0.006e+00 0.007e+00
0.011e+00 0.014e+00 0.022e+00 0.028e+00 0.044e+00 0.061e+00
0.086e+00 0.09e+00)
(v_z
0 1.0e+00 3.0e+00 6.26e+00 3.858e+00 3.327e+00 2.795e+00 2.335e+
00 1.874e+00 1.477e+00 1.139e+00 0.802e+00 0.465e+00 0.232e+00 0)
)
```

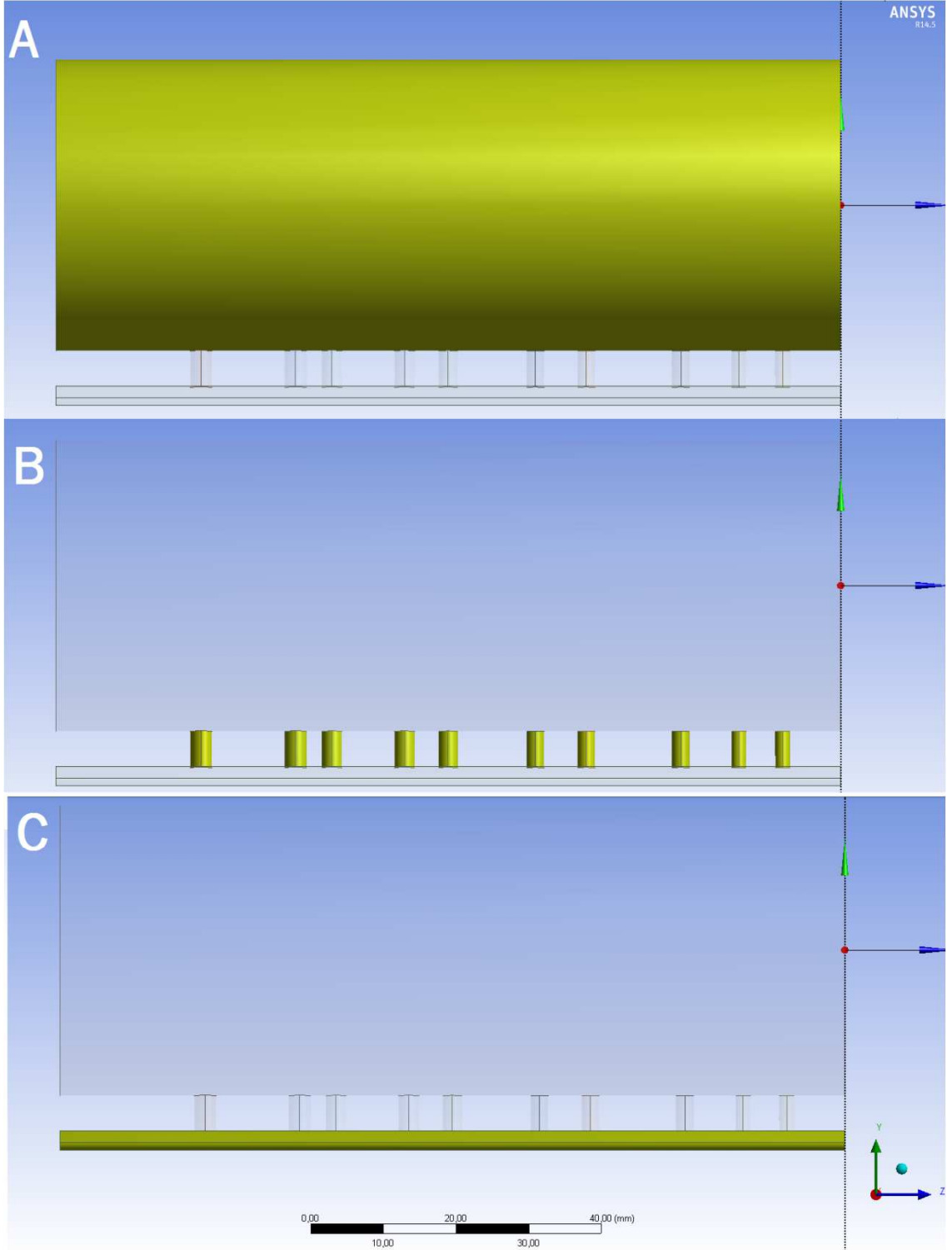
Şekil 5.4. Profil dosyası (Piston hızı – Zaman)

5.2.2. Modelleme

Akışkan hacmi CATIA'da tek parça şeklinde oluşturulmuş ve ANSYS DesignModeler ortamına aktarılmış ve geometri *fluid* olarak tanımlanmıştır (Şekil 5.5). Akış kanalları; basınç tüpü ve transfer kanalı yüzeylerinden *Slice* komutu ile ayrılmıştır. Akış kanalları giriş ve çıkışında kopukluk olmaması için bu işlemin *Slice by Surface* ile yapılması önemlidir. *Slice* işlemi sonucunda akış kanalları, transfer kanalı ve basınç tüpü birbirinden bağımsız parçalar haline gelmiştir (Şekil 5.6). Bu işlem ile geometrilere düzün mesh atma olanağı sağlanmıştır.

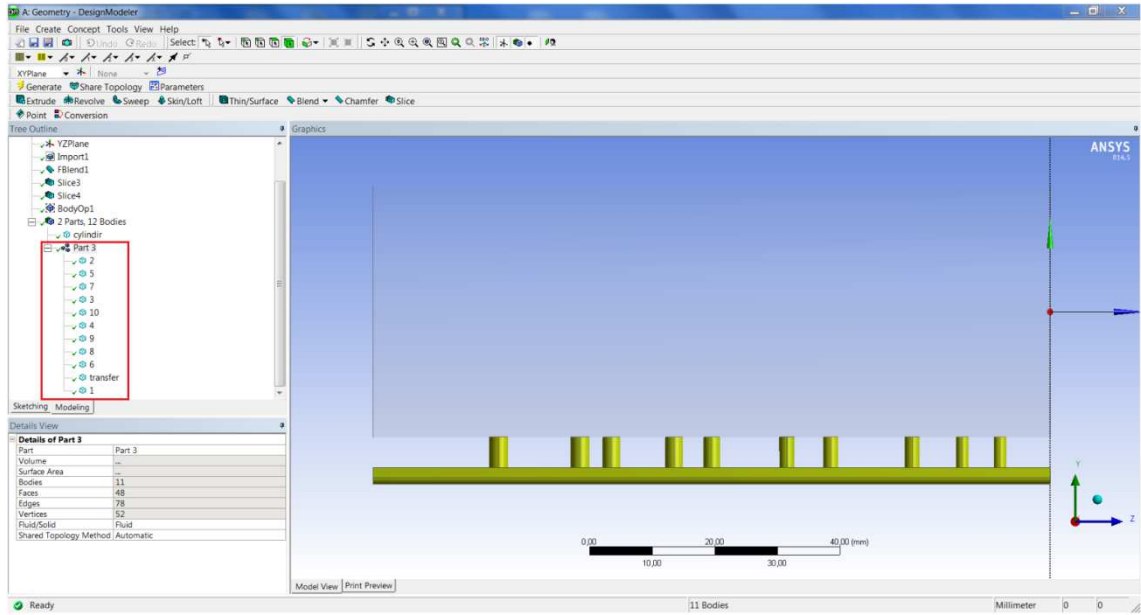


Şekil 5.5. Geometrinin Design Modeler'a aktarılması



Şekil 5.6. Geometrinin parçalara ayrılması (A- silindir, B- 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 Numaralı akış kanalları, C- Transfer kanalı)

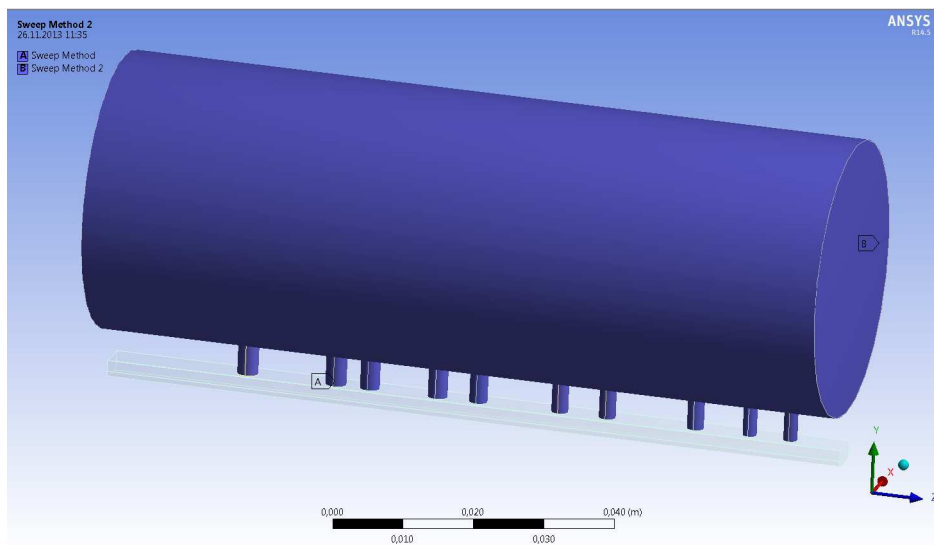
Transfer kanalı ve akış kanallarının örtüşme yüzelerinde (*interface*) akışın kopmaması için bu geometriler “form new part” komutu ile birleştirilmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Hareketli (cylinder) ve hareketsiz (transfer ve 1...10 numaralı kanallar) akış hacminin oluşturulması

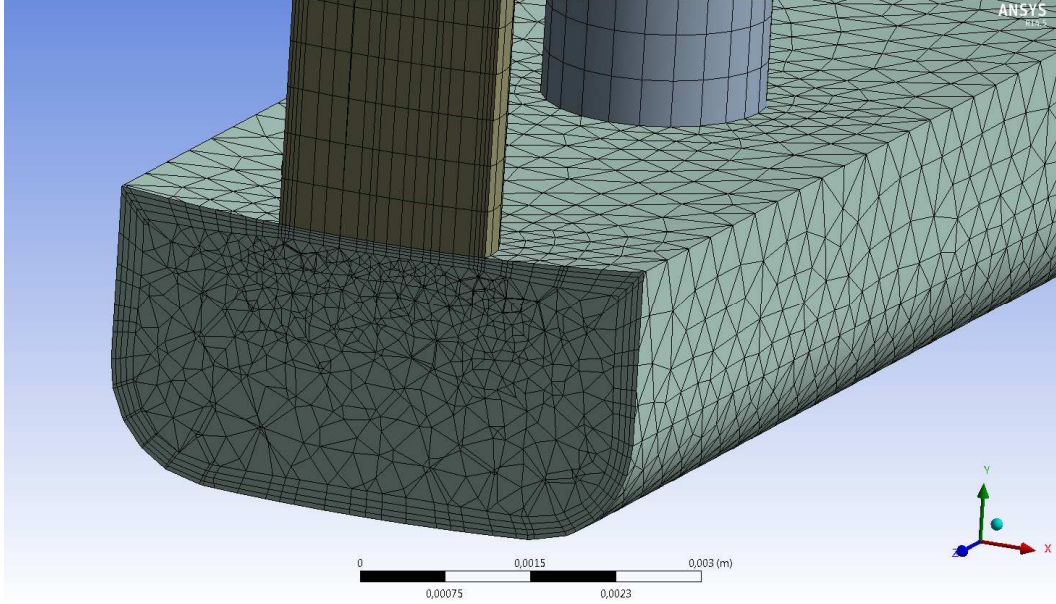
5.2.3. Mesh

Design Modeler’da oluşturulan model ANSYS MESH bileşenine aktarılmıştır. Akış kanalları ve basınç tüpü içerisindeki hacime *Sweep Method* uygulanmıştır (Şekil 5.8).



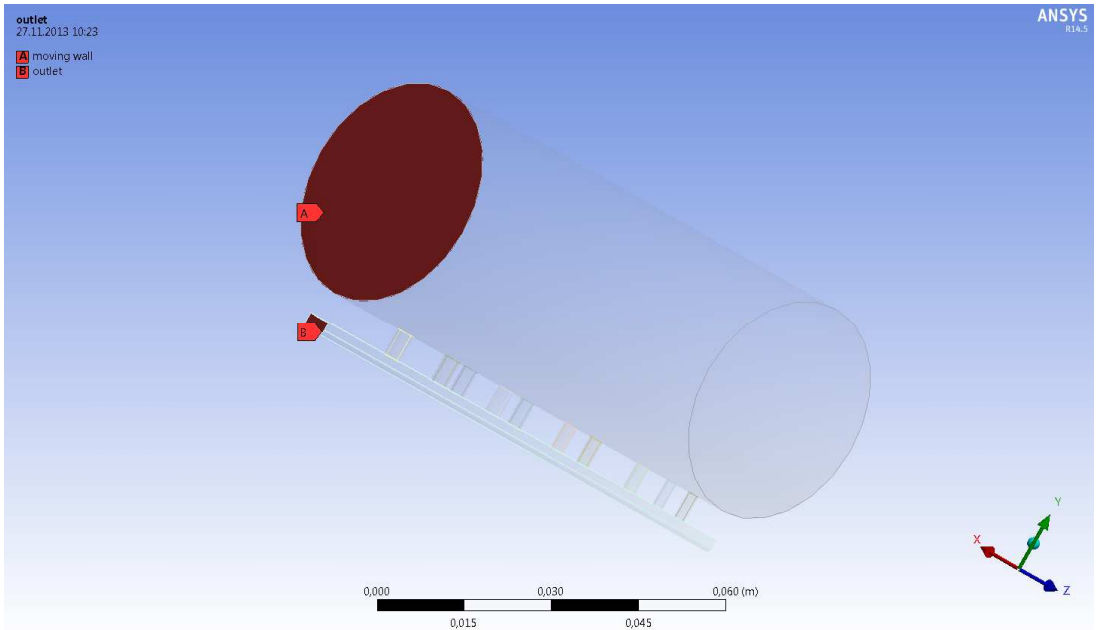
Şekil 5.8. Sweep Method

Akış kanalları ve transfer kanalına *inflation* tanımlanarak sınır tabaka oluşturulmuştur. Nodların örtüşmesi için ise *Patch Conforming Method* uygulanmıştır. Şekil 5.9’da sınır tabakaların ve örtüşen nodların görünümü verilmiştir.



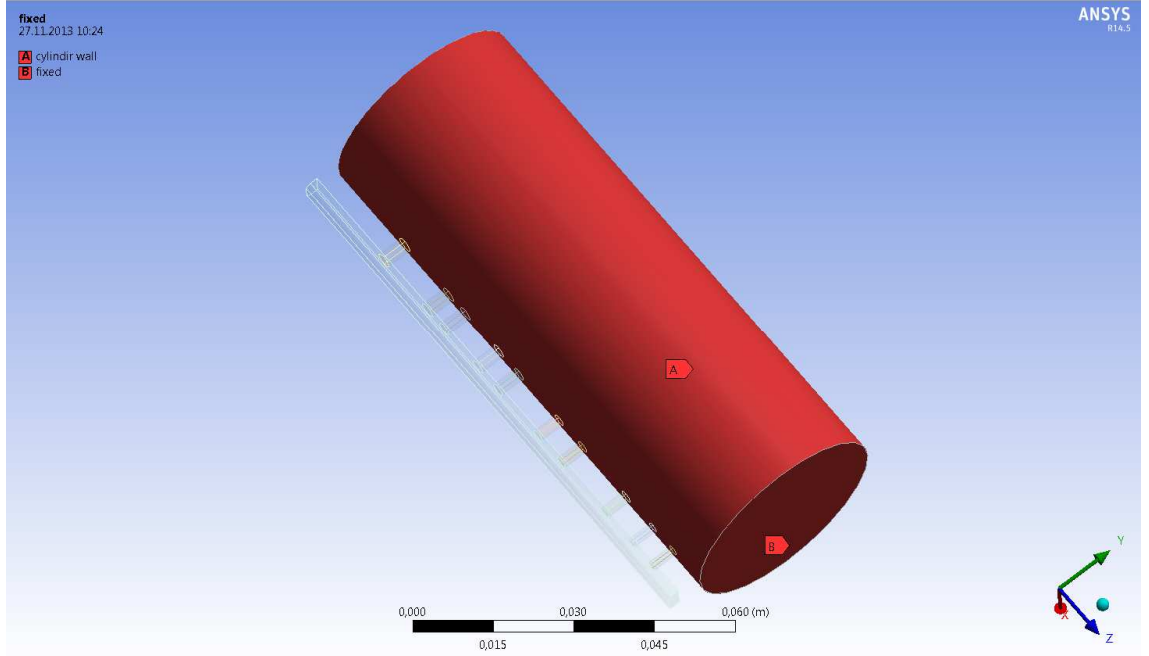
Şekil 5.9. Sınır tabaka ve örtüşen nodların görünümü

Piston ilerledikçe basınç tüpü içerisindeki yağ hareket edeceğinden piston yüzeyi *moving wall*, transfer kanal çıkışı ise *outlet* olarak isimlendirilmiştir (Şekil 5.10).

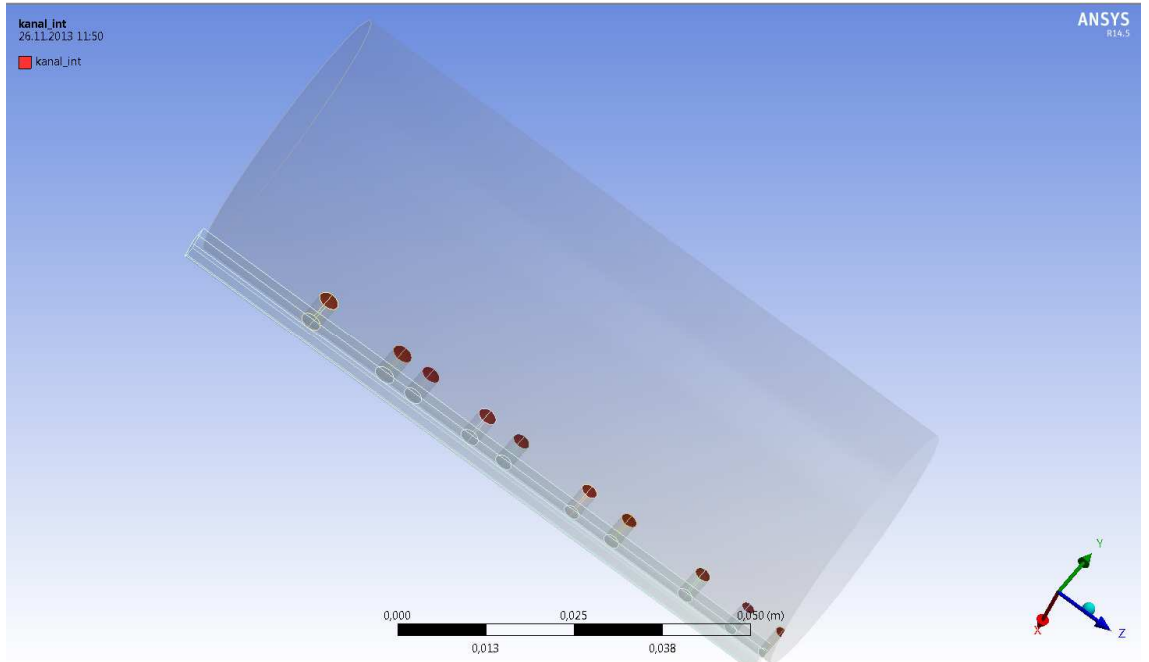


Şekil 5.10. Name Selection-1

Hareketli ve hareketsiz akış hacimlerini ayıran yüzey (*interface*) *cylindir wall*, sabit yüzey ise *fixed* olarak isimlendirilmiştir (Şekil 5.11). *Cylindir wall* ile konuşan akış kanal yüzeyleri *kanal_int* olarak adlandırılmıştır (Şekil 5.12).

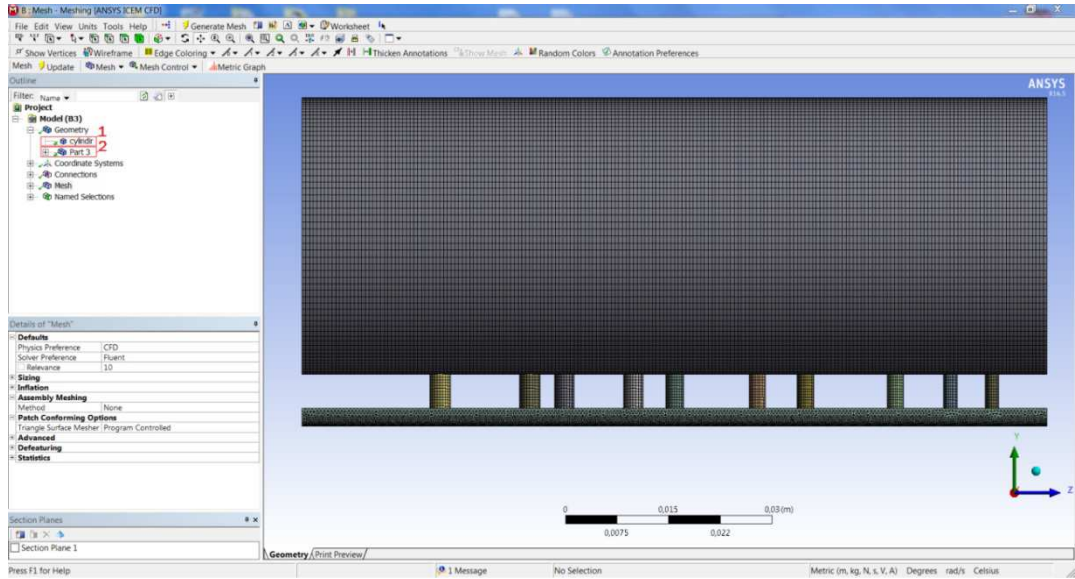


Şekil 5.11. Name Selection-2



Şekil 5.12. Name Selection-3

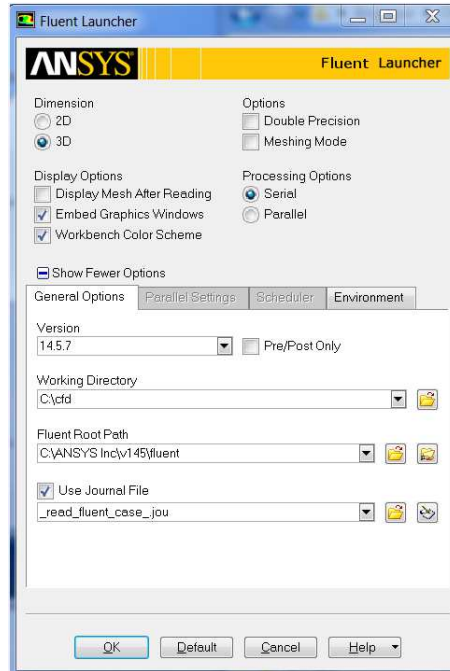
Mesh hazırlandığında, hareketli meshi oluşturan *cylinder* ve sabit hacim (akış kanalları ve transfer kanalı) iki ayrı “.msh” uzantılı dosya olarak kaydedilmiştir (Şekil 5.13).



Şekil 5.13. Mesh dosyalarının ayrı ayrı kaydedilmesi

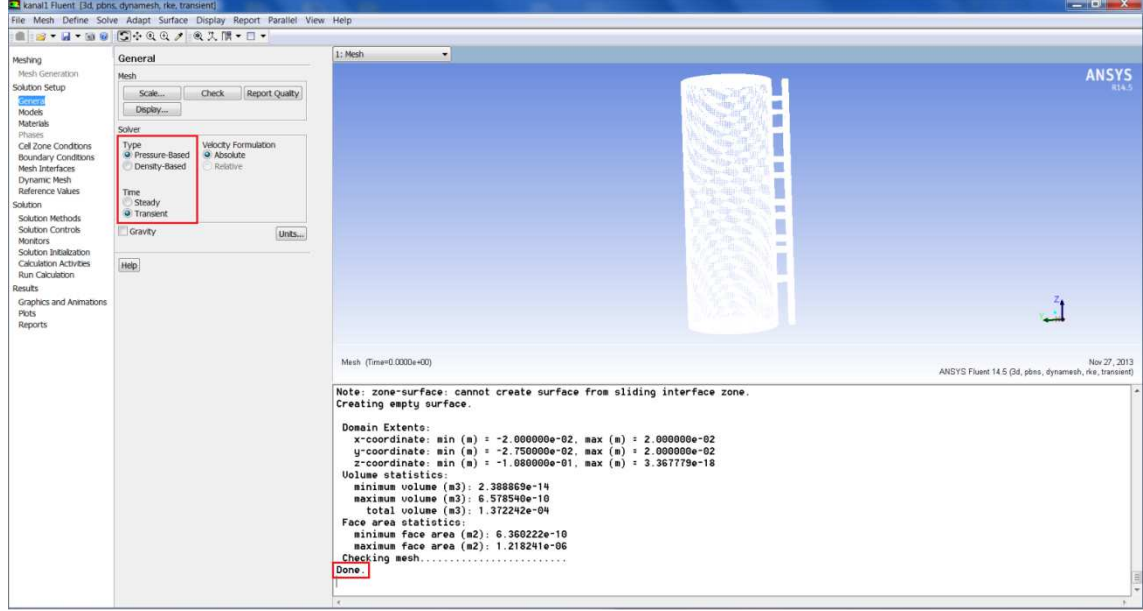
5.2.4. FLUENT ile HAD analizi

Fluent açılış ekranında problemin çözümü 3D olarak seçilmiş ve çözüm dosyalarının kayıt edileceği yer belirlenmiştir (Şekil 5.14).



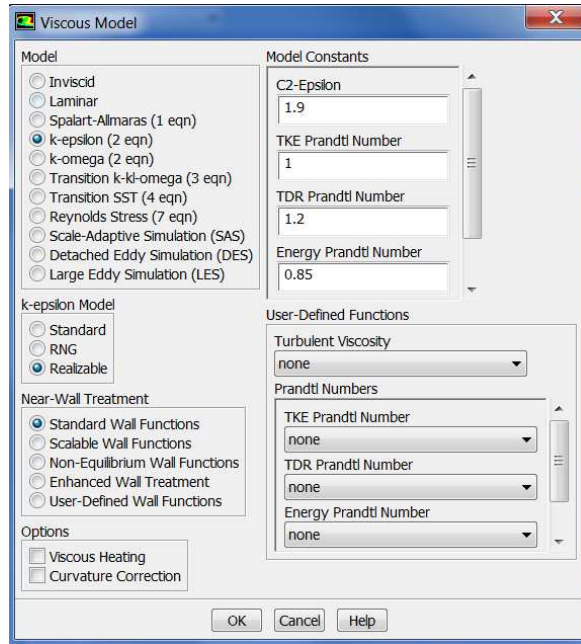
Şekil 5.14. Fluent açılış ekranı

Açılış ekranından sonra program açılarak çalışma dosyası içerisine ayrı ayrı kaydedilen .msh uzantılı dosyalar programa okutulmuştur. Mesh menüsünden *check* işlemi yapılmış ve ağ yapısında hata olup olmadığı kontrol edilmiştir. Şekil 5.15'te verilen FLUENT arayüzünde alan ve hacim değerlerinin pozitif olduğu görülebilir.



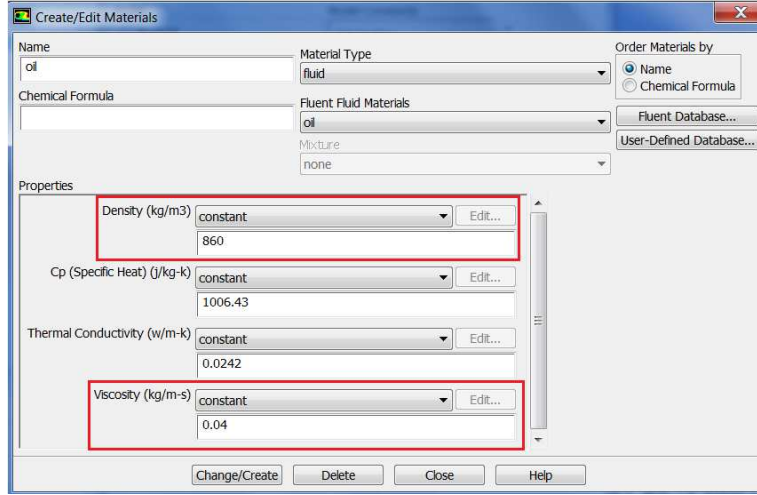
Şekil 5.15. Çözüm ayarları ve mesh kontrolü

HAD Analizi çözümü için akış şekli Viscous Model / k-epsilpn (2 eqn) olarak seçilmiştir (Şekil 5.16).



Şekil 5.16. Akış modeli seçimi

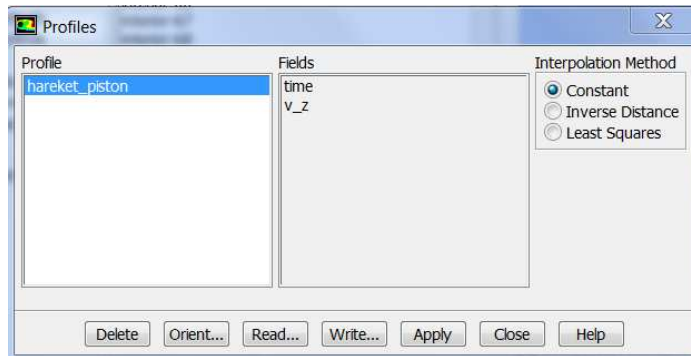
Analitik çözümde kullanılan akışkan özelliklerine göre akışkanın tanımı *Material* sekmesinde oluşturulmuştur (Şekil 5.17). Akışkan sabit yoğunluklu ve sabit viskoziteli olarak tanımlandığından enerji denklemi çözüme dahil edilmemiştir.



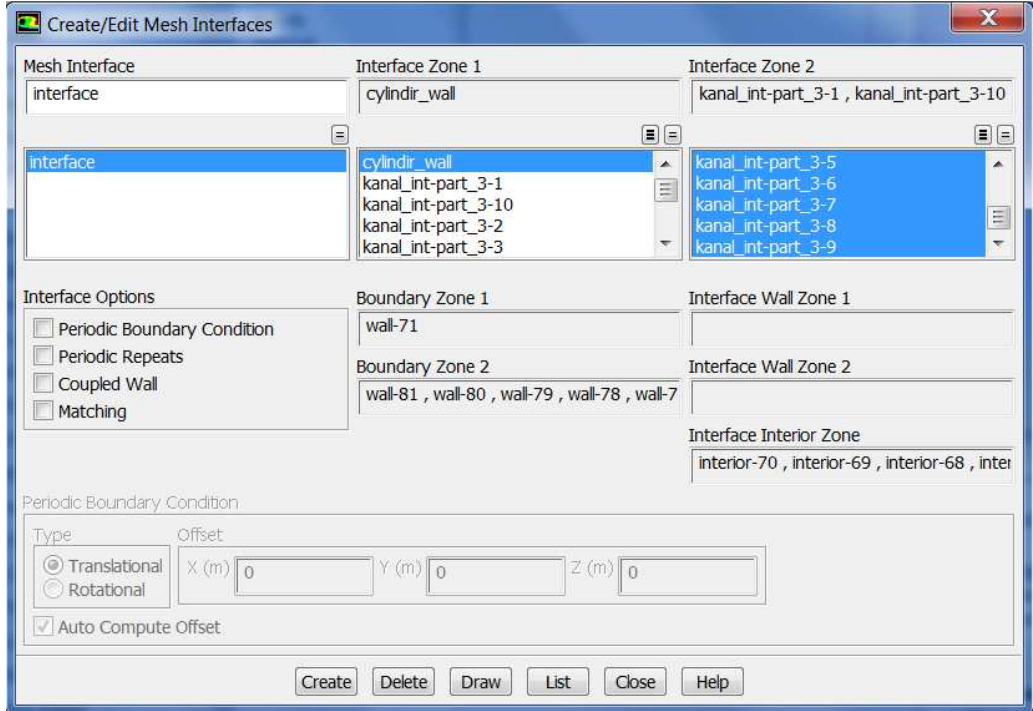
Şekil 5.17. Akışkanın tanımlanması

Sınır şartlarının belirlenmesinde *Boundary Conditions* komutu kullanılır. Akışın olduğu yüzeyler *interior*, sabit yüzeyler *wall* ve transfer kanal çıkışı (bkz. Şekil 5.10) *pressure outlet* olarak tanımlanmıştır. *Outlet* sınır koşulu, 3 Bar (analitik çözümdeki çıkış basıncı) olarak girilmiştir. Piston hızı - zaman değerleri olarak belirlenen sınır koşulu, *Boundary Conditions* altında bulunan *Profiles* sekmesinde Şekil 5.18'deki gibi görülebilir.

Mesh Interface komutu altında arayüz (*interface*) seçimi yapılmıştır. *Cylindir_wall* olarak adlandırılan yüzey ile her bir akış kanalının *kanal_int* yüzeyleri arasındaki bağlantı Mesh Interface komutu ile sağlanmıştır (Şekil 5.19). Böylece FLUENT'e okutulan iki ayrı .msh uzantılı dosya arasındaki bağlantı *Mesh Interface* ile kurulmuştur.

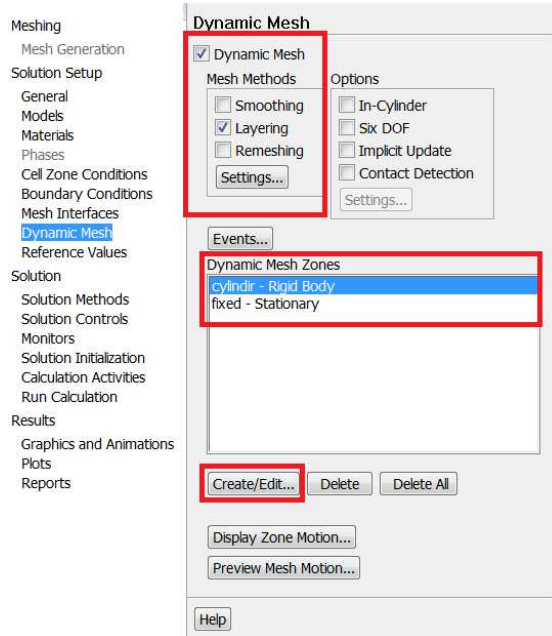


Şekil 5.18. Profil dosyasının FLUENT'te görünümü



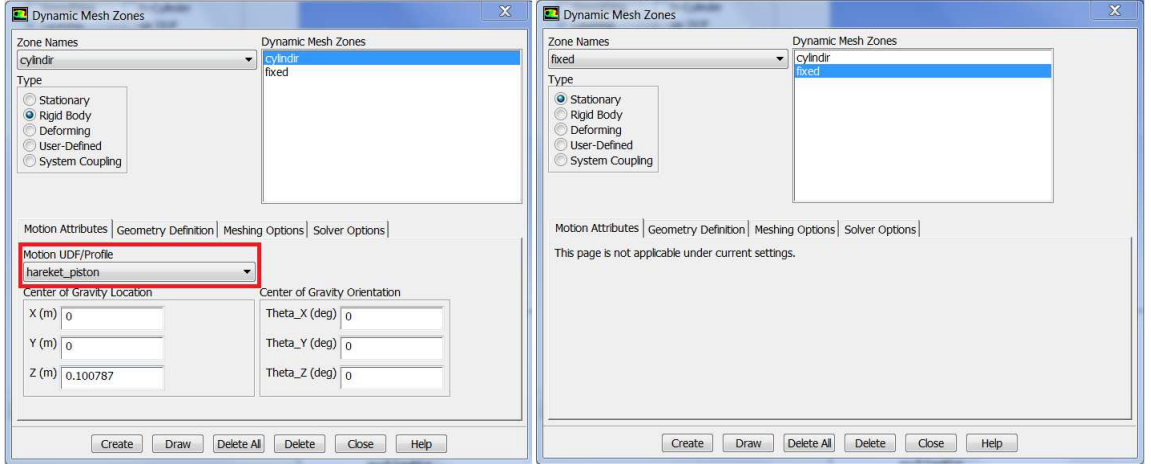
Şekil 5.19. Mesh Interface

Hareketli Meshi tanımlamak için *Dynamic Mesh* sekmesi açılmış ve problemin çözümünde *Layering* metodu kullanılmıştır. Şekil 5.20'de gösterildiği gibi *Create/Edit* ile hareketli mesh bölgesi tanımlanmıştır.



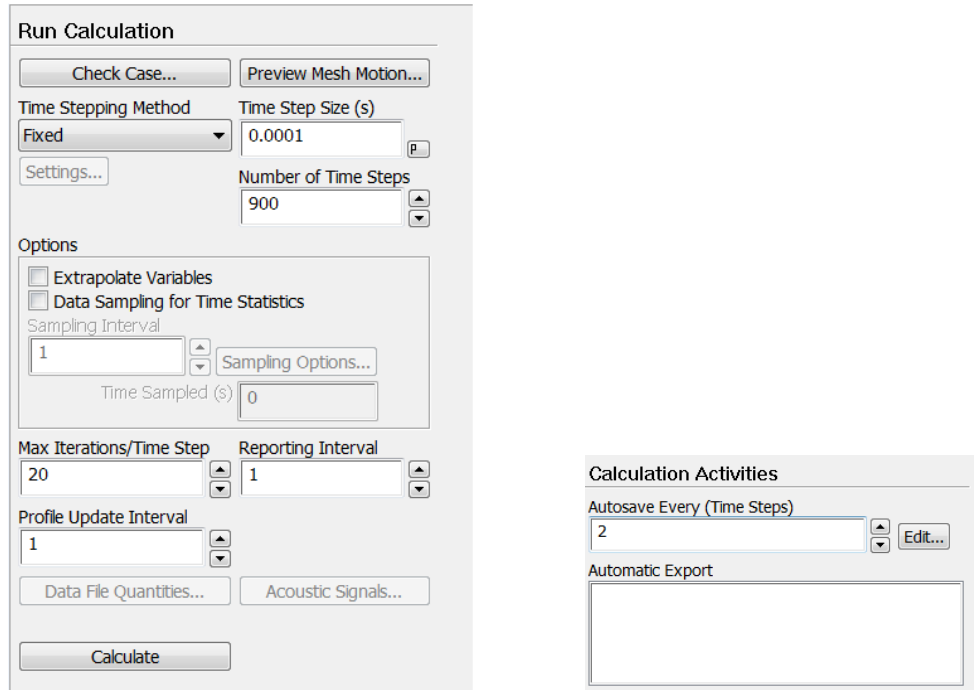
Şekil 5.20. Dinamik Mesh

Hareketli mesh, *cylinder* → *Rigid Body - Motion Attributes/Profile/ hareket_piston.prof*
 Sabit yüzey, *fixed* → *Stationary* olarak tanımlanmıştır (Şekil 5.21).



Şekil 5.21. Dinamik Mesh-2

Son olarak problemin çözümü için iterasyon parametreleri ve zaman adımları belirlenmiştir. Problemin çözümü çok kısa sürelerde (0,09s) gerçekleştiği için çözümler de kısa aralıklarla (her 2 time step) kaydedilmiştir. *Run Calculation* sekmesi altında *Check case* komutu ile çözüm adımları kontrol edilmiş ve *calculate* ile çözüm başlatılmıştır (Şekil 5.22).



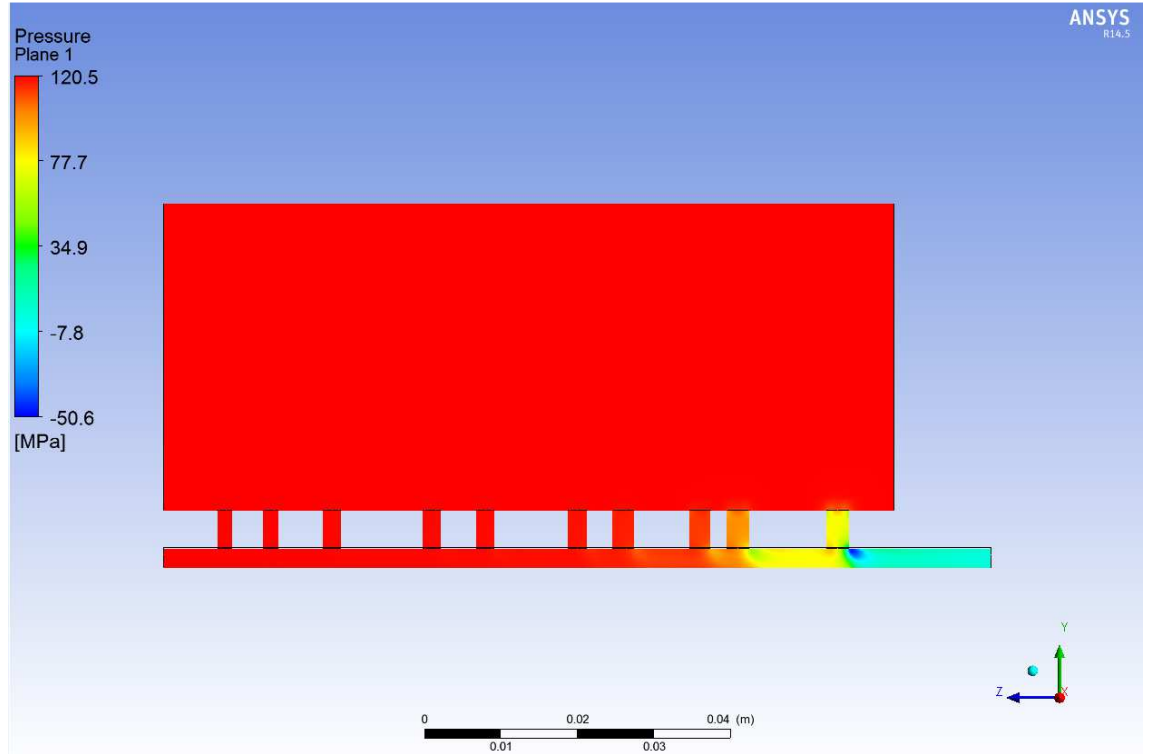
Şekil 5.22. Çözüm ayarları ve çözüm dosyalarının kaydedilmesi

FLUENT programı açılış ekranında tanıtılan çalışma dosyası içerisine *.cas* ve *.dat* uzantılı çözüm dosyalarını kaydetmiştir. 8GB RAM ve I7 işlemciye sahip bir iş istasyonunda yapılan problemin çözümü 9 saat sürmüştür. Çözüm süresinin uzaması *Serial* çözüm yapılmasından kaynaklanmaktadır (bkz Şekil 5.14). Ancak çözüm dosyalarının boyutu 37,5 GB olduğu düşünülürse *Parallel* çözüm yapılsa bile çözüm süresi maksimum 4-5 saate inebilir.

5.2.5. Analiz sonuçları

FLUENT programı bir HAD çözüm aracı olduğundan programın hesapladığı değerleri görüntülemek için ANSYS CFD POST bileşeni kullanılmıştır. Sonuçları yorumlamak için bu yazılıma çalışma dosyasındaki *.dat* uzantılı çözüm dosyası aktarılmıştır.

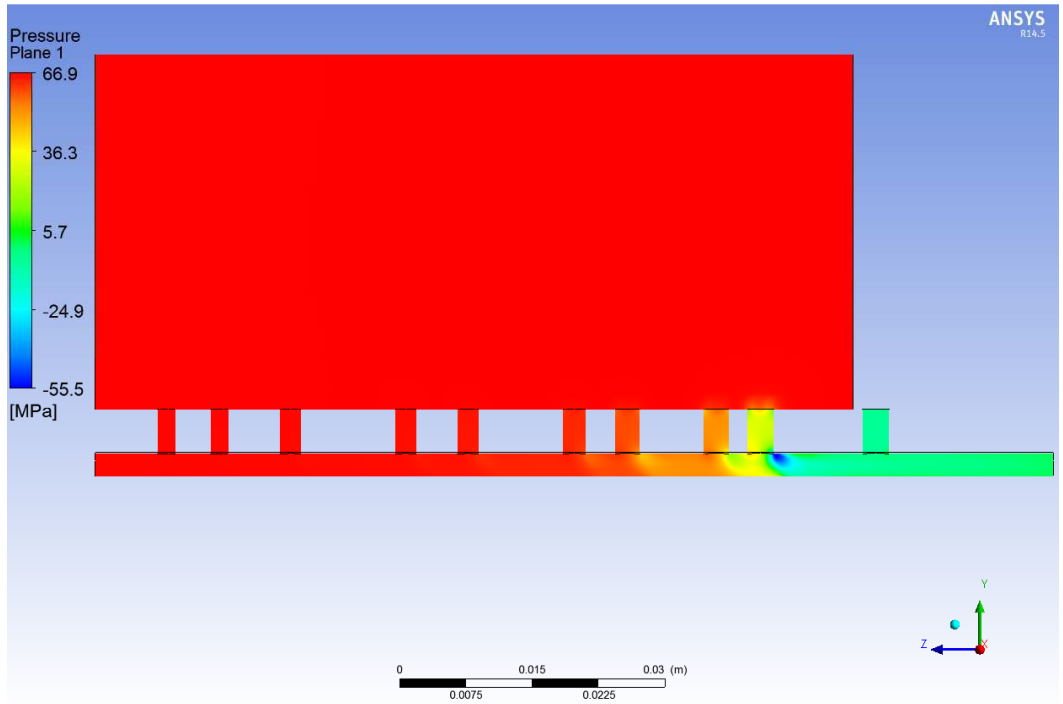
Hareket başladığında (Piston hızı 3,858 m/s) maksimum basıncın 120,5 MPa olduğu görülmektedir (Şekil 5.23).



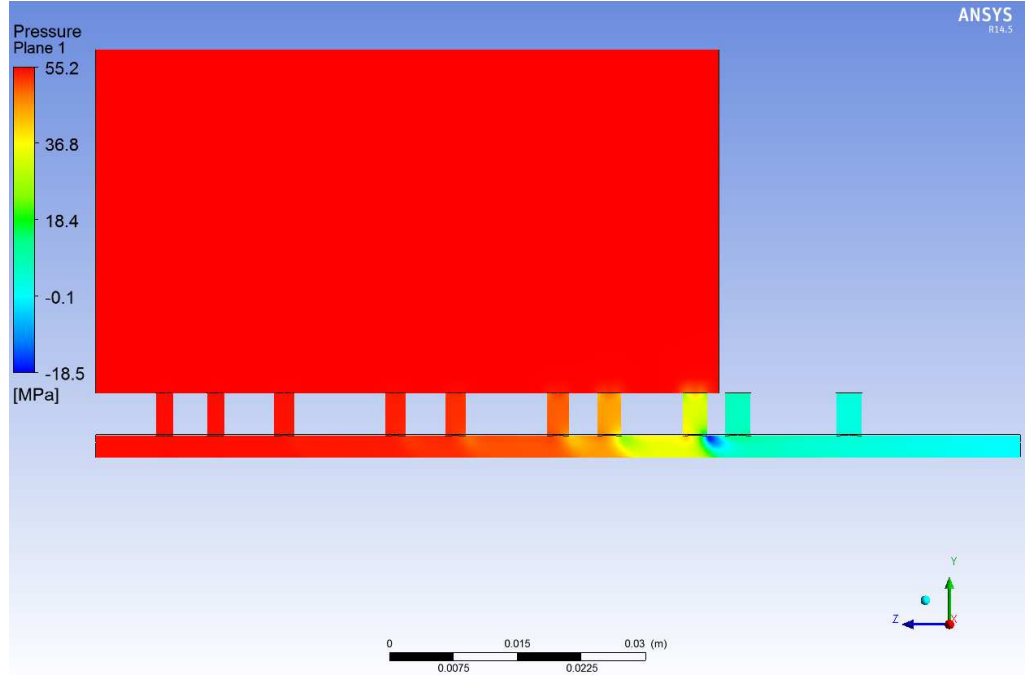
Şekil 5.23. Pistonun ilk hareketi esnasında oluşan basınç

Piston yan yüzeylerinin akış kanallarını kapatması programa Mesh Interface ile yansıtılmıştır. Profil dosyasında verilen hız-zaman değerlerine göre piston ilerledikçe *cylindir* ile akış kanalları arayüzey bağlantısı sırasıyla kopmaktadır. Akış kanal çıkışında oluşan negatif basınç bölgesi kavitasyon açısından oldukça risklidir. Kavitasyon riskini azaltmak için akış kanal delikleri havşa olarak açılabilir.

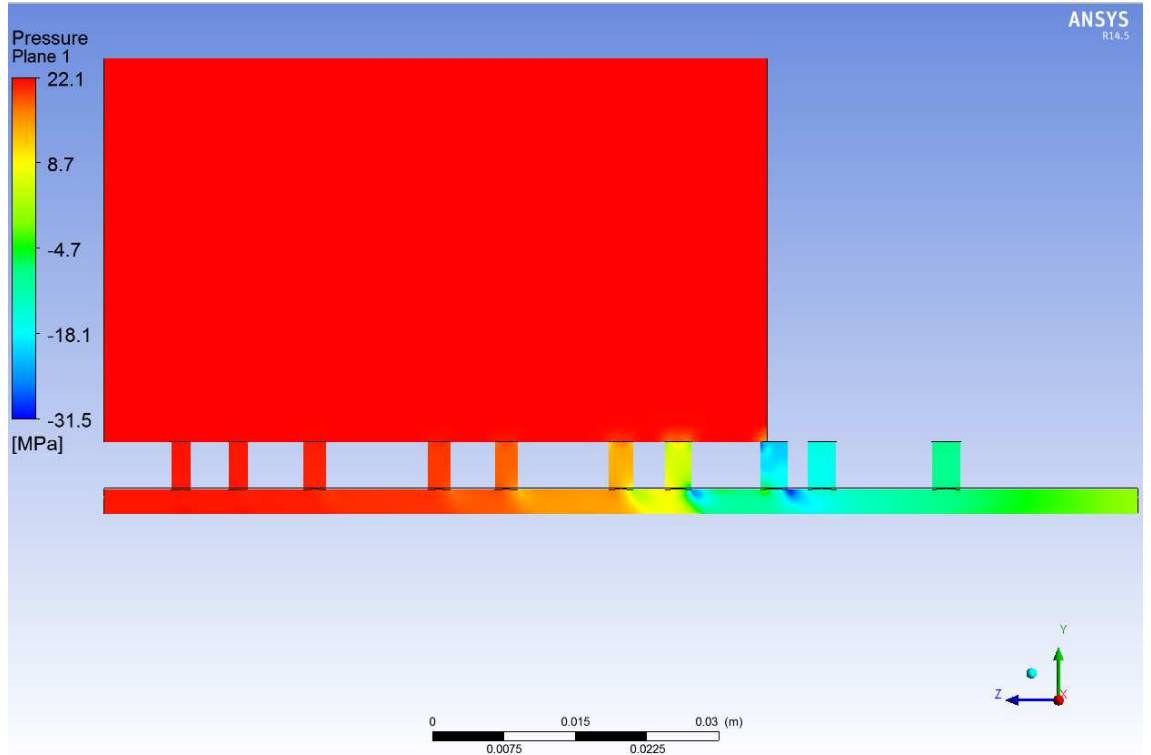
1. akış kanalı kapandığında maksimum basıncın 120,5 MPa'dan 66,9MPa'a, 2. Akış kanalı kapandığında ise 55,2 MPa'a düştüğü görülmektedir (Şekil 5.24, 5.25). Piston ilerledikçe sönümlenme gerçekleştiğinden, basıncın düşmesi problemin çözüm yolunun doğru olduğunu göstermektedir.



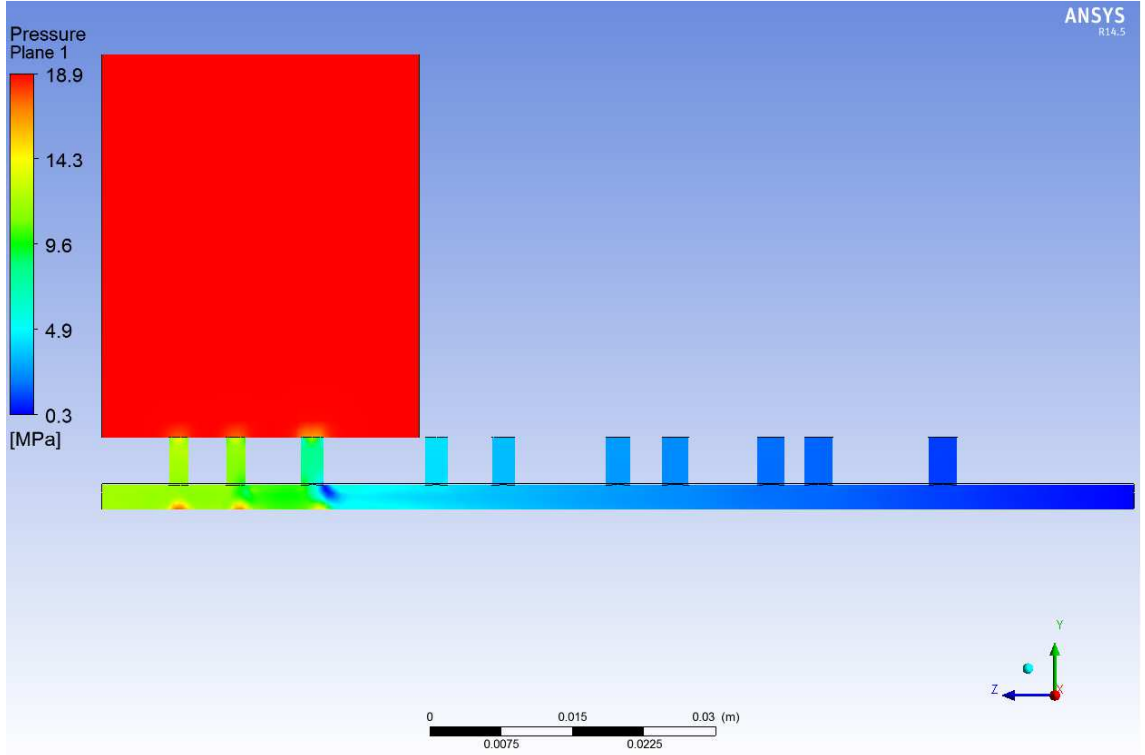
Şekil 5.24. 1.Akış kanalı kapandığında oluşan basınç



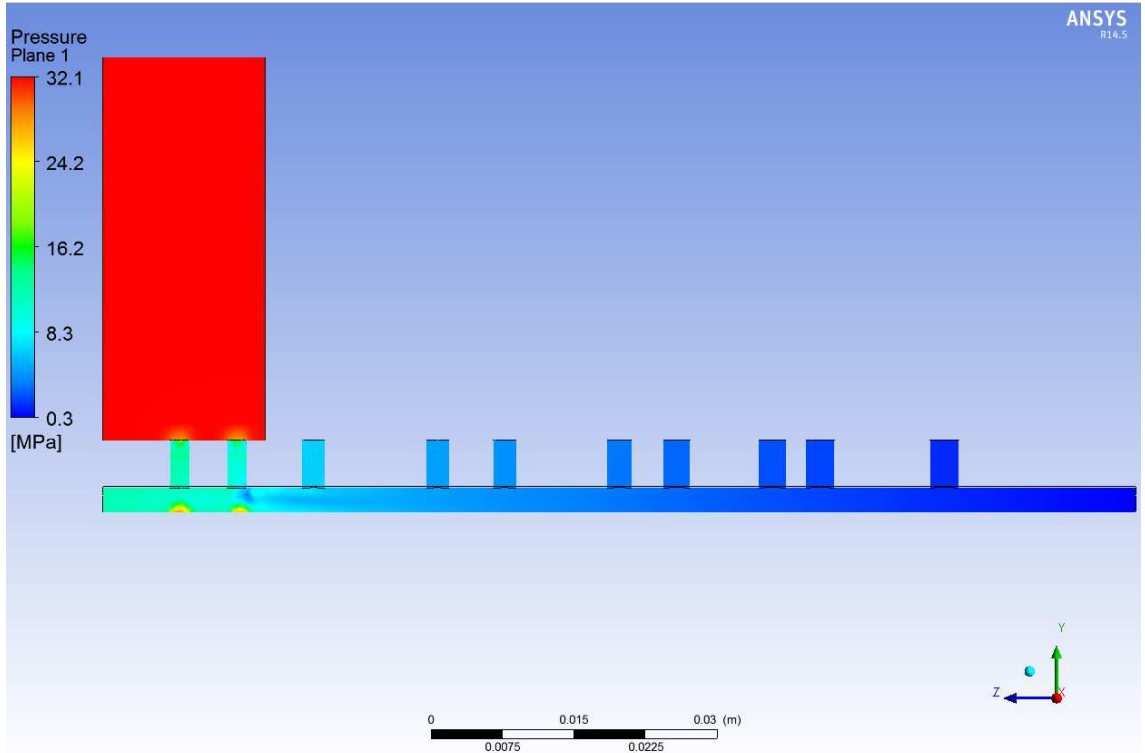
Şekil 5.25. 2.Akış kanalı kapandığında oluşan basınç



Şekil 5.26. 3.Akış kanalı kapanırken oluşan basınç



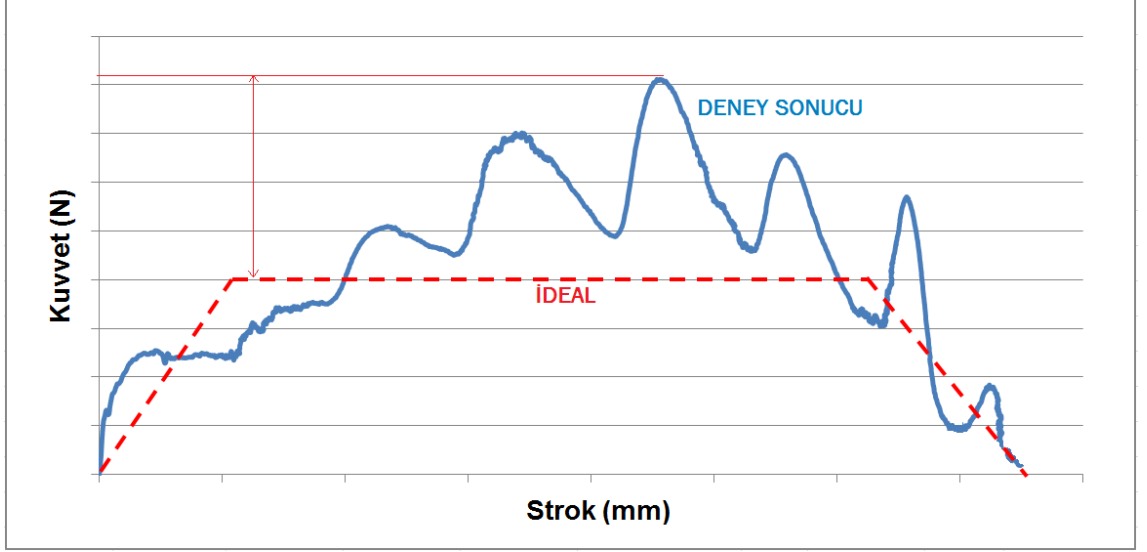
Şekil 5.27. 7.Akış kanalı kapandığında oluşan basınç



Şekil 5.28. 8.Akış kanalı kapandığında oluşan basınç

6. SONUÇ

Analitik çözüm ve HAD çözümü ardından sonuçların doğru şekilde yorumlanabilmesi için delikli akış kanallarına sahip bir endüstriyel darbe emiciye düşme testi yapılmıştır. Analitik çözüm yöntemine göre bir darbe emici tasarımı yapılırsa gerçekte kuvvet-strok grafiği Şekil 6.1'deki gibi olacaktır. İdeal olarak verilen lineer eğri analitik sonuçları temsil etmektedir.



Şekil 6.1. Deney sonucu ile ideal eğrinin karşılaştırılması

HAD çözüm yönteminde ve analitik çözümde hidrolik akışkanın yoğunluğu ve viskozitesi sabit olarak alınmıştı fakat yüksek darbe kuvvetleri ve tekrarlı yüklemelerde sıvının davranışı değişeceğinden akış kanalları hesabı ideale (analitik yöntem) göre yapılmalıdır.

Analitik çözümlerde enerjinin korunumuna göre hesaplanan darbe kuvveti ile deney sonuçlarında okunan maksimum kuvvet arasında yaklaşık 2 kat (2,007) fark olduğu görülmüştür. Bu fark emniyet katsayısı olarak düşünülebilir. Çünkü darbe emici içerisindeki hidrolik yağ her ne kadar sıkıştırılmaz sıvı olarak kabul edilse de darbe anında sıvının davranışı değişebilir.

Basınç tüpünün cidar kalınlığı içeride oluşan maksimum basınca göre (HAD yöntem) belirlenmeli ve emniyet açısından tek parçadan imal edilmelidir.

HAD analiz sonuçlarına göre basıncın negatif olduğu bölgelerde tasarımda değişikliğe gidilerek basınç tüpü üzerine açılan akış kanallarının şekli değiştirilebilir.

FLUENT'te akışkana ani hız verildiğinde hidrolik sıvı akış kanallarından geçememiş, basınç tüpü içerisine geri tepmiş ve basınç çok yüksek değerlere çıktığı için çözüm hata vermiştir. Bu nedenle piston hızı profil dosyasından da görüleceği gibi önce 0 m/s'den 6,26m/s'ye çıkarılmış daha sonra analitik çözümde elde edilen değerler kullanılmıştır. HAD analiz çözümünü gerçeği temsil etmesi için hidrolik akışkanların darbe altındaki davranışı incelenebilir ve problem darbe anına göre modellenebilir.

Bu tez çalışması kapsamında verilen Bernoulli ve Süreklilik Denklemleri kullanılarak yapılan teorik hesaplama yöntemi, bir endüstriyel darbe emicinin basınç tüpü ön tasarım aşamasında kullanılabilir. Bu yöntemin geliştirilmesi ile değişik kurslar, sönümleme süreleri ve sönümleme hızlarına göre basınç tüpü akış kanal çaplarının ve yerinin belirlenmesi kolaylaştırılabilir. Çözüm denklemleri için bir program yazılırsa iterasyon tablosunda yapılan değişikliklerde sonuca daha kısa sürede ulaşılabilir ve hatalar azaltılabilir.

KAYNAKLAR

ACE Otomasyon Kontrol Ekipmanları Kataloğu, 2011.

Andrzej Milecki, Mikolaj Hauke, 2011. Applicatin of magnetorheological fluid in industrial shock absorbers, Mechanical Systems and Signal Processing, 26 December 2011.

Çengel, Y.A., Cimbala, J.M. 2006. Fluid Mechanics: Fundamentals and applications, The McGraw-Hill Companies, Inc., NY, 931pp.

Dixon, C. J. 2007. Shock Absorber Handbook/Second Edition. Great Britain, 445pp.

Douglas P. Taylor, John C. Metzger, Donald H., 2007. Structural control using hybrid spring-damper isolator with integral gapping function, TAYLOR DEVICES INC. North Tonawanda, NY 14120-0748 716.694.0800.

Farjoud A., Ahmadian M., Craft M., Burke W., 2010. Nonlinear modeling and experimental characterization of hydraulic dampers: effects of shim stack and orifice parameters on damper performance,. Nonlinear Dyn (2012) 67:1437–1456.

G. Mikulowski, J. Holnicki-Szulc, 2003. Adaptive aircraft schock absorbers, Amas Workshop on Smart Materials and Structures SMART'03- (PP.63-72), Jadwisin, September 2-5, 2003.

ITT Shock and Vibration products-ENIDINE Catalogue, 2007.

Keith, P., Hodges, B. 1996. Hydraulic Fluids, New York, 163pp.

Kirsten P. Duffy, Ronald L. Bagley, Oral Mehmed, 2000. On a Self-Tuning Impact Vibration Damper for Rotating Turbomachinery, NASA/TM-2000-210215, Agust 2000.

Piotr Czop, Damain Slawik, 2010. A high frequency first-principle model of a shock absorber and servo-hydraulic tester, Mechanical Systems and Signal Processing, 28 January 2011.

LI, ZX, DU, D.X., GUO, Z.Y., 2003. Experimental study on flow haracteristics of liquid in circular microtubes. Microscale Thermophysical Eng 7:253–265, 2003.

M.Lesieur, 2008. Turbulence in Fluids, Fluid Mechanics and Its Applications V.84, ISBN 978-1-4020-6435-7 (e-book), France.

Micheal S. Talbott, John Starkey, 2002. An experimentally validated physical model of a high-performance mono-tube damper, Society of Automotive Engineers, INC., 2002-01-3337.

M.S. Hundal,1977. Impact absorber with two-stage, variable area orifice hydraulic damper, Journal of Sound and Vibration, V.50, Issue 2, 22 January 1977, P.195-202.

P. Czop, D. Slawik, G. Wszolek, M. Zwiazek, 2008. Design and development of seal components fatigue tester, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, September 2008.

Robert Metz, PCB Piezotronics, Depwe New York 2007. Inc. Impact and drop testing with ICP ® Force Sensors, Bound and Vibration, February 2007.

Şara N. O., Yapıcı S., 2007. Mikro kanallarda basınç düşüşü ve ısı/kütle aktarımı: I-Basınç düşüşü ve sürtünme faktörü bağıntıları, Mühendis ve Makine, 570.Sayı, Temmuz 2007.

Şara N. O., Yapıcı S., Arzutuğ M.E., 2007. Mikro kanallarda basınç düşüşü ve ısı/kütle aktarımı: II-Taşım ile ısı ve kütle aktarımı, Mühendis ve Makine, 571.Sayı, Ağustos 2007.

Umur, H. 2009. Akışkanlar Mekaniği. Dora yayınları: 24, 2009, BURSA, 553s.

United States Patent , Kilgore Manufacturing Company - US889619, 1908.

United States Patent , Dwight F. Kilgour - US984377, 1911.

United States Patent , Efdyn Corp. - US3645365, 1972.

United States Patent , Enetrols, Inc. - US4702355, 1987.

United States Patent , Harold D. Wiard, Livonia, Mich – US5566794, 1996.

United States Patent , R Kirst - US6006873, 1999.

United States Patent , Robert Heideman- US6974002, 2005.

United States Patent , Michel Bertrand, Jean-Pierre Perret - US6286640, 2001.

United States Patent , Michel Bertrand, Jean-Pierre Perret - US7055661, 2006.

Weforma Main Catalogue, 2013.

X.X.Zhang, G. Ruiz, Rena C. Yu, 2008. A new drop weight impact machine for studying fracture process in structural concrete , Anales de Mecánica de la Fractura 25, Vol. 2 (2008).

Yüksel H.,2006. Non-Linear amortisörlerin dinamiği, BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi, (2006).8.2.

EKLER

EK-1

1. Tasarım İterasyon Tablosu

A												
i	c_{fA}	c_{fB1}	c_{fB2}	c_{fB3}	c_{fB4}	c_{fB5}	u_A	u_{B1}	u_{B2}	u_{B3}	u_{B4}	u_{B5}
1	0,0092	0,0068	0,007	0,0078	0,0082	0,0082	6,26	94,0326143	93,8617698	92,9194617	92,1881	92,1859435
2	0,0092	0,0118	0,0119	0,013	0,008072	0,00807266	0,52074153	92,6837498	92,4694358	91,0416697	92,1991	92,1995103
3	0,03573	0,01181	0,01192	0,0132	0,008072	0,00807148	0,51437093	92,6811584	92,4639699	90,9731705	92,1995	92,1998516
4	0,03617	0,01185	0,01195	0,0134	0,008071	0,00807145	0,51429598	92,6709679	92,4559021	90,9049351	92,1995	92,1998617
5	0,03617	0,01186	0,01196	0,0136	0,008071	0,00807144	0,51420283	92,6684208	92,4532137	90,8368547	92,1995	92,199862
6	0,03618	0,01186	0,01196	0,0136	0,008071	0,00807144	0,51413234	92,6684207	92,4532136	90,8368546	92,1995	92,1998619
i	c_{fA}	c_{fB1}	c_{fB2}	c_{fB3}	c_{fB4}	c_{fB5}	u_A	u_{B1}	u_{B2}	u_{B3}	u_{B4}	u_{B5}
1	0,0361		0,01186	0,01196	0,0136	0,00807	0,51		92,4801042	91,3996716	89,928	92,2004766
2	0,03648		0,01196	0,0136	0,008275	0,00807139	0,34498148		92,4530899	90,8367525	92,1125	92,1998205
3	0,05393		0,011965	0,01365	0,008079	0,00807145	0,34579189		92,4517227	90,8197257	92,1961	92,1997491
4	0,0538		0,01195	0,01365	0,008072	0,00807145	0,34582641		92,4557553	90,819726	92,1992	92,1997468
5	0,0538		0,01196	0,01366	0,008071	0,00807145	0,34583485		92,453067	90,8163279	92,1993	92,1997467
6	0,0538		0,01196	0,01366	0,008071	0,00807145	0,34582752		92,453067	90,8163279	92,1993	92,1997467
i	c_{fA}	c_{fB1}	c_{fB2}	c_{fB3}	c_{fB4}	c_{fB5}	u_A	u_{B1}	u_{B2}	u_{B3}	u_{B4}	u_{B5}
1	0,0538			0,0134	0,00807	0,00807	0,345			90,9048021	92,2	92,2003671
2	0,05393			0,0136	0,008071	0,0080714	0,19724378			90,8366867	92,1993	92,1997666
3	0,09432			0,01365	0,008071	0,00807145	0,19718138			90,8196673	92,1993	92,1997087
4	0,09435			0,01365	0,008071	0,00807146	0,19716594			90,8196672	92,1993	92,1997065
5	0,09436			0,01366	0,008071	0,00807146	0,19716594			90,8162691	92,1993	92,1997064
6	0,09436			0,01366	0,008071	0,00807146	0,19716287			90,8162691	92,1993	92,1997064
i	c_{fA}	c_{fB1}	c_{fB2}	c_{fB3}	c_{fB4}	c_{fB5}	u_A	u_{B1}	u_{B2}	u_{B3}	u_{B4}	u_{B5}
1	0,0538				0,00807	0,00807	0,197				92,1999	92,2003639
2	0,09444				0,008071	0,0080714	0,11506577				92,1993	92,1997534
3	0,16169				0,008071	0,00807145	0,11506499				92,1992	92,1997105
4	0,16169				0,008071	0,00807146	0,11506494				92,1992	92,1997089
i	c_{fA}	c_{fB1}	c_{fB2}	c_{fB3}	c_{fB4}	c_{fB5}	u_A	u_{B1}	u_{B2}	u_{B3}	u_{B4}	u_{B5}
1	0,0538					0,0080715	0,11					92,199723
2	0,16913					0,00807146	0,05753263					92,1997326
3	0,32338					0,00807146	0,05753263					92,1997214
4	0,32338					0,00807146	0,05753263					92,199721

EK - 2

EK-1'in devamı

B												
<i>i</i>	<i>Re_A</i>	<i>Re_{B1}</i>	<i>Re_{B2}</i>	<i>Re_{B3}</i>	<i>Re_{B4}</i>	<i>Re_{B5}</i>	<i>C_{fA}</i>	<i>C_{fB1}</i>	<i>C_{fB2}</i>	<i>C_{fB3}</i>	<i>C_{fB4}</i>	<i>C_{fB5}</i>
1	5383,6	3436,89	3228,84	2397,322	1982,044	1982	0,0092	0,0118	0,0119	0,013	0,00807248	0,0080727
	447,837719	3387,59	3180,95	2348,875	1982,28	1982,3	0,035727	0,01181	0,01192	0,0132	0,00807151	0,0080715
	442,359002	3387,5	3180,76	2347,108	1982,289	1982,3	0,03617	0,01185	0,01195	0,0134	0,00807148	0,0080714
	442,294542	3387,12	3180,48	2345,347	1982,289	1982,3	0,036175	0,01186	0,01196	0,0136	0,00807148	0,0080714
	442,214434	3387,03	3180,39	2343,591	1982,289	1982,3	0,036182	0,01186	0,01196	0,0136	0,00807148	0,0080714
	6											
2	438,6		3181,32	2358,112	1933,452	1982,3	0,03648		0,01196	0,0136	0,00827535	0,0080714
	296,684071		3180,39	2343,588	1980,419	1982,3	0,053929		0,01197	0,01365	0,0080791	0,0080714
	297,381021		3180,34	2343,149	1982,216	1982,3	0,053803		0,01195	0,01365	0,00807177	0,0080715
	297,410715		3180,48	2343,149	1982,283	1982,3	0,053798		0,01196	0,01366	0,0080715	0,0080715
	297,417967		3180,39	2343,061	1982,286	1982,3	0,053796		0,01196	0,01366	0,00807149	0,0080715
	6											
3	296,7			2345,344	1982,3	1982,3	0,053927			0,0136	0,00807143	0,0080714
	169,629648			2343,587	1982,285	1982,3	0,094323			0,01365	0,00807149	0,0080715
	169,575988			2343,147	1982,284	1982,3	0,094353			0,01365	0,0080715	0,0080715
	169,562711			2343,147	1982,284	1982,3	0,09436			0,01366	0,0080715	0,0080715
	169,56271			2343,06	1982,284	1982,3	0,09436			0,01366	0,0080715	0,0080715
	6											
4	169,42				1982,298	1982,3	0,09444				0,00807144	0,0080714
	98,9565626				1982,284	1982,3	0,161687				0,0080715	0,0080715
	98,9558881				1982,284	1982,3	0,161688				0,0080715	0,0080715
	4											
5	94,6					1982,3	0,169133					0,0080715
	49,4780593					1982,3	0,323376					0,0080715
	49,4780645					1982,3	0,323376					0,0080715
	4											

EK – 3

2. Tasarım İterasyon Tablosu

A												
<i>i</i>	c_{fA}	c_{fB1}	c_{fB2}	c_{fB3}	c_{fB4}	c_{fB5}	u_A	u_{B1}	u_{B2}	u_{B3}	u_{B4}	u_{B5}
1	0,0092	0,0068	0,007	0,0078	0,0082	0,0082	6,26	94,0322039	93,8619746	92,9192337	92,1881	92,1859435
	0,0092	0,01181	0,01191	0,0131	0,008072	0,00807266	0,52074091	92,6817	92,4664978	91,0076764	92,1991	92,1995103
	0,03573	0,011812	0,011922	0,01322	0,008072	0,00807148	0,51433176	92,6811294	92,4631923	90,9665513	92,1995	92,1998516
	0,03617	0,011813	0,011923	0,01325	0,008071	0,00807145	0,51428869	92,6808737	92,4629222	90,9563068	92,1995	92,1998617
	0,03618	0,011814	0,011924	0,01326	0,008071	0,00807144	0,51427855	92,6806189	92,4626533	90,9528934	92,1995	92,199862
2	0,0092		0,007	0,0078	0,0082	0,0082	0,52		93,8159627	92,8759452	92,1448	92,1452402
	0,0092		0,01191	0,0131	0,008076	0,00807623	0,34981288		92,4663244	91,0075142	92,1973	92,1978335
	0,05318		0,011922	0,01322	0,008072	0,00807162	0,34601921		92,4630412	90,9664217	92,1993	92,1996769
	0,05377		0,011923	0,01325	0,008071	0,00807146	0,34597916		92,4627716	90,956178	92,1993	92,1997442
	0,05377		0,011924	0,01326	0,008071	0,00807145	0,34596955		92,4625026	90,9527646	92,1993	92,1997467
3	0,0092			0,0078	0,0082	0,0082	0,34			92,875773	92,1446	92,1450783
	0,0092			0,0131	0,008076	0,00807624	0,19895646			91,0074239	92,1972	92,1977408
	0,09351			0,01322	0,008072	0,00807163	0,19733317			90,9663656	92,1992	92,1996337
	0,09428			0,01325	0,008072	0,00807146	0,19729846			90,9561226	92,1993	92,1997037
	0,0943			0,01326	0,008071	0,00807146	0,19728929			90,9527091	92,1993	92,1997063
4	0,0092				0,0082	0,0082	0,198				92,1445	92,1449983
	0,0092				0,008076	0,00807625	0,11499665				92,1972	92,1977102
	0,16178				0,008072	0,00807163	0,11506242				92,1992	92,1996342
	0,16169				0,008072	0,00807146	0,11506485				92,1992	92,199706
	0,16169				0,008071	0,00807146	0,11506494				92,1992	92,1997087
5	0,0092					0,0082	0,11					92,14497
	0,0092					0,00807625	0,05749846					92,1976988
	0,32357					0,00807163	0,05753136					92,1996455
	0,32338					0,00807146	0,05753258					92,1997182
	0,32338					0,00807146	0,05753262					92,1997209

EK – 4

Ek-3'ün devamı

B

<i>i</i>	Re_A	Re_{B1}	Re_{B2}	Re_{B3}	Re_{B4}	Re_{B5}	C_{fA}	C_{fB1}	C_{fB2}	C_{fB3}	C_{fB4}	C_{fB5}
1	5383,6	3436,88	3228,85	2397,316	1982,044	1982	0,0092	0,01181	0,01191	0,0131	0,00807248	0,0080727
2	447,837184	3387,52	3180,85	2347,998	1982,28	1982,3	0,035727	0,01181	0,01192	0,01322	0,00807151	0,0080715
3	442,32531	3387,5	3180,73	2346,937	1982,289	1982,3	0,036172	0,01181	0,01192	0,01325	0,00807148	0,0080714
4	442,288275	3387,49	3180,72	2346,673	1982,289	1982,3	0,036176	0,01181	0,01192	0,01326	0,00807148	0,0080714
5												

<i>i</i>	Re_A	Re_{B1}	Re_{B2}	Re_{B3}	Re_{B4}	Re_{B5}	C_{fA}	C_{fB1}	C_{fB2}	C_{fB3}	C_{fB4}	C_{fB5}
1	447,2		3227,27	2396,199	1981,112	1981,1	0,0092		0,01191	0,0131	0,00807627	0,0080762
2	300,839077		3180,84	2347,994	1982,242	1982,3	0,053185		0,01192	0,01322	0,00807167	0,0080716
3	297,576522		3180,73	2346,934	1982,284	1982,3	0,053768		0,01192	0,01325	0,0080715	0,0080715
4	297,542077		3180,72	2346,669	1982,286	1982,3	0,053774		0,01192	0,01326	0,00807149	0,0080715
5												

<i>i</i>	Re_A	Re_{B1}	Re_{B2}	Re_{B3}	Re_{B4}	Re_{B5}	C_{fA}	C_{fB1}	C_{fB2}	C_{fB3}	C_{fB4}	C_{fB5}
1	292,4			2396,195	1981,109	1981,1	0,0092			0,0131	0,00807628	0,0080762
2	171,102554			2347,992	1982,24	1982,3	0,093511			0,01322	0,00807167	0,0080716
3	169,706528			2346,932	1982,283	1982,3	0,09428			0,01325	0,0080715	0,0080715
4	169,676679			2346,668	1982,284	1982,3	0,094297			0,01326	0,0080715	0,0080715
5												

<i>i</i>	Re_A	Re_{B1}	Re_{B2}	Re_{B3}	Re_{B4}	Re_{B5}	C_{fA}	C_{fB1}	C_{fB2}	C_{fB3}	C_{fB4}	C_{fB5}
1	170,28				1981,107	1981,1	0,0092				0,00807629	0,0080763
2	98,8971191				1982,24	1982,3	0,161784				0,00807168	0,0080716
3	98,9536807				1982,282	1982,3	0,161692				0,00807151	0,0080715
4	98,9557697				1982,284	1982,3	0,161688				0,0080715	0,0080715
5												

<i>i</i>	Re_A	Re_{B1}	Re_{B2}	Re_{B3}	Re_{B4}	Re_{B5}	C_{fA}	C_{fB1}	C_{fB2}	C_{fB3}	C_{fB4}	C_{fB5}
1	94,6					1981,1	0,0092					0,0080763
2	49,4486767					1982,3	0,323568					0,0080716
3	49,4769731					1982,3	0,323383					0,0080715
4	49,4780177					1982,3	0,323376					0,0080715
5												

EK – 5

3. Tasarım İterasyon Tablosu

A														
<i>i</i>	C_{fA}	C_{fB1}	C_{fB2}	C_{fB3}	C_{fB4}	C_{fB5}	C_{fB6}	u_A	u_{B1}	u_{B2}	u_{B3}	u_{B4}	u_{B5}	u_{B6}
1	0,0092	0,0068	0,007	0,0078	0,0086	0,0092	0,0098	6,2600	94,1340	93,8618	92,9197	91,6184	90,1631	88,9113
	0,0092	0,007	0,0073	0,0079	0,0088	0,0095	0,0098	0,52026	94,0362	93,7321	92,8392	91,4840	89,9530	88,8720
	0,03576024	0,007	0,0073	0,0079	0,0088	0,0095	0,0098	0,5196	94,0362	93,7321	92,8391	91,4839	89,9529	88,8718
2	0,0092		0,007	0,0078	0,0086	0,0092	0,0098	0,5196		93,8163	92,8755	91,5767	90,1228	88,8720
	0,0092		0,0073	0,0079	0,0088	0,0095	0,0098	0,32882		93,7319	92,8390	91,4838	89,9528	88,8718
	0,05657921		0,0073	0,0079	0,0088	0,0095	0,0098	0,3286		93,7319	92,8390	91,4837	89,9527	88,8717
3	0,0092			0,0078	0,0086	0,0092	0,0098	0,3286			92,8754	91,5765	90,1227	88,8718
	0,0092			0,0079	0,0088	0,0095	0,0098	0,17797			92,8390	91,4837	89,9528	88,8718
	0,10453936			0,0079	0,0088	0,0095	0,0098	0,1778			92,8389	91,4837	89,9527	88,8717
4	0,0092				0,0086	0,0092	0,0098	0,1178				91,5764	90,1226	88,8717
	0,0092				0,0088	0,0095	0,0098	0,09401				91,4837	89,9527	88,8717
	0,19790396				0,0088	0,0095	0,0098	0,0939				91,4837	89,9527	88,8717
5	0,0092					0,0092	0,0098	0,0939					90,1226	88,8717
	0,0092					0,0095	0,0098	0,0473					89,9527	88,8717
	0,39329534					0,0095	0,0098	0,0473					89,9527	88,8717
6	0,0092						0,0098	0,0473						88,8717
	0,0092						0,0098	0,01991						88,8717
	0,93456582						0,0098	0,0199						88,8717

EK – 6

Ek-5'in devamı

B														
<i>i</i>	<i>R_{0i}</i>	<i>R_{0i1}</i>	<i>R_{0i2}</i>	<i>R_{0i3}</i>	<i>R_{0i4}</i>	<i>R_{0i5}</i>	<i>R_{0i6}</i>	<i>C_{0i}</i>	<i>C_{0i1}</i>	<i>C_{0i2}</i>	<i>C_{0i3}</i>	<i>C_{0i4}</i>	<i>C_{0i5}</i>	<i>C_{0i6}</i>
1	5383,600	80955,259	80721,188	79910,977	78791,863	77540,256	76463,6791	0,0092	0,007	0,0073	0,0079	0,0088	0,0095	0,0098
	447,424	80871,152	80609,639	79841,734	78676,243	77359,590	76429,9179	0,03576024	0,007	0,0073	0,0079	0,0088	0,0095	0,0098
	3													
	4													
2	446,856		80682,010	79872,970	78755,922	77505,642	76429,9173	0,0092		0,0073	0,0079	0,0088	0,0095	0,0098
	282,789		80609,476	79841,575	78676,093	77359,446	76429,7769	0,05657921		0,0073	0,0079	0,0088	0,0095	0,0098
	3													
	4													
3	282,596			79872,812	78755,773	77505,498	76429,7767	0,0092			0,0079	0,0088	0,0095	0,0098
	153,052			79841,501	78676,022	77359,378	76429,7105	0,10453936			0,0079	0,0088	0,0095	0,0098
	3													
	4													
4	101,308				78755,686	77505,414	76429,6951	0,0092				0,0088	0,0095	0,0098
	80,847				78676,001	77359,357	76429,6907	0,19790396				0,0088	0,0095	0,0098
	3													
	4													
5	80,754					77505,410	76429,6907	0,0092					0,0095	0,0098
	40,682					77359,352	76429,685	0,39329534					0,0095	0,0098
	3													
	4													
6	40,678						76429,685	0,0092						0,0098
	17,120						76429,6834	0,93456582						0,0098
	3													
	4													

EK – 7

4. Tasarım İterasyon Tablosu

A											
<i>i</i>	C_{fA}	C_{fB1}	C_{fB2}	C_{fB3}	C_{fB4}	C_{fB5}	C_{fB6}	C_{fB7}	C_{fB8}	C_{fB9}	C_{fB10}
1	0,0092	0,0059	0,0059	0,0061	0,0061	0,0062	0,0063	0,0063	0,0063	0,0065	0,0065
	0,00923	0,00959	0,00987	0,01025	0,01053	0,01088	0,01111	0,0113	0,0113	0,01187	0,01213
	0,0107	0,0096	0,00989	0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01191	0,01218
	0,01073	0,0096	0,00989	0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,01073	0,0096	0,00989	0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
2	0,0092		0,0059	0,0061	0,0061	0,0062	0,0063	0,0063	0,0063	0,0065	0,0065
	0,01073		0,00987	0,01026	0,01053	0,01088	0,01111	0,0113	0,0113	0,01187	0,01213
	0,01123		0,00989	0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,01126		0,00989	0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,01126		0,00989	0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
3	0,0092			0,0061	0,0061	0,0062	0,0063	0,0063	0,0063	0,0065	0,0065
	0,01126			0,01026	0,01053	0,01088	0,01111	0,0113	0,0113	0,01187	0,01404
	0,0119			0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,0141
	0,01194			0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,0141
	0,01194			0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,0141
4	0,0092				0,0061	0,0062	0,0063	0,0063	0,0063	0,0065	0,0065
	0,01194				0,01053	0,01088	0,01111	0,0113	0,0113	0,01187	0,01213
	0,00789				0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,00797				0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,00797				0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
5	0,0092					0,0062	0,0063	0,0063	0,0063	0,0065	0,0065
	0,01271					0,01088	0,01111	0,0113	0,0113	0,01187	0,01213
	0,00982					0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,00993					0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,00993					0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218

EK – 8

Ek-7'nin devamı

A

i	C_{fA}	C_{fB1}	C_{fB2}	C_{fB3}	C_{fB4}	C_{fB5}	C_{fB6}	C_{fB7}	C_{fB8}	C_{fB9}	C_{fB10}
6	1	0,0092					0,0063	0,0063	0,0063	0,0065	0,0065
	2	0,01376					0,01111	0,0113	0,0113	0,01187	0,01213
	3	0,01246					0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	4	0,01259					0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	5	0,0126					0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
7	1	0,0092						0,0063	0,0063	0,0065	0,0065
	2	0,01504						0,0113	0,0113	0,01187	0,01213
	3	0,01614						0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	4	0,01632						0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	5	0,01632						0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
8	1	0,0092							0,0063	0,0065	0,0065
	2	0,01665							0,0113	0,01187	0,01213
	3	0,02291							0,01134	0,01192	0,01218
	4	0,02318							0,01134	0,01192	0,01218
	5	0,02318							0,01134	0,01192	0,01218
9	1	0,0092								0,0065	0,0065
	2	0,01929								0,01187	0,01213
	3	0,03945								0,01192	0,01218
	4	0,03997								0,01192	0,01218
	5	0,03997								0,01192	0,01218
10	1	0,0092									0,0065
	2	0,02481									0,01213
	3	0,0789									0,01218
	4	0,07997									0,01218
	5	0,07998									0,01218

EK – 9

Ek-8'in devamı

B											
№₄	№₅	№₆	№₇	№₈	№₉	№₁₀	№₁₁	№₁₂	№₁₃	№₁₄	
1	6,26	94,9647108	94,96415927	94,8662867	94,86586289	94,77003132	94,65861959	94,65832356	94,65777379	94,37002437	94,3697714
	3,89260	94,36682365	94,32365297	94,15603619	94,1123628	93,91965005	93,72108545	93,68490747	93,6850908	93,14097539	93,0831502
	3,85820	94,3640743	94,32051253	94,1521716	94,10805354	93,91426947	93,71458391	93,67793988	93,67806353	93,13014264	93,07136949
	3,85797	94,36405986	94,3204943	94,15214753	94,10802512	93,91423142	93,71453414	93,67788488	93,67800669	93,13004117	93,07125533
	3,85797	94,36405978	94,32049419	94,15214737	94,10802493	93,91423115	93,71453376	93,67788446	93,67800624	93,13004025	93,07125426
B											
№₄	№₅	№₆	№₇	№₈	№₉	№₁₀	№₁₁	№₁₂	№₁₃	№₁₄	
2	3,85797		94,93361642	94,83606362	94,83621653	94,74076052	94,63007361	94,63018041	94,63037876	94,3431715	94,34326277
	3,35740		94,31806462	94,15046581	94,10683862	93,91414871	93,71564011	93,67949446	93,67974512	93,13565622	93,07785665
	3,32719		94,31521389	94,14692397	94,10289664	93,90917316	93,70960225	93,67302154	93,6732614	93,1254301	93,06671132
	3,32699		94,31519796	94,14690263	94,10287146	93,90913893	93,70955717	93,67297167	93,67321028	93,12533598	93,06660509
	3,32699		94,31519787	94,14690249	94,1028713	93,9091387	93,70955684	93,6729713	93,67320989	93,12533514	93,06660411
B											
№₄	№₅	№₆	№₇	№₈	№₉	№₁₀	№₁₁	№₁₂	№₁₃	№₁₄	
3	3,32699			94,83075575	94,83099923	94,73560276	94,62503033	94,62520039	94,62551621	94,3383958	94,33854112
	2,82325			94,14579844	94,10225235	93,90961653	93,71121046	93,67512147	93,67547617	93,13146759	93,06578293
	2,79548			94,14231928	94,09837345	93,90470447	93,70523661	93,66871284	93,66905707	93,12130683	92,64578071
	2,79530			94,14229905	94,09834954	93,90467164	93,70519314	93,66866647	93,66900786	93,12121485	92,64568668
	2,79530			94,14229892	94,09834939	93,90467142	93,70519282	93,66866434	93,66900749	93,12121403	92,64568595
B											
№₄	№₅	№₆	№₇	№₈	№₉	№₁₀	№₁₁	№₁₂	№₁₃	№₁₄	
4	2,7953				94,82685581	94,73150984	94,62103473	94,62125877	94,62167484	94,33462759	94,33481903
	2,35848				94,09913636	93,90654028	93,70821025	93,67216358	93,67259627	93,12864572	93,07093124
	2,33513				94,09559488	93,90200639	93,70269578	93,66626182	93,6667722	93,11913199	93,0605389
	2,33498				94,09557182	93,90197468	93,7026538	93,66621536	93,66672484	93,11904309	93,06043839
	2,33498				94,09557167	93,90197446	93,70265349	93,66621501	93,66672447	93,11904229	93,06043745
B											
№₄	№₅	№₆	№₇	№₈	№₉	№₁₀	№₁₁	№₁₂	№₁₃	№₁₄	
5	2,33498					94,72821809	94,61781397	94,61807717	94,61856597	94,33157278	94,3317977
	1,89376					93,90374059	93,7054787	93,66946984	93,66997207	93,12607409	93,06839211
	1,87399					93,89910936	93,69982965	93,66341165	93,66395071	93,11634002	93,05776098
	1,87386					93,8990781	93,69978802	93,6633655	93,6639036	93,11625097	93,05766018
	1,87386					93,89907789	93,69978772	93,66336515	93,66390324	93,11625017	93,05765925
B											
№₄	№₅	№₆	№₇	№₈	№₉	№₁₀	№₁₁	№₁₂	№₁₃	№₁₄	
6	1,87386						94,61527906	94,61557445	94,61612303	94,32917393	94,32942635
	1,49350						93,70365448	93,6676726	93,66822459	93,12436313	93,06670427
	1,47722						93,69793098	93,66152657	93,6620902	93,11450242	93,05593525
	1,47710						93,69789003	93,6614811	93,66204383	93,11441391	93,05583494
	1,47710						93,69788973	93,66148076	93,66204348	93,11441312	93,05583402
B											
№₄	№₅	№₆	№₇	№₈	№₉	№₁₀	№₁₁	№₁₂	№₁₃	№₁₄	
7	1,4771							94,61346137	94,6140509	94,32713322	94,32740448
	1,15286							93,66608716	93,66667487	93,12284078	93,06519858
	1,13987							93,65989392	93,66047839	93,11291011	93,05435298
	1,13977							93,65984929	93,66043297	93,11282247	93,05425357
	1,13977							93,65984897	93,66043263	93,11282171	93,05425266
B											
№₄	№₅	№₆	№₇	№₈	№₉	№₁₀	№₁₁	№₁₂	№₁₃	№₁₄	
8	1,13977								94,61272394	94,32582697	94,32611075
	0,81224								93,66564214	93,12183019	93,06420195
	0,80266								93,65941026	93,11185915	93,05331189
	0,80259								93,65936596	93,11177267	93,05321366
	0,80259								93,65936565	93,11177192	93,05321278
B											
№₄	№₅	№₆	№₇	№₈	№₉	№₁₀	№₁₁	№₁₂	№₁₃	№₁₄	
9	0,80259									94,32446467	94,32475772
	0,47162									93,1207646	93,06314682
	0,46546									93,11079758	93,05226013
	0,46541									93,11071256	93,05216346
	0,46541									93,11071184	93,05216261
B											
№₄	№₅	№₆	№₇	№₈	№₉	№₁₀	№₁₁	№₁₂	№₁₃	№₁₄	
10	0,46541										94,32389895
	0,23581										93,06259859
	0,23266										93,05175174
	0,23263										93,05165673
	0,23263										93,0516559

EK - 10

Ek-9'un devamı

C											
	RE ₂₁	RE ₂₂	RE ₂₃	RE ₂₄	RE ₂₅	RE ₂₆	RE ₂₇	RE ₂₈	RE ₂₉	RE ₃₀	
1	5383,6	5716,87559	5104,32356	4487,17536	4079,2321	3667,60021	3459,77255	3256,24633	3256,22742	2840,53773	2637,63511
	3347,63538	5680,882784	5069,89635	4453,58051	4046,8316	3634,69046	3425,50567	3222,76082	3222,76712	2803,54336	2601,67405
	3317,85557	5680,716403	5069,72657	4453,39658	4046,64508	3634,48076	3425,26622	3222,51924	3222,52343	2803,21424	2601,34159
2	3317,8542		5102,68188	4485,74581	4077,95731	3666,46743	3458,72919	3255,27821	3255,28503	2839,72946	2636,89419
	2887,36214		5069,59597	4453,31703	4046,59406	3634,47756	3425,30665	3222,57461	3222,58323	2803,38325	2601,52609
	2861,38386		5069,44275	4453,1495	4046,42456	3634,285	3425,08596	3222,35194	3222,36019	2803,07545	2601,21458
	2861,2157		5069,44189	4453,14849	4046,42347	3634,28368	3425,08431	3222,35023	3222,35843	2803,07261	2601,21161
3	2861,2114			4485,49475	4077,73297	3666,26783	3458,54486	3255,10689	3255,11776	2839,58571	2636,76222
	2427,99117			4453,09627	4046,39685	3634,30216	3425,14474	3222,42418	3222,43638	2803,25717	2589,78633
	2404,11222			4452,9317	4046,23006	3634,11206	3424,9264	3222,20372	3222,21556	2803,95134	2589,44957
	2403,95741			4452,93074	4046,22903	3634,11079	3424,92481	3222,20207	3222,21387	2802,94857	2589,44694
4	2403,958				4077,5548	3666,10943	3458,39882	3254,9713	3254,98561	2839,47229	2636,65819
	2028,28947				4046,26286	3634,18311	3425,03508	3222,32243	3222,33731	2803,17224	2601,33253
	2008,21226				4046,11058	3634,00765	3424,83353	3222,11941	3222,13696	2802,88587	2601,04206
	2008,08469				4046,10959	3634,00642	3424,832	3222,11781	3222,13533	2802,8832	2601,03925
5	2008,0828					3665,98204	3458,2811	3254,86185	3254,87867	2839,38034	2636,57375
	1628,63463					3634,07476	3424,93525	3222,22976	3222,24704	2803,09483	2601,26156
	1611,63242					3633,89553	3424,72877	3222,02136	3222,03999	2802,80183	2600,96442
	1611,51692					3633,89432	3424,72725	3222,01977	3222,03828	2802,79915	2600,9616
6	1611,5196						3458,18845	3254,77576	3254,79463	2839,30814	2636,50747
	1284,40623						3424,86857	3222,16794	3222,18693	2803,04333	2601,21438
	1270,40925						3424,65938	3221,95651	3221,97599	2802,74652	2600,91339
	1270,30915						3424,65788	3221,95495	3221,97431	2802,74386	2600,91059
7	1270,306							3254,70307	3254,72335	2839,24671	2636,45096
	991,455634							3222,1134	3222,13362	2802,99751	2601,1723
	980,286516							3221,90035	3221,92046	2802,69859	2600,86917
	980,203488							3221,89882	3221,91889	2802,69596	2600,86639
8	980,2022								3254,6777	2839,20739	2636,4148
	698,522659								3222,09809	2802,96709	2601,14444
	690,288797								3221,88371	2802,66696	2600,84007
	690,224652								3221,88219	2802,66436	2600,83732
9	690,2274									2839,16639	2636,37698
	405,595828									2802,93501	2601,11495
	400,29541									2802,63501	2600,81067
	400,250574									2802,63245	2600,80797
10	400,2526										2636,35298
	202,796383										2601,09963
	200,084587										2600,79646
	200,061266										2600,79381

EK – 11

Ek-10'un devamı

		D									
	C_{fA}	C_{fB1}	C_{fB2}	C_{fB3}	C_{fB4}	C_{fB5}	C_{fB6}	C_{fB7}	C_{fB8}	C_{fB9}	C_{fB10}
1	0,00923	0,00959	0,00987	0,01025	0,01053	0,01088	0,01111	0,0113	0,0113	0,01187	0,01213
	0,0107	0,0096	0,00989	0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01191	0,01218
	0,01073	0,0096	0,00989	0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,01073	0,0096	0,00989	0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
2	0,01073		0,00987	0,01026	0,01053	0,01088	0,01111	0,0113	0,0113	0,01187	0,01213
	0,01123		0,00989	0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,01126		0,00989	0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,01126		0,00989	0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
3	0,01126			0,01026	0,01053	0,01088	0,01111	0,0113	0,0113	0,01187	0,01404
	0,0119			0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,0141
	0,01194			0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,0141
	0,01194			0,01028	0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,0141
4	0,01194				0,01053	0,01088	0,01111	0,0113	0,0113	0,01187	0,01213
	0,00789				0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,00797				0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,00797				0,01055	0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
5	0,01271					0,01088	0,01111	0,0113	0,0113	0,01187	0,01213
	0,00982					0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,00993					0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,00993					0,01091	0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218

EK – 12

Ek-11'in devamı

D										
C_{fA}	C_{fB1}	C_{fB2}	C_{fB3}	C_{fB4}	C_{fB5}	C_{fB6}	C_{fB7}	C_{fB8}	C_{fB9}	C_{fB10}
6	0,01376					0,01111	0,0113	0,0113	0,01187	0,01213
	0,01246					0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,01259					0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,0126					0,01114	0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
C_{fA}	C_{fB1}	C_{fB2}	C_{fB3}	C_{fB4}	C_{fB5}	C_{fB6}	C_{fB7}	C_{fB8}	C_{fB9}	C_{fB10}
7	0,01504						0,0113	0,0113	0,01187	0,01213
	0,01614						0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,01632						0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
	0,01632						0,01134	0,01134	0,01192	0,01218
C_{fA}	C_{fB1}	C_{fB2}	C_{fB3}	C_{fB4}	C_{fB5}	C_{fB6}	C_{fB7}	C_{fB8}	C_{fB9}	C_{fB10}
8	0,01665							0,0113	0,01187	0,01213
	0,02291							0,01134	0,01192	0,01218
	0,02318							0,01134	0,01192	0,01218
	0,02318							0,01134	0,01192	0,01218
C_{fA}	C_{fB1}	C_{fB2}	C_{fB3}	C_{fB4}	C_{fB5}	C_{fB6}	C_{fB7}	C_{fB8}	C_{fB9}	C_{fB10}
9	0,01929								0,01187	0,01213
	0,03945								0,01192	0,01218
	0,03997								0,01192	0,01218
	0,03997								0,01192	0,01218
C_{fA}	C_{fB1}	C_{fB2}	C_{fB3}	C_{fB4}	C_{fB5}	C_{fB6}	C_{fB7}	C_{fB8}	C_{fB9}	C_{fB10}
10	0,02481									0,01213
	0,0789									0,01218
	0,07997									0,01218
	0,07998									0,01218

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Emel Özkan

Doğum Yeri ve Tarihi : BURSA, 1990

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Bursa Anadolu Lisesi, 2004-2008

Lisans : Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği 2008-2012

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konstrüksiyon ve İmalat, 2012-2013

İletişim (e-posta) : emelozkan@outlook.com