

**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

**MAKİNE LABORATUVARI 1
DENEY FÖYLERİ**

**2025–2026 Güz Yarıyılı
4. Sınıf**

**© Makina Mühendisliği Bölümü Başkanlığı
Eylül 2025, Kırıkkale**

ÖNSÖZ

Makina Laboratuvarı Dersi, Makina Mühendisliği öğrenimindeki derslerin bir uygulamasıdır. Bu ders kapsamında, derslerde öğretilen teorik konuların ve analitik hesapların deneysel ölçme ile görülmesi ve deney sonuçlarının mühendislik hesapları ile karşılaştırılması yapılmaktadır. Ayrıca, değişik ölçme yöntemlerinin tanınması sağlanmaktadır. Son olarak, teknik bir rapor hazırlama konusunda da bilgi ve tecrübe kazanımı verilmektedir.

Bu deney föyü dönem içindeki yapılacak tüm deneyleri içermektedir ve öğrencilerimizin mesleki yaşamlarında da başvurabilecekleri bir kaynak olarak hazırlanmıştır.

Bu kitapçığın tüm öğrencilerimize yararlı olmasını diler, hazırlanmasında emeği geçen öğretim elemanlarına teşekkür ederim.

Makina Mühendisliği Bölüm Başkanlığı

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

1. GİRİŞ	1
1.1. Dersin Amacı ve Kapsamı	1
1.2. Deneysel Çalışmaların Temelleri / Önemi.....	1
1.2.1 Deneysel Hatalar ve Hata Analiz Yöntemleri.....	1
1.2.2 Belirsizlik Analizi Yöntemi	2
1.3. Ders ile İlgili Genel Düzenlemeler	3
1.3.1 Ders İle İlgili Genel Hususlar	3
1.3.2 Deney Raporu Hazırlanışı	3
1.4. Deney Grupları ve Tarihleri.....	4
1.5. Deney Listesi ve İlgili Öğretim Elemanları	5
 2. DENEY FÖYLERİ	 6
2.1 Bilgisayar Destekli İmalât - I Deneyi	6
2.2 Çekme Deneyi.....	10
2.3 Gerinim Ölçümü Deneyi.....	22
2.4 Çentik Darbe Deneyi.....	29
2.5 Taşınım ile Isı Geçişi Deneyi.....	35
2.6 Termodinamiğin I. Yasası Deneyi	41
2.7 Isı Değiştiricileri Deneyi	46
2.8 Motor Karakteristiklerinin Ölçülmesi Deneyi.....	64
2.9 Eklemeli İmalat Deneyi.....	76
 Ekler.....	 82
Ek-1 Deney Raporu Kapak Sayfası Örneği	82

1. GİRİŞ

Makina Laboratuvarı dersi, mühendislik fakülteleri öğrencileri için, lisans öğrenimleri süresince görmüş oldukları derslerin bir uygulaması olduğundan büyük bir öneme sahip olup bu yönüyle de diğer derslerden ayrılmaktadır. Bu nedenle, diğer derslerde öğrenilen konuların daha iyi kavranabilmesi, laboratuvar derslerine verilen önemle mümkün olacaktır. Bütün deneylere girilmesi, deney raporlarının irdelenerek kapsamlı bir şekilde hazırlanması, daha önce teorik olarak incelenmiş birçok konunun daha iyi anlaşılmasına büyük katkı sağlayacaktır.

1.1 Dersin Amacı ve Kapsamı

Makina Laboratuvarı dersi bir uygulama dersi olup, öğrencilerin lisans öğrenimi süresince derslerde teorik olarak gördükleri birçok kanunun geçerliliğinin deneylerle gösterilmesi amacına yöneliktir. Bu uygulama dersi kapsamında yapılacak deneylerle; Malzeme dersinden Termodinamik dersine, Mukavemet dersinden Isı Transferi dersine kadar birçok dersin temel prensiplerinin izahına çalışılacaktır. Bu yönüyle, bir anlamda lisans öğreniminin özetlendiği bir ders işlevi görmekte olup konuların pekiştirilebilmesi için bir fırsat sağlamaktadır.

1.2 DeneySEL Çalışmaların Temelleri / Önemi

DeneySEL çalışmaların, derslerde teorik olarak işlenen konuların özümsebilmesinde büyük bir etken olduğu hususu açıktır. Ancak bu amaca ulaşılabilmesi için; deneylerin büyük bir titizlikle ve sabırla yapılmış olması, deneylerde kullanılacak cihazların mutlaka kalibre edilmiş olmaları, deneylerin yeteri kadar sayıda tekrar edilmiş olması, deney tesisatı sürekli rejim şartlarına ulaştıktan sonra ölçümlerin alınmış olması gibi birçok şartın yerine getirilmesi gerekir. Ancak, bütün bu şartlar yerine getirilse bile, bütün deneySEL çalışmalar yine de hatalar içerir. DeneySEL çalışmalarda meydana gelen çeşitli hatalar ve bu hataların analizi aşağıda özetle açıklanmıştır.

1.2.1 DeneySEL Hatalar ve Hata Analiz Yöntemleri

DeneySEL çalışmaların tümü, çeşitli nedenlerden dolayı hata içerir. DeneySEL çalışmalarda yapılan bu hatalar genellikle üç grupta toplanabilir. Bunlardan birincisi, deney yapan araştırmacının dikkatsizlik ve tecrübesizliğinden ileri gelen hatalardır. Deney tesisatlarında kullanılan ölçme cihazlarının yanlış seçiminden veya ölçme sistemlerinin yanlış tasarımından kaynaklanan hatalar bu grup içinde düşünülebilir. İkinci grup hatalar, sabit veya sistematik hatalar olarak adlandırılan hatalardır. Bunlar genellikle tekrar edilen okumalarda görülen ve

nedenleri çoğunlukla tespit edilemeyen hatalardır. Üçüncü grup hatalar ise rastgele hatalardır. Bunlar ise; deneyi yapan kişilerin değişmesinden, deneyi yapanların dikkatlerinin zamanla azalmasından, elektrik geriliminin değişmesinden, ölçme aletlerindeki histerizis olaylarından veya cihazların ısınması nedeniyle elektronik ölçme aletlerinde oluşan salınımlardan kaynaklanabilmektedir.

Deneyisel sonuçların geçerliliğinin belirlenmesi için mutlaka bir hata analizi yapmak gerekmektedir. Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan parametrelere ait sabit hata miktarlarının (veya oranlarının) tespiti için pratikte birkaç yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler içerisinde, belirsizlik analizi (uncertainty analysis) ve akılcı yaklaşım (commonsense basis) yöntemleri en çok kullanılanlarıdır.

1.2.2 Belirsizlik Analizi Yöntemi

Herhangi bir deney tesisatı aracılığı ile tespit edilmesi/hesaplanması gereken büyüklük R , bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler ise; $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olsun. Bu durumda;

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1)$$

yazılabilir. Deneylerde etkili olan her bir bağımsız değişkene ait sabit hata değerleri; $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ve R büyüklüğünün sabit hata değeri w_R ise, belirsizlik analizi yöntemine göre;

$$w_R = \pm \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

şeklinde verilmektedir.

1.3 Ders ile İlgili Genel Düzenlemeler

Alınan derslerin bir uygulaması olan laboratuvar dersinin amacına ulaşabilmesi için, aşağıda yer alan genel hususlara uyulması ve deney raporu hazırlamaya gereken önemin verilmesi kaçınılmazdır. Buna göre aşağıdaki düzenlemelere uyulması gerekmektedir.

1.3.1 Ders ile İlgili Genel Hususlar

Dersin daha etkin olabilmesi için aşağıdaki kurallara uyulması gerekmektedir. Buna göre;

- 1) Deneylere gelmeden önce ilgili deney föyü detaylı olarak incelenecektir.
- 2) Deney föyü yanında olmayan öğrenci kesinlikle deneye alınmayacaktır.
- 3) Her öğrenci kendi grubu ile beraber deneylere girecektir.
- 4) Öğrenci, deneylerin % 80'ine katılmak ve bu deneylere ait raporların tamamını teslim etmek zorundadır. Ancak; deney raporlarına ilişkin not ortalaması, toplam deney sayısı dikkate alınarak hesaplanacaktır.
- 5) Deney raporlarında, bu kitapçıkta Ek-1'de gösterilen kapak sayfası kullanılacaktır.
- 6) Deney raporları, ilgili deneyde yapılan ölçümlerin yer aldığı tabloyu da içerecektir.
- 7) Deney raporları, bilgisayar ortamında hazırlanabildiği gibi el yazısı ile de yazılabilir ve raporun kapak sayfası hariç, kâğıtların her iki tarafı da kullanılacaktır.
- 8) Deney raporları, deneyin yapıldığı tarihten itibaren en geç 1 hafta içinde teslim edilecektir. Geç rapor teslimi kesinlikle bir seçenek değildir. Geç teslim edilen raporlar değerlendirilmeye alınmayacaktır.
- 9) Deney raporları, bizzat öğrenci tarafından ilgili uygulama sorumlusuna teslim edilecektir. Kendisine yöneltilecek olan sorulara vereceği cevaplar, ilgili deney raporundan alacağı nota büyük oranda etki edecektir.
- 10) Dönem sonlarında “Telafi Deneyi” yapılmayacaktır.

1.3.2 Deney Raporu Hazırlanışı

- 1) Deney raporlarında, bu kitapçıkta Ek-1'de gösterilen kapak sayfası kullanılacaktır.
- 2) Deney raporunda; kapak sayfası, deneyin amacı, deney tesisatının şematik gösterimi, deney tesisatının ana elemanları ve bu elemanların tanıtımı ile görevleri yer alacaktır.
- 3) Yine deney raporunda; ilgili deneyde yapılan ölçümlerin yer aldığı tablo, hesaplamalar, sonuçların yer aldığı tablo, sonuçlardan hareketle çizilecek grafikler ile sonuç ve yorum bölümleri yer alacaktır.

1.4 Deney Grupları ve Tarihleri

Deney grupları ve deney tarihleri her bir yarıyıl (Güz ve Bahar Yarıyılları) için standart hale getirilmiş olup bunlar; Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3’te gösterilmiştir.

Tablo 1 Deney Haftaları ve Kapsadığı Tarih Aralığı

Yarıyıldaki Hafta	Tarih Aralığı
1. Hafta	17 Eylül
2. Hafta	24 Eylül
3. Hafta	1 Ekim
4. Hafta	8 Ekim
5. Hafta	15 Ekim
6. Hafta	22 Ekim
7. Hafta	29 Ekim
8. Hafta	5 Kasım
9. Hafta	12 Kasım
10. Hafta	19 Kasım
11. Hafta	26 Kasım
12. Hafta	3 Aralık
13. Hafta	10 Aralık
14. Hafta	17 Aralık

Tablo 2 Deney Tarihleri

	1. Deney	2. Deney	3. Deney	4. Deney	5. Deney	6. Deney	7. Deney	8. Deney	9. Deney
Hafta	9. Hafta	4. Hafta	13. Hafta	6. Hafta	12. Hafta	3. Hafta	10. Hafta	11. Hafta	5. Hafta

1.5 Deney Listesi ve İlgili Öğretim Elemanları

Bu yarıyılta yapılacak deneylerin ismi ve bu deneylerden sorumlu olan öğretim elemanları ve deneylerin yapılacağı yer ve tarih aralığı Tablo 4’de gösterilmiştir. Resmi tatil günlerine denk gelen deneyler için deney uygulama sorumlusu telafi zamanı belirleyip yayınlayacaktır.

Tablo 4. Deney Listesi ve İlgili Öğretim Elemanları

Makine Laboratuvarı 1 2025-2026 Güz

Sıra No	Deneyin Adı	Öğretim Üyesi	Uygulama Sorumlusu
1	Bilgisayar Destekli İmalat-I Deneyi	Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ER	Arş. Gör. Ahmet Enes SARAÇ
2	Çekme Deneyi	Prof. Dr. İbrahim UZUN	Arş. Gör. Dr. Türker AKKOYUNLU
3	Gerinim Ölçümü Deneyi	Dr. Öğr. Üyesi Fatih CELLEK	Dr. Öğr. Üyesi Fatih CELLEK
4	Çentik Darbe Deneyi	Doç. Dr. Hakan ARSLAN	Arş. Gör. Ahmet Enes SARAÇ
5	Taşınım İle Isı Geçiş Deneyi	Doç. Dr. Z. Onur PEHLİVANLI	Arş. Gör. Bahadır GEMİCİOĞLU
6	Termodinamiğin I. Yasası Deneyi	Dr. Öğr. Üyesi Hüsamettin TAN	Dr. Öğr. Üyesi Hüsamettin TAN
7	Isı Değiştiricileri Deneyi	Prof. Dr. Yahya DOĞU	Arş. Gör. Bahadır GEMİCİOĞLU
8	Motor Karakteristiklerinin Ölçülmesi Deneyi	Dr. Öğr. Üyesi Emrah KANTAROĞLU	Dr. Öğr. Üyesi Emrah KANTAROĞLU
9	Eklemeli İmalat Deneyi	Dr. Öğr. Üyesi Yunus KARTAL	Dr. Öğr. Üyesi Yunus KARTAL

2. DENEY FÖYLERİ

2.1 BİLGİSAYAR DESTEKLİ İMALÂT-I DENEYİ

Deneyin Adı

Bilgisayar Kontrollü (CNC) Tornalama Merkezinde Parça Üretiminde Kullanılmak Üzere Program Yazılımı ve Tezgahta Uygulanması. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi.

Deneyin Amacı

Bilgisayar Kontrollü Tezgahlar (CNC) çeşitli işlemleri yapmak üzere kullanılacak, işleme değişkenlerinin tespit edilmesi, üretilecek parçaya göre program yazılımı, bu programın tezgahta uygulanması, parçaların üretiminin gerçekleştirilip, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi hedeflenmektedir.

Kullanılan Cihazlar

Bilgisayar Kontrollü Tornalama Merkezi Tezgahtı ve bu tezgahta kullanılacak ilgili kesici ve iş bağlama donanımları. Dinamometre ve yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.

Deneyin Yapılışı

1. Aşağıda verilen parçayı işlemek üzere bir program yazılır. Program yazılırken kullanılacak işleme değişkenleri, malzeme çifti ile ilgili bilgiler göz önünde bulundurularak, ilgili tablolardan (Metal Mesleğinde Tablolar kitabı) seçilir ve parça programına girilir.
2. İşlenecek malzeme Şekil 1’de verilen tezgaha sabitlenir. Kesici sistemleri tezgah üzerindeki yerlere sabitlenir. Parça sıfır noktası, kesici tanıma ile ilgili bilgiler tezgaha girilir.
3. İlerleme değeri f , seçilen değerden başlayarak belirli miktarda artışla değiştirilir ve sonuçta her bir ilerleme değeri için silindirik tornalamada talaş şekli, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne bakılır.



Şekil 1. CNC Tornalama Merkezi

2.1.1. BİLGİSAYARLA SAYISAL DENETİMDE KULLANILAN ISO M VE G KODLARI

M00 : Programı durdurur.
M01 : Opsiyonel durdurma.
M02 : Program sonu.
M03 : Saat yönü dönme başlat.
M04 : Saat yönü tersi dönme başlat.
M05 : Dönmeyi durdur.
M06 : Takım değiştir.
M07 : Kesme SIVISI (pulvarize) aç.
M08 : Kesme SIVISI (normal) aç.
M09 : Kesme SIVISI kapat.
M30 : Programı bitir.

G00 : Hızlı hareket.
G01 : Talaş ilerlemeli doğrusal hareket.
G02 : Saat yönü dairesel hareket.
G03 : Saat yönü tersi dairesel hareket.
G04 : Duraksatma.
G28 : Referans noktasına dönüş.
G40 : Kesici çapı telafisi iptali.
G41 : Kesici çapı telafisi (sol).
G42 : Kesici çapı telafisi (sağ).
G43 : Kesici uzunluğu telafisi.
G48 : Kesici çapı telafisi.
G49 : Kesici uzunluğu telafisi iptali.
G54 – G59 : Sabitleme elemanları ofsetleme.
G73 : Talaş kırıcı delme döngüsü.
G80 : Döngü iptali.
G81 : Delme döngüsü.
G82 : Alın işleme döngüsü.
G83 : Derin delme döngüsü.
G84 : Kılavuz çekme döngüsü.
G85 : Delik büyültme ve raybalama döngüsü.
G86 : Raybalama döngüsü.
G87 : Raybalama döngüsü.
G88 : Raybalama döngüsü.
G89 : Raybalama döngüsü.
G90 : Mutlak pozisyonlama.
G91 : Artışlı pozisyonlama.
G93 : Sabit kesme hızı
G97 : Sabit devir
G98 : İlerleme/(mm/dak)
G99 : İlerleme/(mm/dev)

2.1.2. İŞLENECEK PARÇA

Ø50*110 boyutlarda silindirik, malzemesi alüminyum alaşım.

2.1.3. ÖRNEK PROGRAM

O 4307;	{Program numarası 4307}
T0101;	{1 numaralı takımı 1 numaralı telafi ile al}
G96 S 150 M3;	{150 m/dak sabit kesme hızıyla saatin tersi yönünde aynayı döndür}
G0 X50. Z2;	{X=50, Z=2 koordinatlarına hızlı hareketle git}
G1 X47. F 0.2;	{X=47 koordinatına, f=0.2 mm/dev ile ilerleme hareketiyle git}
G1 Z-50. F0.2;	{Z=-50 koordinatına, f=0.2 mm/dev ile ilerleme hareketiyle git}
G1 X50. Z5. F2;	{X=50, Z=5 koordinatına, f=2 mm/dev ile ilerleme hareketiyle git}
M5;	{Ayna dönmesini durdur}
G28 U0W0;	{Referans noktasına dön}
M30;	{Programı sonlandır}

2.1.4. YAPILACAK İŞLEMLER

1. Değişen malzeme, talaş derinliği, ilerleme ve kesme hızı değerleri için her öğrenci tarafından ayrı bir program hazırlanacak. Hesaplamalar yapılacaktır.
2. İlerleme değeri f_{min} = ____ değerinden başlayarak ____'lik artışla f_{max} = ____ değerine kadar değiştirilecek ve sonuçta her bir ilerleme değeri için silindirik tornalamada kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumuna bakılacaktır.

Önemli Not: Deneye ait föyü teslim ederken sadece sonuç ve değerlendirmeler kısmını teslim ediniz. Deneye ait bilgilendirme kısmı (üst kısım) sizde kalsın.

2.1.5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Adı Soyadı	
Numarası	

1. Örnek program için işleme süresini, kesme kuvvetini ve harcanan gücü hesaplayınız. Bulduğunuz kesme kuvvetini dinamometrenin ölçtüğüyle karşılaştırınız. Yorumlayınız.
2. Laboratuvarda yapılan tornalama işleminde değişen ilerleme değerlerine göre oluşan kesme kuvvetini yorumlayınız.

3. Laboratuvarda yapılan silindirik tornalama işleminde, değişen ilerleme değerlerine göre oluşan yüzey pürüzlülüğünü yorumlayınız.

4. Aşağıdaki işleme değişkenlerine göre parça programını oluşturunuz.

İşlenen Malzeme		Kesme Derinliği	
Kesici Malzemesi		Kesilecek uzunluk	
Kesme Hızı		Malzemenin ilk çapı	
İlerleme		Malzemenin son çapı	

5. Dört farklı malzeme (Örnek:1.Hafif metal alaşımları, 2. Paslanmaz çelikler, 3. Genel yapı çelikleri, 4. Dökme demirler vb.) seçerek malzeme numaralarını yazınız. Değişen bu malzemeler için oluşan kesme kuvvetlerini sizin yazdığınız program için teker teker hesaplayınız. Değişimi yorumlayınız.

2.2 ÇEKME DENEYİ

1. Giriş ve Deneyin Amacı

Mühendislik malzemelerinin çoğu, uygulanan gerilmeler altında biçimlerini kalıcı olarak değiştirirler, yani plastik şekil değişimine uğrarlar. Bu malzemelerin hangi koşullar altında ve ne zaman kalıcı şekil değişimine uğrayacaklarını bilmek çok önemlidir. Çeşitli yapı elemanlarının veya makina parçalarının etkisinde bulundukları yükler altında biçimlerini değiştirmesi istenilmeyen bir olaydır. Çekme deneyi malzemelerin mukavemeti hakkında esas dizayn bilgilerini saptamak ve malzemelerin özelliklere sınıflandırılmasını sağlamak amacı ile geniş çapta kullanılır. En çok uygulanan tahribatlı malzeme muayenesi yöntemlerinden biri olan çekme deneyi sonucunda elde edilen veriler, doğrudan mühendislik hesaplarında kullanılmaktadır.

2. Deneyin Yapılışı

Çekme deneyi, standartlara göre hazırlanan deney numunesinin (örnek), sabit sıcaklıkta ve tek ekseninde, belirli bir hızla koparılıncaya kadar çekilmesi işlemidir. Deney sırasında, numuneye sürekli olarak değişen çekme kuvveti uygulanarak, meydana gelen uzama kaydedilir. Çekme deneyi sonucunda numunenin temsil ettiği malzemeye ait aşağıdaki mekanik özellikler bulunabilir:

Elastisite (Katılık) modülü,

Elastiklik sınırı,

Rezilyans modülü,

Akma gerilmesi,

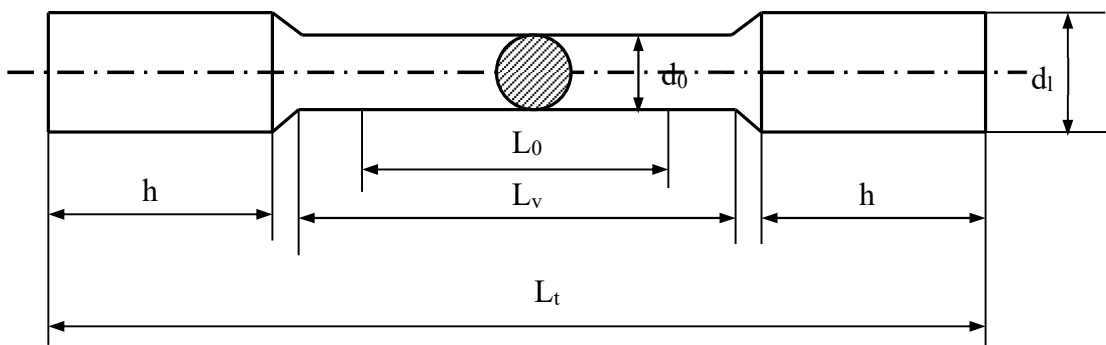
Çekme dayanımı,

Tokluk,

% Uzama (ve kopma uzaması),

% Kesit daralması (ve kopma büzülmesi).

Şekil 1a'da yuvarlak kesitli ve silindirik başlı, Şekil 1b'de ise levha şeklinde kalın yassı bir malzeme için çekme numunesi örnekleri verilmiştir.



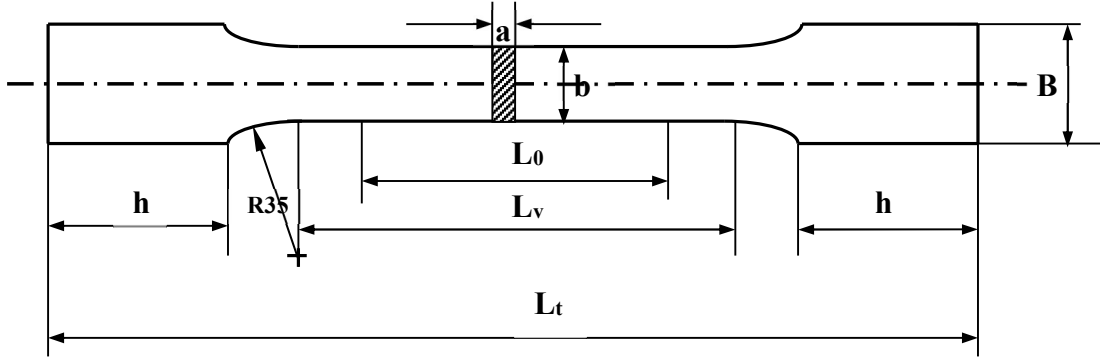
Şekil 1a. Yuvarlak kesitli silindirik başlı çekme numunesi örneği

Burada;

d_0 = Örneğin çapı

d_1 = Baş kısmının çapı $\cong 1.2d_0$

l_v = İnceltilmiş kısmın uzunluğu = $l_0 + d_0$
 l_0 = Ölçü uzunluğu $\cong 5d_0$
 l_t = Toplam uzunluk
 h = Baş kısmının uzunluğu anlamındadır.



Şekil 1b. Levha şeklinde kalın yassı çekme numunesi örneği

Burada;

a = Numunenin Kalınlığı
 b = Ölçü uzunluğu içinde numune genişliği
 B = Baş kısmın genişliği $\approx 1.2b+3$ anlamındadır.

Bu tip örneklerin kısa gösterilişi:

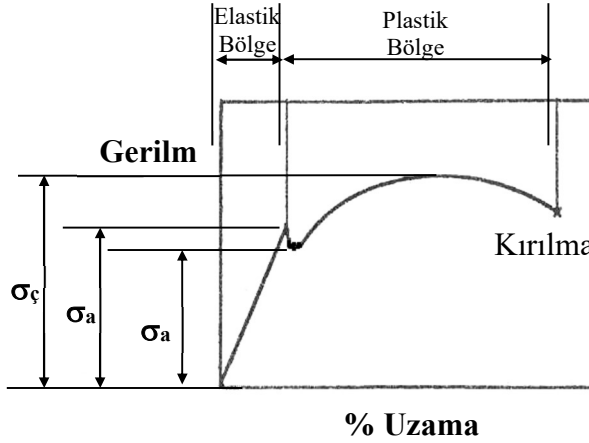
Çapı (d_0)= 12 mm ve ölçü uzunluğu (l_0)= 60 mm olan çekme örneği; 12x60 TS 138 A şeklinde gösterilebilir.

3. Çekme Deneyinden Elde Edilen Veriler

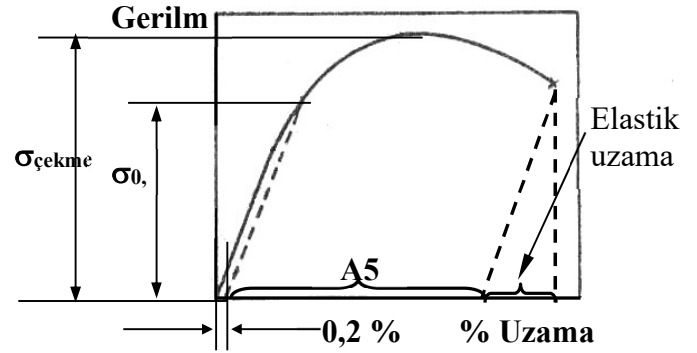
Çekme deneyi sırasında elde edilen gerilme ve uzama değerleri aşağıdaki bağıntılar yardımıyla bulunur:

Çekme gerilmesi (σ) = F/A_0	F = Çekme kuvveti
Birim uzama (e veya ϵ) = $\Delta l/l_0$	A_0 = Deney numunesinin ilk kesit alanı
Yüzde uzama ($\%\epsilon$) = $\Delta l/l_0 \times 100$	l_0 = Deney numunesinin ilk ölçü boyu
	Δl = Uzama miktarı

Çekme diyagramı, gerilme-birim uzama (σ - ϵ) veya gerilme-yüzde uzama (σ - $\%\epsilon$) eğrisini gösterir. A_0 ile l_0 sabit olduğuna göre σ - ϵ eğrisi, çekme makinasının kaydettiği F - Δl diyagramına benzer şekle sahiptir. Düşük karbonlu yumuşak çelik ve sertleştirilmiş çeliğe ait çekme diyagramları Şekil 2' de verilmiştir.



a) Düşük karbonlu yumuşak çeliğin



b) Belirgin akma göstermeyen sertleştirilmiş çeliğin

Şekil 2. Çekme diyagramları

Çekme deneyi sonucunda numunelerin temsil ettiği malzemeye ait aşağıda verilen mekanik özellikler belirlenebilir.

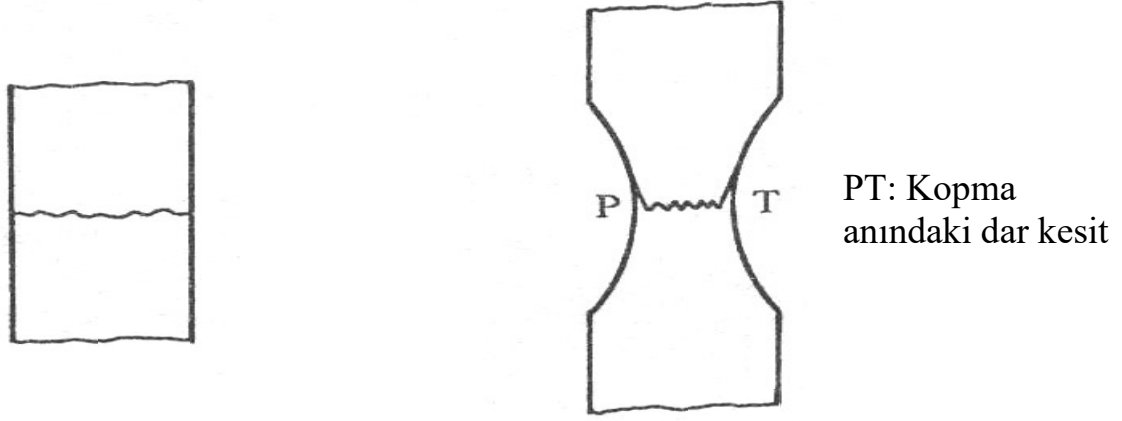
a) *Orantı Sınırı* (σ_0): Gerilme ile birim uzama arasında $\sigma = E \varepsilon$ bağıntısının (Hooke kanunu) geçerli olduğu doğrusal kısmı sınırlar. Bu bağıntıdaki orantı katsayısı E, elastiklik (esneklik) modülü adını alır ve doğrunun eğimini gösterir. Ahşap, kauçuk ve deri gibi bazı malzemelerin $\sigma - \varepsilon$ diyagramında böyle bir doğrusal bölge bulunmadığı için, sabit bir E değeri yerine ancak, belirli bir noktadaki teğetin eğimi söz konusu olur. Bir malzemenin elastiklik modülü ne kadar büyükse, rijitliği yani elastik şekil değiştirmeye karşı direnci de o oranda büyüktür. Bir malzemeye ait elastiklik modülü herhangi bir ısı veya mekanik işlem yardımıyla değiştirilemez.

b) *Elastiklik Sınırı* (σ_E): Kuvvet kaldırıldığı zaman plastik (kalıcı) uzamanın görülmediği veya yalnız elastik şekil değiştirmenin olduğu en yüksek gerilmedir. Genellikle, aralarındaki farkın çok az olması nedeniyle orantı sınırına eşit kabul edilebilir. Pratik olarak yerine, % 0.01 veya %0.005'lik plastik uzamaya karşılık gelen veya değerleri alınır.

c) *Akma dayanımı* (σ_a): Gerilmenin yaklaşık olarak sabit kalmasına karşılık, plastik şekil değiştirmenin önemli ölçüde arttığı ve çekme diyagramının düzgünsüzlük gösterdiği gerilme değeridir. Bu belirgin akma sınırı ancak bazı malzemelerde, örneğin düşük karbonlu yumuşak çelikte, deney şartlarına bağlı olarak görülebilir. Akmanın başladığı gerilme değeri üst akma sınırı $\sigma_{a.ü}$ ve akmanın devam ettiği ortalama gerilme de alt akma sınırı $\sigma_{a.a}$ olarak adlandırılır (Şekil 2.b.). Akma sınırının belirgin olmaması halinde bunun yerine, genellikle %0.2'lik plastik uzamaya ($\% \varepsilon_{plastik} = 0.2$ veya $\varepsilon_{plastik} = 0.002$) karşılık gelen gerilme $\sigma_{0.2}$ sınırı alınır.

d) *Çekme dayanımı* ($\sigma_{\check{c}}$): Bir malzemenin kopmadan veya kırılmadan dayanabileceği en yüksek çekme gerilmesi olarak tanımlanır. Bu gerilme, çekme diyagramındaki en yüksek gerilme olup, $\sigma_{\check{c}} = F_{max}/A_0$ formülü ile bulunur. Bu gerilmeye kadar deney parçasının kesiti her tarafta aynı oranda azaldığı halde, bu noktadan sonra deney parçası bir bölgede yerel olarak büzölmeye başlar (boyun verme) ve daha küçük bir gerilmede kopar. Maksimum gerilmenin ($\sigma_{\check{c}}$) uygulanması sonuçta kopmaya yol açtığından ve kırılma noktasındaki gerilmenin pratik bir anlamı bulunmadığından, $\sigma_{\check{c}}$ yerine kopma noktasındaki gerilmeyi gösteren σ_k simgesi kullanılabilir.

e) *Kopma Uzaması (K.U.):* Çekme örneğinin kopuncaya veya kırılıncaya kadar gösterdiği yüzde uzama miktarı olarak tanımlanır. Deney parçasının kopan kısımlarının bir araya getirilmesi ile ölçülen l_k ve $\Delta l_k = l_k - l_0$ yardımıyla $K.U. = \% \Delta l_k / l_0 \times 100$ bağıntısı yardımıyla bulunur. Bu değer ne kadar büyükse malzeme o derece sünektir anlamına gelir. Bir malzemede σ_k ve σ_{ϵ} değerlerini yükselten etkenler çoğunlukla sünekliliği azaltırlar.



a) Gevrek malzemenin kopması (büzülme yok) b) Sünek malzemenin kopması (büzülme var)

Şekil 3. Gevrek ve sünek malzemenin kopması

Plastik şekil değişimine elverişli olmayan malzemeye gevrek malzeme denir. Bu nedenle, gevrek malzemeler teorik olarak kopma uzaması ve kopma büzülmesi (boyun verme) göstermezler. Ancak, uygulamada % 1-2 gibi düşük oranlarda kopma uzaması gösteren malzemeler de gevrek kabul edilir. Şekil 3’de gevrek ve sünek malzemelerin kopma davranışı şematik olarak gösterilmiştir.

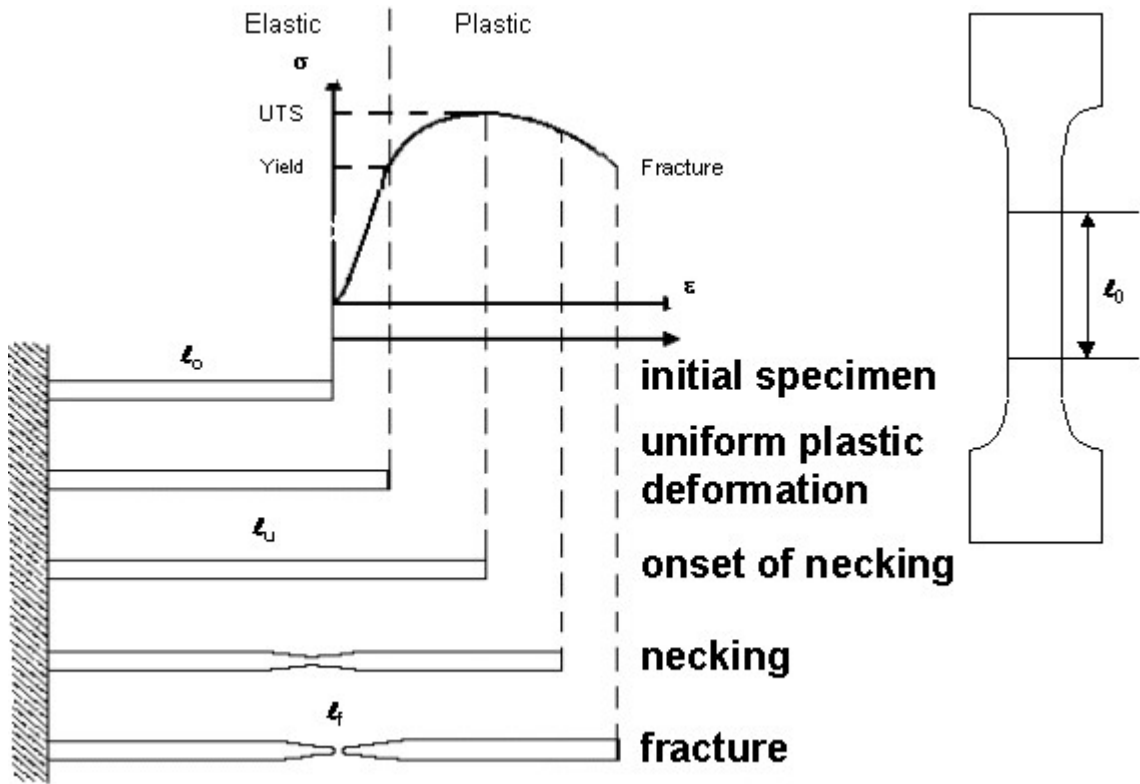
Büzülme gösteren malzemelerde Δl_k değeri, ölçü uzunluğundan (l_0) başka, numune çapı (d_0) ile orantılı olduğundan, bir malzeme için daima aynı kopma uzaması değerini elde edebilmek amacıyla, $l_0 = a \cdot d_0$ alınır. Buradaki a sabiti genellikle 5 veya 10 olarak seçilir. Dairesel kesitli olmayan deney parçalarında ise;

olarak alınır.

$$l_0 = a \sqrt{\frac{4A_0}{\pi}}$$

Süneklilikle karıştırılmaması gereken başka bir kavram da elastiklikdir. Bütün malzemelerde bir elastiklik bölgesi bulunmakla birlikte, metalik malzemelerin çoğu %1'den daha düşük elastik uzama gösterirler. Bir plastik malzeme türü olan elastomerler ise, yüzde bir kaç yüz mertebesine varan oranlarda elastik uzama gösterebilirler.

f) *Kopma büzülmesi (K.B.):* Çekme numunesinin kesit alanında meydana gelen en A_0 - A_k büyük yüzde daralma veya büzülme miktarı olup, $K.B. = (A_0 - A_k) / A_0 \times 100$ bağıntısı ile hesaplanır ve bulunan değerler kopma uzaması gibi, süneklilik için bir göstergedir. Burada, A_0 deney numunesinin ilk kesit alanı, A_k ise, kırılma anındaki en küçük kesit alanı veya kırılma yüzeyinin alanıdır.



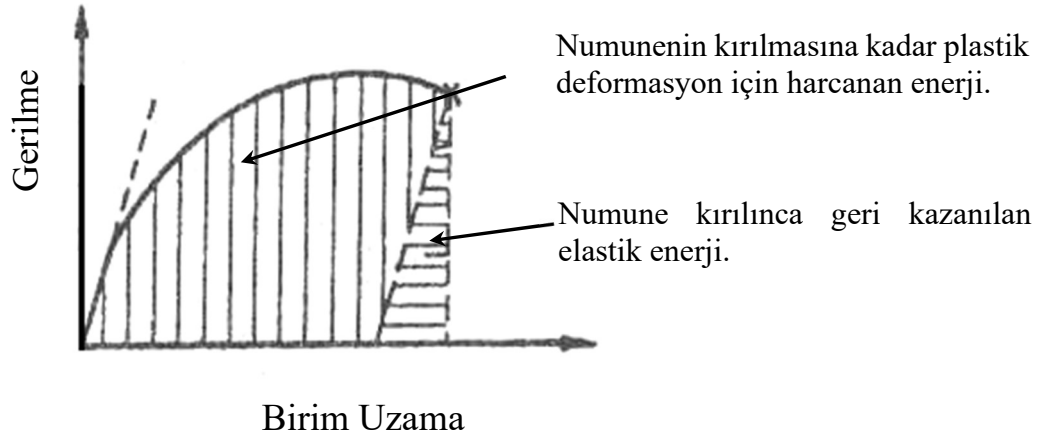
Şekil 4. Yuvarlak kesitli silindirik başlı çekme numunesinin çekme deneyi sırasında boyunda ve kesit alanında oluşan deformasyonlar

g) *Rezilyans Modülü*: Malzemenin yalnız elastik şekil değiştirme sırasında enerji absorbe etme yeteneğine denir. Bu enerji, gerilme (σ) birim uzama (ϵ) eğrisinin elastik kısmının altında kalan alan ile belirlenir (Şekil 5). Birim hacimde absorbe edilen bu enerji,

$$u_e = \frac{\sigma_{akma}^2}{2E}$$

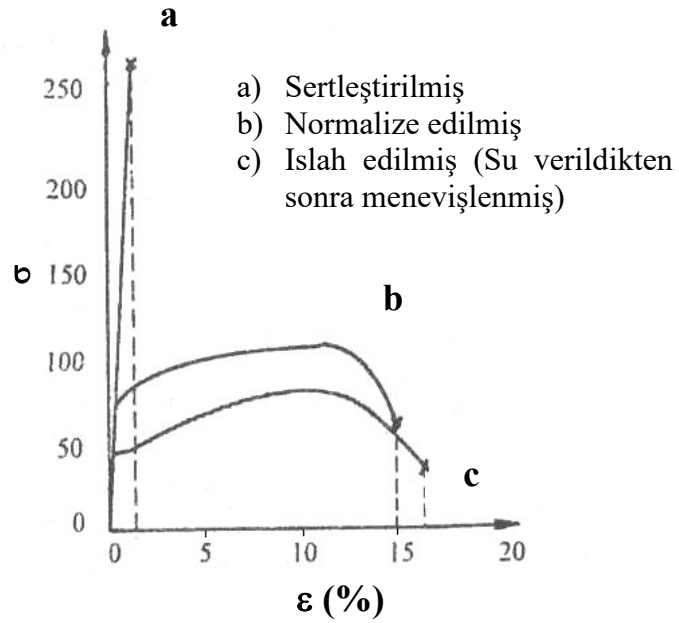
şeklinde hesaplanabilir.

h) *Tokluk*: Malzemenin kırılıncaya kadar enerji absorbe etme yeteneğine denir. Genellikle σ - ϵ eğrisinin altında kalan alanın $A = \int_0^{\epsilon_k} \sigma d\epsilon$ hesaplanması ile bulunur. Birim hacim başına düşen kırılma enerjisi olarak tanımlanan tokluk, kırılmaya karşı direnç için bir ölçü kabul edilir (Şekil 5). Bu değerle, örneğin, darbeli zorlama halinde bulunan dinamik tokluk arasında bir bağıntı yoktur. Sünekliğin olduğu gibi, tokluğun karşıtı olarak da gevreklik deyimi kullanılır.

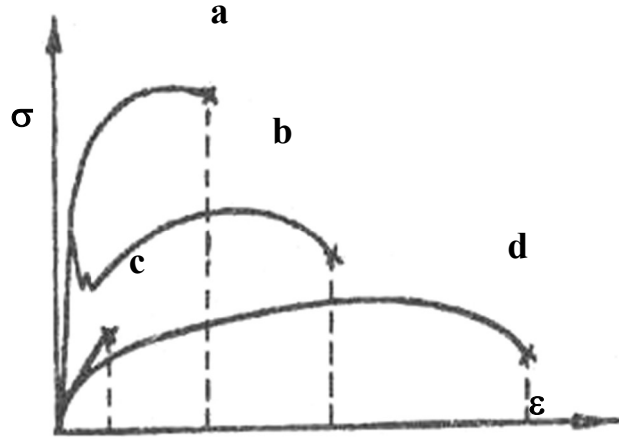


Şekil 5. Gerilme-birim uzama eğrisinin altındaki alan şekil değişimi için gerekli enerjiyi (tokluğu) vermektedir.

C60 çeliğinin çeşitli durumları için çekme diyagramları Şekil 6'da verilmiştir. Bu şekilden, söz konusu çeliğin (a) durumunda gevrek ancak, (b) ve (c)'ye göre rezilyansının daha fazla olduğu görülmektedir. Çoğunlukla sünek malzeme tok olur. Ancak, (b) ve (c) eğrilerinin karşılaştırılmasından, süneklik ve tokluğun daima aynı yönde değişmediği yani (c) durumunda süneklik biraz azaldığı halde, tokluğun arttığı görülmektedir. Şekil 7'de çeşitli malzemelere ait çekme diyagramları verilmiştir.



Şekil 6. C60 çeliğinin çeşitli durumları için çekme diyagramları



Şekil 7. Çeşitli malzemelerin çekme diyagramları

- a) Yüksek mukavemetli çelik (yarı sünek).
- b) Yumuşak çelik (sünek).
- c) Kır dökme demir (gevrek).
- d) Tavlanmış bakır (sünek).

4. Çekme Deneyinin Genel Değerlendirilmesi

Çekme deneyi sonucunda, çekme diyagramı, (σ - ϵ eğrisi) elde edilerek, malzemenin akma ve çekme dayanımı gibi mukavemet değerleri ile kopma uzaması ve kopma büzülmesi gibi süneklik değerleri belirlenmektedir. Söz konusu değerler, malzemenin cinsine, kimyasal bileşimine ve metalografik yapısına bağlıdır. Metalografik yapı ise malzemeye uygulanan ısıtma işlemiyle, ısıtma işlemi bir malzemenin hem yapısını, hem de özelliklerini etkilemektedir. Bu nedenle, endüstride uygulanan ısıtma işlemlerin malzemelerin mekanik özelliklerine etkileri çekme deneyi ile incelenebilir.

Buraya kadar, çekme numunesinin son durumu ile ilk durumunun karşılaştırılması ile elde edilen mühendislik veya teknolojik gerilme (σ_m) uzama (e) eğrileri incelendi. Ancak, ilk durum deney süresince devamlı değişime uğradığından özellikle plastik şekil değişimi için, Her noktadaki gerilme ve birim şekil değişiminin o andaki boyuta göre hesap edilmesi daha uygundur. Bu nedenle, mühendislik gerilmesi ve mühendislik birim şekil değişiminden farklı olarak gerçek gerilme (σ_g) ve gerçek birim şekil değiştirme (ϵ) tanımlanır. Bilindiği gibi, mühendislik gerilmesi (σ_m) = F_i / A_0 formülü ile hesaplanır. Buradaki F_i deformasyonun herhangi bir i anında numuneye etki eden kuvvet, A_0 ise numunenin ilk kesit alanıdır.

Mühendislik veya teknolojik birim şekil değiştirme ise;

bağıntısı ile hesaplanır. Burada da, l_0 numunenin ilk uzunluğu, l_i ise herhangi bir i anındaki

$$e = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l_0} = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

uzunluğudur.

Gerçek gerilme (σ_g), uygulanan kuvvetin deney parçasının o andaki en küçük kesit alanına bölünmesi ile elde edilir ve $\sigma_g = F_i / A_i$ bağıntısı ile hesaplanır.

Burada F_i deformasyonun herhangi bir i anında numuneye etki eden kuvvet, A_i ise kuvvetin uygulandığı andaki deney numunesinin kesit alanıdır. Gerçek birim uzama (ε), deney parçasının boyundaki küçük dl değişiminin o andaki l boyuna oranının integrali olarak tanımlanabilir ve

$$\varepsilon = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_0}$$

bağıntısı ile belirlenir. Buradan hareketle ve plastik şekil değişimi sırasında numunenin hacminin (V) değişmediği, yani;

$A_0.l_0 = A_i.l_i = V$ olduğu düşünülerek; $A_i = A_0.l_0 / l_i$ olarak bulunur.

Mühendislik birim uzaması (e) $= \frac{l_i - l_0}{l_0} \Rightarrow \frac{l_i}{l_0} = 1 + e$ olur. Buradan,

Gerçek gerilme: $(\sigma_g) = \frac{F_i}{A_i} = \frac{F_i l_i}{l_0} = \frac{F_i}{A_0} \times \frac{l_i}{l_0} = \sigma_m (1 + e)$ olarak bulunur.

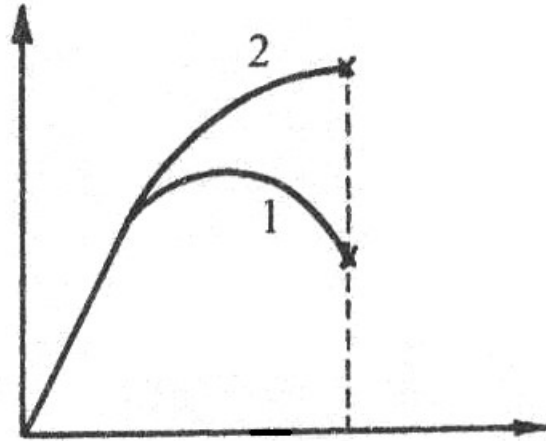
Gerçek uzama: $(\varepsilon) = \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln(1 + e)$

olarak yazılabilir. Sonuçta gerçek ve mühendislik değerler arasındaki ilişki;

$$\sigma = \sigma_m (1 + e), \varepsilon = \ln(1 + e)$$

şeklinde yazılabilir.

Herhangi bir malzemeye ait mühendislik ve gerçek gerilme-birim uzama eğrileri Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Mühendislik ve gerçek gerilme-birim uzama eğrileri:

(1) $\sigma_m - e$ ve (2) $\sigma_g - \varepsilon$

Her iki eğri birim uzamanın küçük değerleri için aynı kabul edilir.

Yukarıdaki şekilden görüldüğü gibi, gerçek gerilme kopma noktasına kadar sürekli artmakta olduğu görülmekte, böylece malzemenin büzülmede de dahil olmak üzere, plastik şekil değiştirme sırasında sertleştiği anlaşılmaktadır. Bu tür sertleşmeye pekleşme veya deformasyon sertleşmesi adı verilir. Dikkati çeken başka bir özellik, söz konusu eğrinin eğiminin ($d\sigma_g/d\varepsilon$) gittikçe azalması yani pekleşme derecesinin küçülmesidir. Bu prensiplerin ışığı altında, 2 numaralı eğrinin ($\sigma_m - \varepsilon$) oluşmasında rol oynayan iki etkenden söz edilebilir: Pekleşme ve kesit daralması. Yalnız pekleşme olsaydı, ε arttıkça σ_m' in artması gerekirdi. Buna karşılık yalnız kesit daralması olsaydı, ε arttıkça σ_m' in azalması gerekirdi. $\sigma_m - \varepsilon$ eğrisinde, maksimum noktaya kadar pekleşme etkisi ağır basar. Ancak, pekleşme derecesi devamlı küçüldüğünden, maksimum noktada pekleşme etkisi kesit daralması etkisine eşit olur. Bu noktadan sonra ise; kesit daralması etkisi daha üstün duruma geçer, yani deney parçasının işleme veya malzeme hatasından dolayı zayıf bir kesiti bir an için daha fazla şekil değişimine uğratabile, bu bölge derhal pekleşir ve dolayısıyla diğer bölgeler denge sağlayıncaya kadar şekil değiştirmeye devam eder (homojen şekil değiştirme veya plastik denge). Oysa maksimum noktadan sonra pekleşmenin etkinliği azaldığından, herhangi bir noktadaki kesit daralması sürekli duruma geçer ve tüm şekil değiştirme bu bölgede yoğunlaşır (büzülme veya plastik dengesizlik).

Basit bir çekme deneyi sonucunda elde edilen gerçek gerilme (σ_g)-gerçek birim şekil değiştirme eğrisine genellikle "plastik akış" eğrisi adı verilir. Zira bu eğri, belirli bir deformasyon oranı için metalin plastik olarak akışını sağlayacak gerilmeleri vermektedir. $\sigma_g - \varepsilon$ eğrisinin, numunenin her bölgesindeki homojen plastik deformasyonunu karakterize eden kısmı, matematiksel olarak:

$$\sigma_g = K \cdot \varepsilon^n$$

Bağıntısı ile ifade edilebilir. Burada n deformasyon sertleşmesi üssü, K ise mukavemet katsayısı olup, $\varepsilon = 1$ için elde edilen gerilmeye eşdeğerdir.

5. Raporda İstenenler

Rapor TS 88 A4 ebatlarında beyaz dosya kâğıdına mavi veya siyah mürekkepli kalemle yazılacaktır. Kâğıdın sol ve üst kenarında 3 cm, sağ ve alt kenarda 2.5 cm boşluk bırakılacaktır.

Rapor; kapak, irdeleme, deneyin amacı, konu ile ilgili teorik bilgiler, deneysel çalışmalar, sonuçlar ve kaynaklar bölümlerini içerecektir. Her bölümde bölüm başlıkları büyük harfle yazılarak desimal sisteme göre numaralandırılacaktır.

Raporda ölçme sonuçları tablolar halinde verilmelidir. Anlatımda "ölçüldü, bulundu, hesaplandı" gibi ifadeler kullanılmalıdır.

Sonuçlar bölümünde incelenen numuneler için çekme diyagramlarının çizilmesi gerekir. Teorik bilgiler için elinizdeki föyden faydalanabilirsiniz.

Çizelge 1. Deneyden alınan ölçümler

ÖLCÜMLER	
<u>Numune Çapı (d_0)</u>	
<u>Ölçü Uzunluğu (l_0)</u>	
<u>Akma Kuvveti (F_0)</u>	
<u>En Yüksek Çekme Kuvveti (F_{maks})</u>	
<u>Son Boy (l_k)</u>	
<u>Son Çap (d_k)</u>	
<u>İlk Kesit Alanı (A_0)</u>	
<u>Son Kesit Alanı (A_k)</u>	

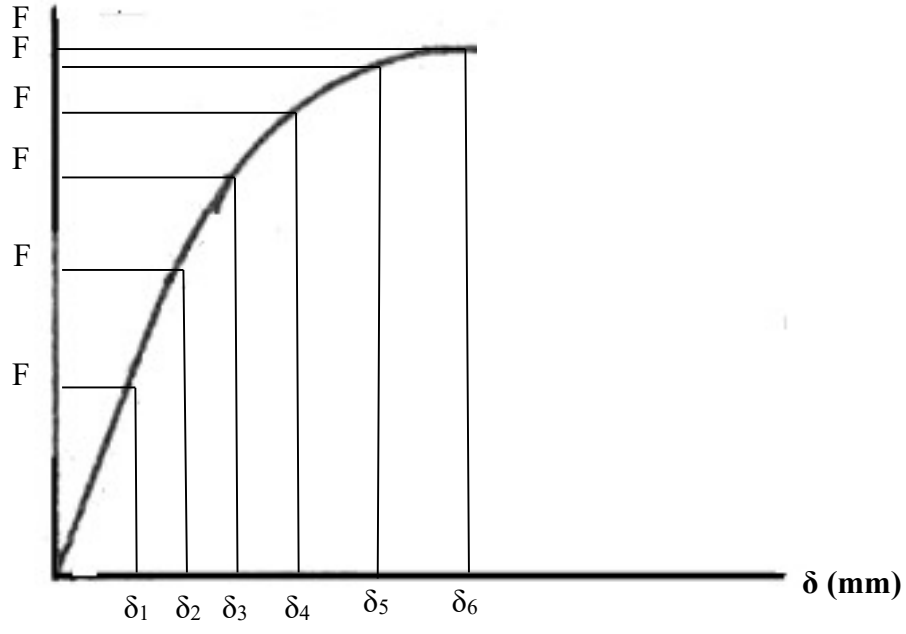
a) Farklı kaynaklardan (malzeme kitapları, internet ortamında hazırlanmış sunular...) çekme deneyi ile ilgili genel bilgiler bulunarak deney raporuna eklenecek.

b) Deney sonrasında verilen malzemenin Kuvvet (F) – Uzama (δ) grafiğinden yararlanarak Şekil 9’da gösterildiği gibi en az 6 noktadan alınan kuvvet – uzama ($F_1-\delta_1$; $F_2-\delta_2$; $F_3-\delta_3$; $F_4-\delta_4$; $F_5-\delta_5$; $F_6-\delta_6$) değerleri yardımıyla Mühendislik Gerilme – Gerinim diyagramı ve Gerçek Gerilme – Gerinim diyagramlarını excel programında ve elle çiziniz. Diyagramları çizerken Çizelge 2’ye benzer bir tablo oluşturunuz. Çizilecek grafik için değerleri bu tablodan alınız.

Çizelge 2. Örnek Tablo

<u>Kuvvet</u> <u>F (N)</u>	<u>Uzama</u> <u>δ (mm)</u>	<u>İlk Çap</u> <u>(mm)</u>	<u>İlk Alan</u> <u>(mm²)</u>	<u>Müh Gerilmesi</u> <u>σ (MPa)</u>	<u>Müh Gerinimi</u> <u>ϵ (mm/mm)</u>	<u>Gerçek Gerilme</u> <u>σ (MPa)</u>	<u>Gerçek Gerinim</u> <u>ϵ(mm/mm)</u>
<u>F_1</u>	<u>δ_1</u>	<u>d_0</u>	<u>A_0</u>	<u>$\sigma_{1müh}$</u>	<u>$\epsilon_{1müh}$</u>	<u>σ_{1ger}</u>	<u>ϵ_{1ger}</u>
<u>F_2</u>	<u>δ_2</u>	<u>d_0</u>	<u>A_0</u>	<u>$\sigma_{2müh}$</u>	<u>$\epsilon_{2müh}$</u>	<u>σ_{2ger}</u>	<u>ϵ_{2ger}</u>
<u>..</u>	<u>..</u>	<u>..</u>	<u>..</u>	<u>..</u>	<u>..</u>	<u>..</u>	<u>..</u>

F (kN)



Şekil 9. Örnek Kuvvet Uzama Diyagramı



Şekil 10. Çekme-basma deney düzeneği görseli

2.3 GERİNİM ÖLÇÜM DENEYİ

1. Deneyin Amacı

Makine mühendisliği öğrencilerine deneysel mukavemet araştırmalarında strain-gauge(gerinim ölçerlerin) kullanılması ile ilgili temel bilgileri vermektir. Bu deneyin anlaşılabilmesi için öğrencilerin mukavemet ve fizik derslerinde verilen temel bilgilere sahip olması gerekir. Deneyde ölçülecek büyüklükler mukavemet formülleriyle de kontrol edilebilecek şekilde seçilmişlerdir. Deneyin sonucunda öğrenci ölçülen ve hesaplanan değerlerin arasındaki farkın nerelerden geldiğini izah edebilmelidir.

2. Giriş

Mukavemet problemlerinin çözümünde, yani bir yapı elemanındaki şekil değiştirme ve gerilmelerin tayininde iki yöntem vardır:

- i. Hesap
- ii. Deney

Mukavemet hesaplarının yapılamadığı veya çok zaman alacağı durumlarla, emniyet kavramının ön plana çıktığı durumlarda deneye başvurulur. Ayrıca bir problem hesap yöntemi ile çözülmüşse yapılan basitleştirici kabullerin doğruluk derecesi deneylerle kontrol edilebilir. Mukavemet araştırmalarında kullanılan en önemli iki deney yöntemi şunlardır:

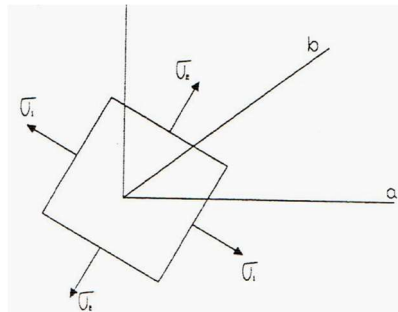
- i. Strain-gauge tekniği
- ii. Gerilme optiği

Bu iki yöntemden en çok kullanılanı, ölçmeler elektrik devresiyle yapılabildiği ve sonuçlar sayısal olarak göstergelere yansıtılabildiği için strain-gauge tekniğidir. Bu tekniğe geçmeden önce katı cisimlerdeki şekil değiştirmelere ait bazı temel bilgileri hatırlamak faydalı olacaktır.

3. Katı Cisimlerde Gerilme Şekil Değiştirme Bağlılıları

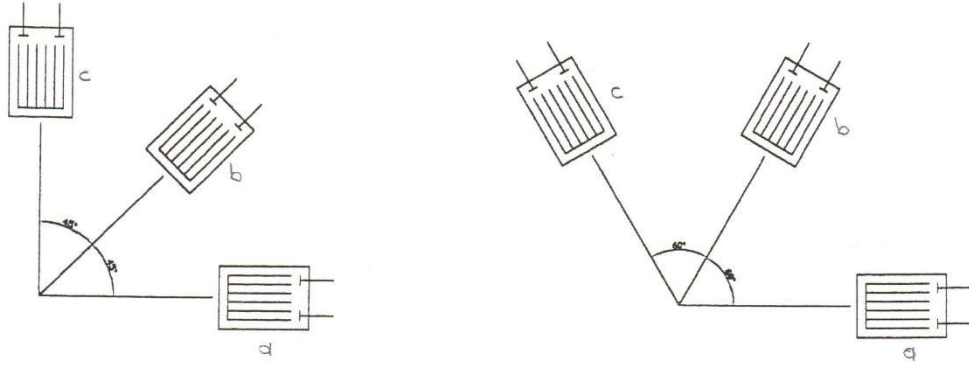
Pratikte zorlanmalar bir, iki veya üç eksenli olarak ortaya çıkabilir. Bir eksenli gerilme halinin teorisi basittir. Burada iki eksenli gerilme haliyle sınırlı kalınacaktır. Üç eksenli gerilme haline ait bilgiler mukavemet kitaplarında bulunabilir[1].

Kesilmiş olarak düşünülen bir katı cismin kesitinde kayma gerilmeleri ortaya çıkmıyorsa o kesitteki normal gerilmeye asal gerilme adı verilir. Asal gerilmeler bir yapı elemanının zorlanması hakkında fikir verdiğinden deneysel gerilme analizinde temel soru, bir yapı elemanının bir noktasındaki asal gerilmelerin büyüklüğü ve yönünün ne olduğudur(Şekil 1).



Şekil 1. Asal gerilmeler

Düzlem gerilme analizinde genellikle rozet şeklinde gerinim ölçerler kullanılır[2]. Şekil 2 de görüldüğü gibi rozetteki gage'lerin arasındaki açılar 45° veya 60° olabilir.



Şekil 2. 45⁰ ve 60⁰ açılarda rozet şeklinde gerinim ölçerler

45°'lik rozetler kullanılması halinde; ϵ_a , **a** gerinim ölçeri, ϵ_b , **b** gerinim ölçeri ve ϵ_c , ise **c** gerinim ölçerinin ölçtüğü birim uzamalar ve μ malzemenin Poisson Oranı olmak üzere σ_1 ve σ_2 asal gerilmeleri:

$$\sigma_1 = \sigma_{\max} = \frac{E}{1-\mu} \frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{2} + \frac{E}{1+\mu} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{\min} = \frac{E}{1-\mu} \frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{2} - \frac{E}{1+\mu} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2} \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir [3].

σ_1 asal gerilmesinin **a** gauge'i ile yaptığı θ açısının büyüklüğü de;

$$\tan 2\phi = \frac{\epsilon_a + \epsilon_c - 2\epsilon_b}{\epsilon_a - \epsilon_c} \quad (3)$$

formülü ile bulunabilir. σ_1 asal gerilmesinin doğrultusu **a** gauge'inden itibaren saat yönünde ϕ açısı kadar dönülerek bulunur.

4. Strain-Gauge Tekniği

Bir malzemede oluşan gerinmeyi ölçmek için çoğunlukla strain gauge kullanılır. Strain gauge, maruz kaldığı gerinmeyle orantılı olarak elektriksel direnci değişen bir cihazdır. En çok tercih edileni Şekil 3'te görüldüğü gibi metalik strain gauge'tir.

Strain-gauge'ler esas itibari ile elektrik direnç telleri olup, şekil değişikliği araştırılacak yapı elemanına yapıştırılır ve yapı elemanı ile birlikte deforme olması sağlanır. Bu esnada gauge'in elektrik direnci değişir. Bu direnç değişikliği ile yapı elemanındaki birim şekil değiştirme arasında;

$$\epsilon = \frac{1}{k} \frac{\Delta R}{R} \quad (4)$$

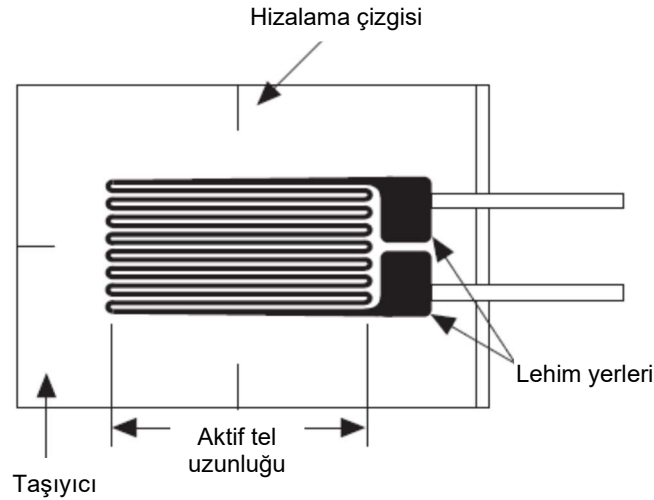
bağıntısı vardır. Buradaki orantı katsayısı k , Gauge Faktörü adını alır ve strain-gauge üreticileri tarafından verilir. Bu faktör strain-gauge rozetinin uzama hassasiyetini vermektedir. Normal şartlar altında 2-5 arasında Gauge Faktörü tanımlanmaktadır. (4) nolu bağıntıya dikkat edilirse

şekil değiştirmenin ölçülmesinin bağıl direnç değişimi ölçülmesine dönüştürülmüş olduğu görülür.

Bir metalik telin elektriksel direnci; ρ telin öz direnci, L telin boyu ve A telin kesit alanı olmak üzere,

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (5)$$

şeklinde tanımlanır.



Şekil 3. Metalik Strain Gauge

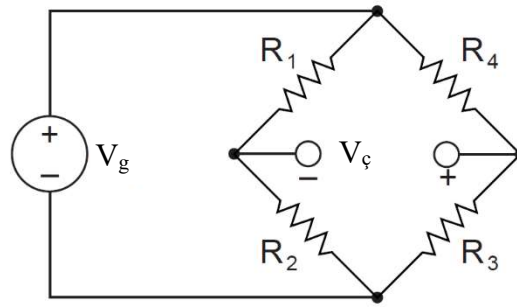
5. Wheatstone Köprü Devresi

Malzemenin gerilme etkisi altında şekil değiştirmesi nedeniyle, elektriksel dirençlerde meydana gelen değişimin gerinim değerine dönüştürülebilmesi için kullanılan devreye “Wheatstone Köprü Devresi” denir. Bu devre güç kaynağı, galvanometre ve dört adet dirençten meydana gelmektedir. Wheatstone köprü devresinde bulunan dirençler strain-gauge’ leri ifade etmektedir. Devrede dirençlerin birbirlerini elektriksel yönden tamamlaması gerekir. Bu durumda, köprünün seri halde bulunan iki tane direncinin eşdeğer direnci, köprünün diğer kısmında bulunan birbirlerine seri bağlı olan dirençlerin eşdeğer direncine eşit olması gerekir.

Strain-gauge ile gerilme, eşdeğer dirençler arasında meydana gelen elektriksel direnç farkının galvanometre ile ölçümü ile tayin edilir. Cisim üzerinde meydana gelen gerilmenin tipine bağlı olarak farklı sayıda strain-gauge kullanımı gerekir. Kullanılan strain-gauge sayısına bağlı olarak Wheatstone köprü devresinde dirençler aktif ya da pasif olarak nitelendirilir. Eğer köprü devresindeki direnç yapı elemanın deformasyonunun etkisine maruz kalıyorsa “Aktif Strain gauge” direnç yapı elemanın deformasyonunun etkisine maruz kalmıyorsa “Pasif Strain gauge” olarak adlandırılırlar. Wheatstone köprüsünde aktif strain gauge dışındakiler sadece köprünün elektriksel dengesi için bulunurlar. Köprü devresinde bulunan dirençlerin dört tanesi de deformasyona maruz kalması durumu *Tam köprü*, devrede bulunan dirençlerden sadece iki tanesinin deformasyona maruz kalması durumu *Yarım köprü* ve devrede bulunan dirençlerden sadece bir tanesinin deformasyona maruz kalması durumu *Çeyrek köprü* olarak isimlendirilir. Çeşitli yaygın konfigürasyonlar ve bunlar arasındaki ilişki Tablo 1 de belirtilmiştir.

Tablo 1: Wheatstone Köprü Devresi Çeşitleri

Köprü Tipi	Aktif Rezistans Elemanları	Hassasiyet Sabitleme Rezistansları	Genel Uygulamalar
Çeyrek Köprü (Quarter Bridge)	R1	R2, R3, R4	Kullanımı daha kolaydır. Malzeme karşılaştırması gerektirir.
Yarım Köprü (Half Bridge)	R1, R3	R2, R4	İstenmeyen ısı etkilerin veya eğilme etkilerinin iptal edileceği durumlar
Tam Köprü (Full Bridge)	R1, R2, R3, R4	-	Arttırılmış hassasiyet



Şekil 4. Wheatstone Köprü Devresi

Wheatstone köprüsünde oluşan çıkış voltajını veren bağıntı:

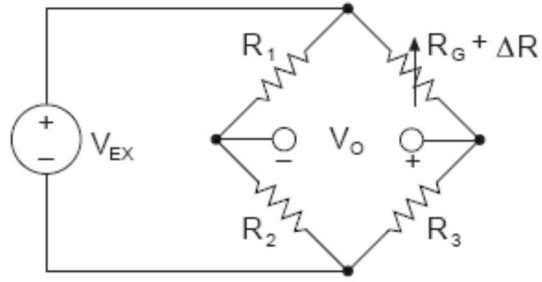
$$V_{\varphi} = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \cdot V_g \quad (6)$$

Bu denkleme göre $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$ olduğu zaman, çıkış voltajı sıfır değerini alır ve “köprü dengededir” denir. Söz konusu elektriksel dirençlerden birinde herhangi bir değişim olduğunda, çıkış voltajı sıfırdan farklı bir değer verecektir.

Eğer köprüye R_4 ün yerine bir strain gauge yerleştirirsek, strain gauge’in elektriksel direncindeki herhangi bir değişim köprünün dengesini bozacak ve V_{φ} ’nin sıfırdan farklı bir değer almasına neden olacaktır. R_G strain gauge’in elektriksel direncini göstermek üzere, direncin değişimi ΔR , gauge faktörü bağıntısı kullanılarak $\Delta R = R_G \cdot k \cdot \varepsilon$ ile ifade edilebilir.

Ayrıca köprüyü oluşturan dirençler $R_1 = R_2$ ve $R_3 = R_G$ şeklinde seçilirse, (6) nolu denklemden, çeyrek köprü devresi için çıkış voltajının giriş voltajına oranı gerinmenin(ε) bir fonksiyonu olarak elde edilir.

$$\frac{V_{\varphi}}{V_g} = -\frac{k \cdot \varepsilon}{4} \left[\frac{1}{1 + k \cdot \frac{\varepsilon}{2}} \right] \quad (7)$$



Şekil 5. Wheatstone Çeyrek Köprü Devresi

6. Kafes Sistemleri

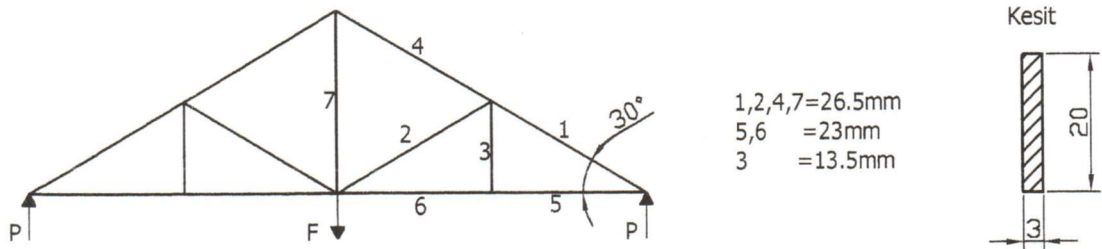
Bir kafes sistem düğüm noktalarında birleşen doğru eksenli çubuklardan ibarettir. Kafes sistemin çubukları yalnız uç noktalarında birbirine bağlanmıştır. Dolayısıyla çubuklardan hiçbiri düğüm noktalarından ileri geçmez.

Kafeslerin kuvvet analizinde aşağıdaki bazı ön kabuller yapılır;

- 1) Çubuk ağırlığı tesir eden yüklere nazaran çok küçük olduğu için ihmal edilir. Eğer ihmal edilmemesi gerekiyorsa; her çubuk ağırlığının yarısı çubuğun birleştirdiği iki düğüm noktasına gelecek şekilde, düğüm noktalarına uyguladığı kabul edilmiştir.
- 2) Tüm dış kuvvetlerin doğrudan çubuklara değil, düğüm noktalarına (pimlere) tesir ettiği kabul edilir.
- 3) Çubuklar gerçekte kaynaklı ya da perçinli birleşimlerle birleştirilmişlerse de, çubukların mafsallı olarak birleştğini kabul etmek adet olmuştur.

Bu ön kabuller kafes çubuklarını iki-kuvvet elemanı haline getirir. Yani bir çubuğa sadece iki ucundaki pimlerden kuvvet etkir. Çubuğun her iki ucuna etkiyen bu kuvvetler bir tek eksenel kuvvet olur ve moment meydana getirmez.

Kafes çubuklarına yalnızca çubuk eksenli doğrultusunda tek eksenel kuvvet geldiğinden; rozet şeklindeki strain-gage'ler yerine, tek bir strain-gage'in kullanılması çubuklardaki uzamayı belirlemek için yeterli olacaktır. Çünkü kafes çubuklarında tek eksenli gerilme durumu vardır. Rozet şeklindeki strain-gage'ler düzlem gerilme durumunda $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$ kullanılır. Aşağıda, kullanılan deney düzeneğinin şekli görülmektedir.



(a) Dügüm Noktası Metodu

Bu metot ile çalışırken her düğüm noktasının serbest cisim diyagramı çizilir ve düğüm noktasında ikiden fazla bilinmeyen çubuk kuvveti olmamalıdır. Bu görüş mühimdir, çünkü kuvvet düğüm noktasında kesiştiğinden çözüm için ancak iki tane denklem vardır. Bu sıra içinde bir düğüm noktasından diğerine geçilerek bütün çubuklar belirlenir.

$$\Sigma F_x = 0 \quad ; \quad \Sigma F_y = 0 \quad (8)$$

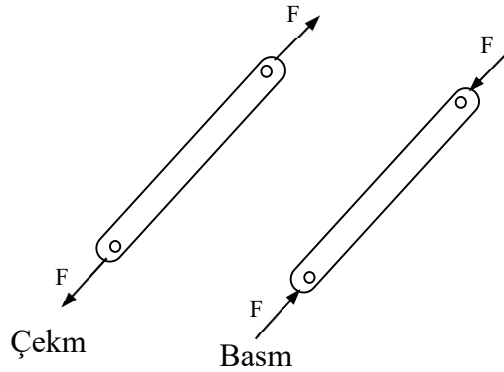
(b) Kesim Metodu

Kafesin kesilen çubukları serbest cisim diyagramı gibi düşünülür. Kesilen kafesin bir tarafını düşünmek kaydı ile bilinmeyen çubuk kuvvetleri bulunabilir. Kafesin ayrılan parçasını dengede tutan, çubuk doğrultusundaki kuvvetler çubuğun iç kuvvetleridir. Sistemde kesişmeyen ve paralel olmayan kuvvetler olduğu için üç denge denklemi geçerlidir. Bundan dolayı her kesitte üç çubuktan fazla bilinmeyen olmamalıdır.

$$\Sigma F_x = 0 \quad ; \quad \Sigma F_y = 0 \quad ; \quad \Sigma M_z = 0 \quad (9)$$

7. Eksenel Yüklü Çubuk

Eksenel yönde bir F kuvvetine maruz kalmış dikdörtgen kesitli bir çubuk göz önüne alınırsa;



Şekil 4. Eksenel yönde çekme ve basma kuvvetlerine maruz kalan çubuklar

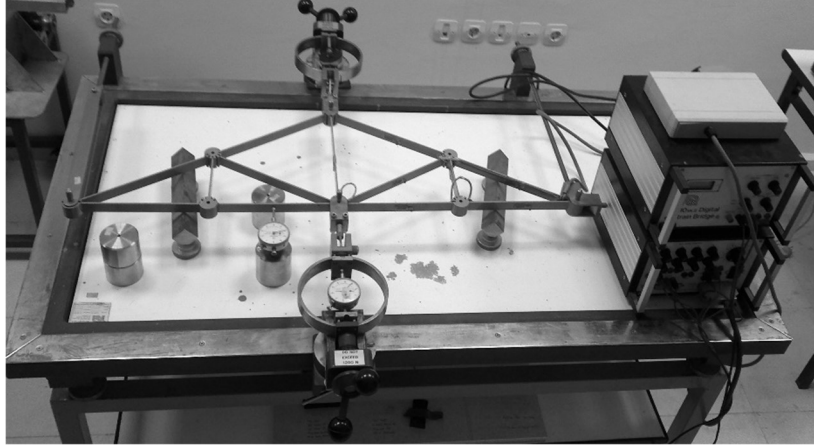
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \left(\frac{N}{m^2} \right) \quad (10)$$

F kuvveti altında l boyundaki çubuğun boyu Δl kadar değişerek l_0 'dan l_1 'e ulaşır.

$$l_1 = l_0 + \Delta l \quad (11)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (12)$$

8. Deneysel Yöntem



Şekil 5. Deney Düzenekinin Görünüşü

Strain-gage'ler birim uzamaları ölçmek suretiyle, gerilmelerin tespit edilmesinde kullanılır. Bu ölçmeleri yapmak için strain-gage, ölçmesi yapılacak cismin üzerine cisim yüksüz iken yapıştırılır. Strain-gage'in uçları dijital strain köprüsüne bağlanır ve gösterge sıfırlanır. Sıfırlama her çubuk için ayrı ayrı yapılır. Yükleme yapıldığı zaman uzama veya kısalma durumu için telin çapındaki artma veya azalmadan dolayı direnç değişecektir. Bu değişimlerden dolayı göstergede sapma meydana gelir. Bu sapmadan birim uzama miktarları ölçülür ve buradan da gerekli gerilme değerleri Hooke bağıntılarıyla elde edilir. Tek eksenli gerilme halinde, yapılan ölçüm esnasında birim uzama (ϵ) dijital strain köprüsünden okunarak, kafes sistemin malzemesi belli olduğundan, diğer bir deyişle elastisite modülü ($E=200$ GPa) tanımlanmış olduğundan, birim uzamaya karşı gelen gerilme değeri aşağıdaki bağıntıyla bulunur:

$$\sigma = \epsilon.E \quad (13)$$

Tablo 1. Ölçülen ϵ değerleri

	YÜK				
	100 N	300 N	600 N	900 N	1200 N
1 nolu çubuk için ϵ	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$
2 nolu çubuk için ϵ	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$
3 nolu çubuk için ϵ	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$
4 nolu çubuk için ϵ	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$
5 nolu çubuk için ϵ	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$
6 nolu çubuk için ϵ	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$
7 nolu çubuk için ϵ	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$	$.10^{-6}$

9. İstenenler

Deneyde verilen kafes sistem için, 1. çubuktan, 7. çubuğa kadar her çubukta oluşan çekme veya basma kuvvetlerini hesaplayınız. Buna göre her bir yüke karşılık her bir çubuğun birim uzama miktarlarını (ϵ) hesaplayıp, ölçülen (ϵ) değerleri ile karşılaştırınız. Eğer fark varsa bu farkın neden meydana geldiğini açıklayınız.

2.4. ÇENTİK DARBE DENEYİ

1. DENEYİN AMACI

Darbe deneyleri malzemelerin çarpma dayanımlarını veya kırılma enerjilerini ölçmek amacı ile yapılır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar çentik tokluğunun bir ölçüsü olup, metallerin kırılma davranışının tespit edilerek karşılaştırılmasında kullanılırlar. Yani bu deneyden elde edilen sonuçlar tasarıma yönelik mühendislik hesaplarında doğrudan kullanılmazlar. Çünkü hem deney numunesinin absorbe edeceği enerji numunelerin boyutlarına, konstrüksiyonlardaki gerilme durumuna, yüklemenin seyrine bağlı olup, boyutlar ve çentik geometrisi çok farklıdır.

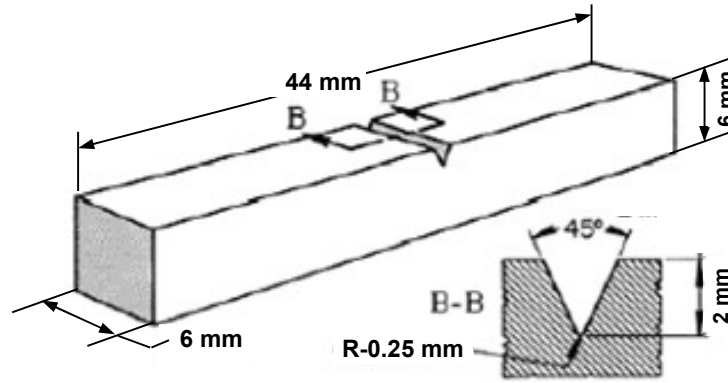
2. GİRİŞ

Bazı makine parçaları veya yapı elemanları darbeli yüklere maruz kalırlar. Bu elemanların çarpma dayanımları yavaş yükleme durumundaki statik mukavemet değerlerinden çok daha düşüktür. Darbe deneyinde, standart çentikli bir numunenin darbe etkisi ile kırılması için gereken enerji ölçülür. Genelde “Joule” cinsinden ölçülen bu enerji değeri malzemelerin darbe direnci ya da darbe dayanımı olarak tanımlanır. Darbe dayanımı toklukla ilişkilidir. Tokluk, bir malzemeyi kırmak için, malzemenin birim hacmine uygulanması gereken enerji miktarı olarak tanımlanır ve çekme deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramının altındaki alanla ölçülür. Bu nedenle mukavemeti ve sünekliği yüksek malzemelerin, tokluğu da yüksektir. Aynı malzeme değişik işlemlerden geçirildiğinde, mekanik özellikleri önemli ölçüde değişebilir. Örneğin haddelenmiş pirincin mukavemeti, yumuşatma tavlmasına tabi tutulmuş pirinçten daha yüksektir. Buna karşılık haddelenmiş pirincin sünekliği, tavllanmış pirinçle kıyaslanamayacak kadar azdır. Sonuçta tavllanmış pirinç, haddelenmiş pirinçten daha toktur (mukavemeti düşük olmasına rağmen). Bu durum tüm malzemeler için aynıdır. Ayrıca malzemelere katılan alaşım elementleri yine mukavemeti arttırmalarına rağmen sünekliği azaltırlar. Sonuçta alaşım maddesinin tokluğa etkisi, mukavemetteki artışla süneklikteki azalış arasındaki dengeye bağlıdır. Örneğin çeliğin içerisindeki karbon oranı arttıkça mukavemet artar, süneklik azalır. Aynı şekilde çeliğin içine üçüncü bir alaşım elementi katıldığında yine aynı etki görülür.

Uygulamada yaygın olan iki çeşit darbe deneyi vardır. Bunlardan biri Charpy, diğeri de Izod darbe deneyidir. Charpy deneyinde, iki mesnede yatay olarak yaslanan basit bir giriş durumundaki numunenin çentik tabanına bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılıp, çentik

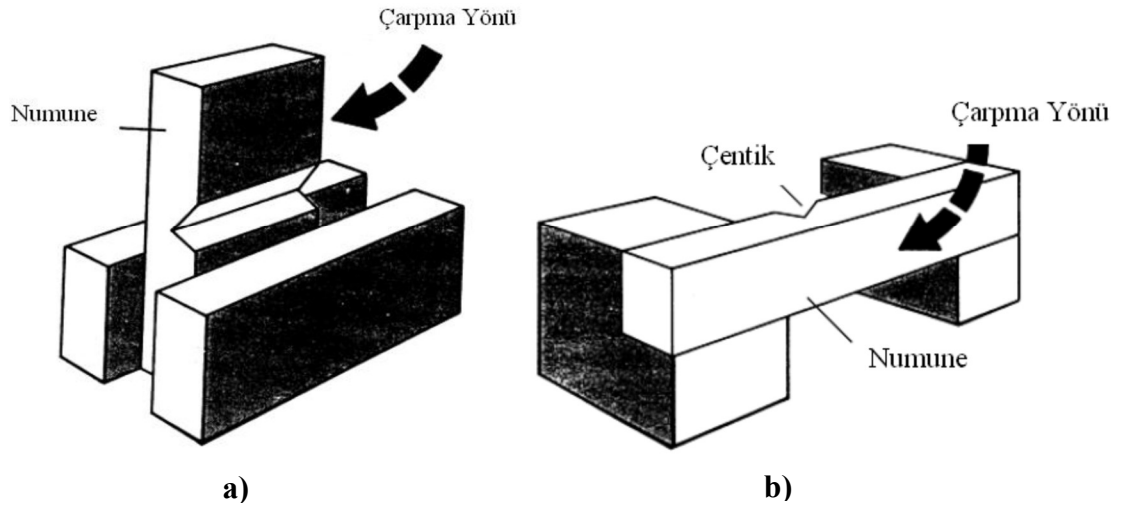
tabanında meydana gelen çok eksenli gerilmenin etkisi ile söz konusu numunenin kırılması için harcanan enerji ölçülür. Izod darbe deneyinde ise, numune kavrama çenesine dikey olarak yerleştirilerek yüzeyine, kavrama çenesinden belirli yükseklikte bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe uygulanır. Çekiçle darbe yapılması sonucu çentik tabanında oluşan çok eksenli gerilmeler etkisiyle numune kırılır.

Darbe deneylerinde kullanılan numunelere genellikle çentik açılmaktadır. Buradaki amaç, malzemede oluşacak gerilme konsantrasyonunu (gerilme yığılmalarını) çentik tabanında oluşturarak, malzemenin dinamik zorlamalara karşı göstereceği direnci tespit etmektir. Gri dökme demir numunelerinde, malzeme içerisindeki lamel grafitler çentik etkisi yaratacağından ayrıca çentik açmaya gerek yoktur. Charpy deneyinde kullanılan standart numunenin şematik resmi Şekil 1’de görülmektedir.



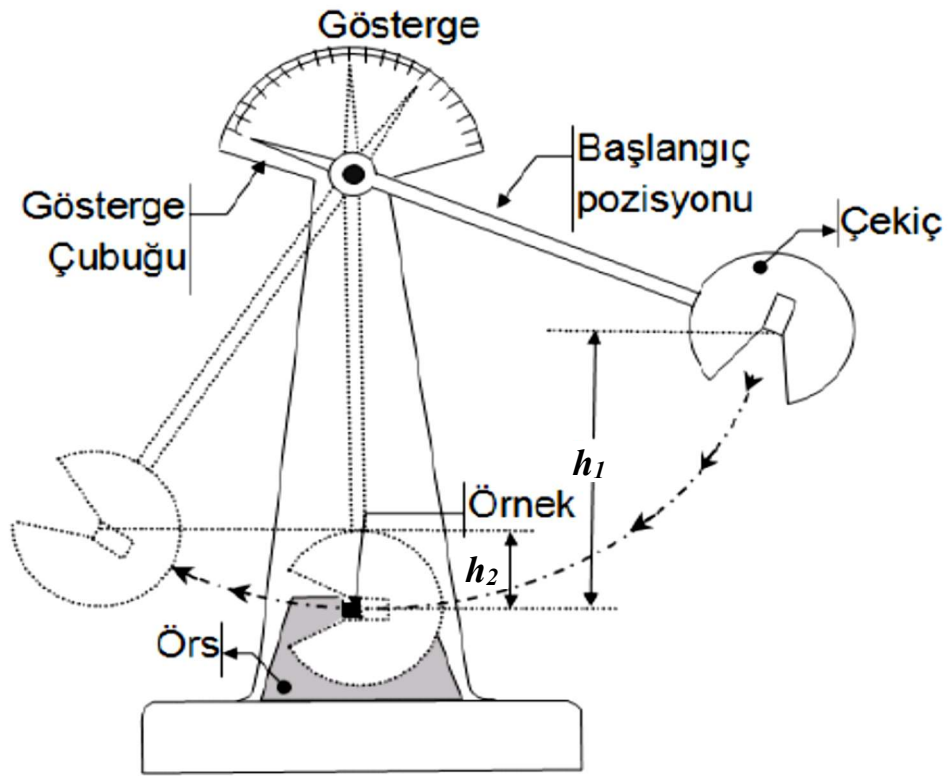
Şekil 1. Deneyde kullanılan Charpy deney numunesinin boyutları

Numunelerin cihaza yerleştirilme şekilleri Şekil 2’de görülmektedir. Darbe deneylerinde yaygın olarak kullanılan sarkaçlı bir darbe makinesinin şematik resmi ise Şekil 3’te görülmektedir.



Şekil 2. Deney numunelerinin cihaza yerleştirilmesi

a) Charpy deney numunesi b) Izod-Darbe deney numunesi



Şekil 3. Sarkaçlı Charpy darbe makinesinin görünüşü

3. DENEYİN YAPILIŞI

Çalışma prensibi Şekil 4'te görülen Charpy deneyinde, ağırlığı G olan bir sarkaç h_1 yüksekliğine çıkarıldığında potansiyel enerjisi $G \times h_1$ olur. Sarkacın salınım düzlemi ile numunedeki çentik merkezi çakışacak şekilde ayarlanır. Enerjiyi okumak için kullanılan ibre, başlangıç noktasına getirilir ve sarkaç serbest bırakılır. Sarkaç bu yükseklikten serbest bırakıldığında düşey bir düzlem içerisinde numuneye çarparak onu kırar ve diğer yönde h_2 yüksekliğine kadar çıkar. Numunenin kırılmasından sonra sarkacın sahip olduğu potansiyel enerji farkı cihazın kadranı üzerinden okunur.

Sürtünme kayıpları ihmal edilerek kırılma enerjisi aşağıdaki formülle belirlenir:

Kırılma Enerjisi = Sarkacın ilk enerjisi – Sarkacın son enerjisi

$$K.E. = G \times h_1 - G \times h_2 = G.l.(\cos \beta - \cos \alpha)$$

h_1 = düşme yüksekliği

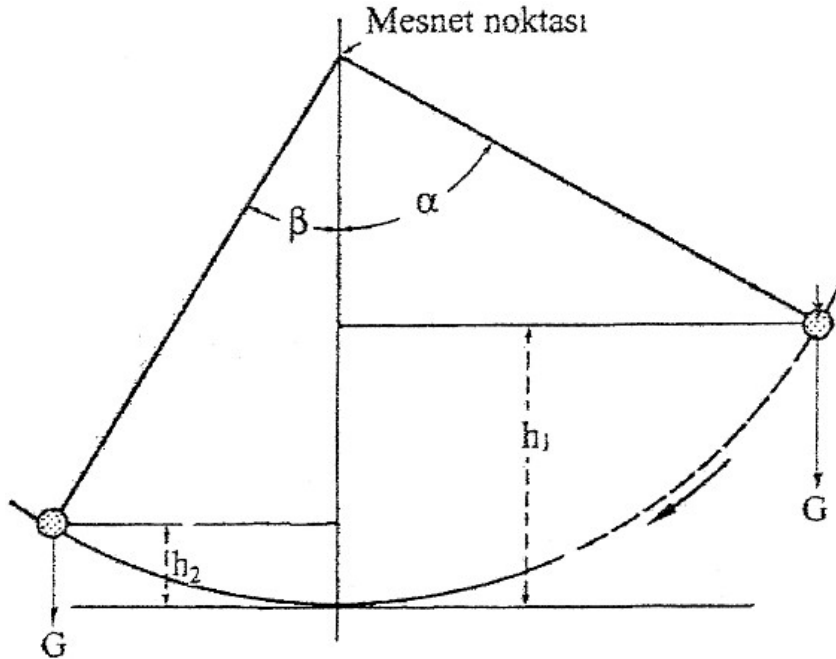
h_2 = çıkma yüksekliği

l = sarkaç boyu

α = düşme açısı

β = yükselme açısı

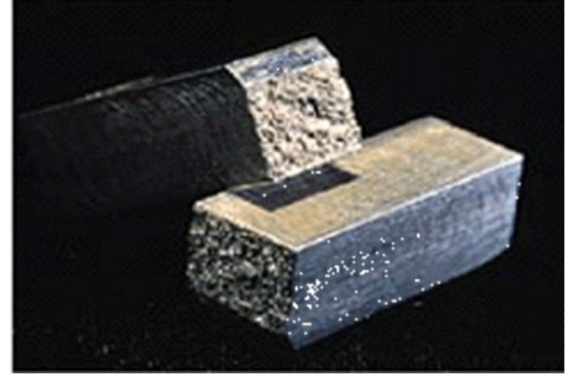
Darbe direncinin birimi genelde Joule (J) olarak alınır, ancak bazı durumlarda J/m^2kgm veya kgm/cm^2 cinsinden de ifade edilebilir. Kırılma enerjisi yüksek olan malzemelerin çentik tokluğu da yüksek olur.



Şekil 4. Charpy deney tesisi çalışma prensibi



a) Sünnek kırılma



b) Gevrek kırılma

Resim 1: Numunelerin deney sonucu sünnek ve gevrek kırılma resimleri

Deney Öncesi Veriler

Çekiç Kütlesi; $m = 10$ kg (Çekiç ağırlığı için $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ alınız.)

Düşme Açısı; $\alpha = 160^\circ$

Sarkaç Uzunluğu; $R = 0.4$ m

4. RAPORDA İSTENENLER

1. Gerilme-Şekil değiştirme eğrisi altındaki alan neden tokluğun ölçüsüdür?
2. Darbe direncini etkileyen faktörleri açıklayınız.
3. Deney sırasında okunan *Kırılma Enerjisi* ile yukarıdaki bağıntıdan elde edilen *Kırılma Enerjisi* değerini karşılaştırınız.
4. Düşük karbonlu çeliğin ve tavlanmış pirincin özellikleri aşağıda tabloda verilmiştir.

MALZEME	σ_A (MPa)	σ_M (MPa)	SÜNEKLİK (%)	E (GPa)	σ_K (MPa)
Düşük karbonlu çelik	330	450	36	200	360
Pirinç	70	270	65	120	190

σ_A = Akma mukavemeti

σ_M = Maksimum çekme mukavemeti

σ_K = Kopma mukavemeti

E = Elastisite modülü

Süneklik: Malzemenin koptuktan sonraki boyu ile orijinal boyu arasındaki farkın, orijinal boyu oranının yüzdesidir.

$$\varepsilon_l = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \quad (l_f = \text{koptuktan sonraki boy, } l_0 = \text{orijinal boy})$$

Bu verilerle her iki malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramlarını kabataslak çiziniz. Bu diyagramlara bakarak hangi malzemenin darbe dayanımının daha iyi olacağını söyleyiniz.

5. Deney sonucu tahmin ettiğiniz gibi mi çıktı? Çıkmadıysa bunun sebepleri ne olabilir?

NOT: Elimizdeki malzemelerin tam özellikleri bilinmemektedir, alaşım maddesi içerip içermedikleri, üretim aşamasında hangi işlemlerden geçtikleri ve ısıtıl işlem yapıp yapılmadığı konusunda elimizde bir bilgi yoktur. Yukarıdaki tabloda verilen değerler elimizdeki malzemeler için geçerli olmayabilir. 5. soruyu buna göre yanıtlayınız.

5. KAYNAKLAR

- 1) Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN, “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, Derya Kitabevi, Trabzon, 1999.
- 2) Erdoğan KAYIRAN, “Malzeme: Teori ve Pratik”, İskenderun, 1999.
- 3) E. S. KAYALI, C. ENSARİ, F. DİKEÇ Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İTÜ, 1996.
- 4) Metals Handbook, “Mechanical Testing”, 9th Edition, Vol.8, ASM International, 1985.

2.5 TAŞINIMLA ISI GEÇİŞİ DENEYİ

1. Deneyin Adı

Zorlanmış taşınım ile ısı geçişi.

2. Deneyin Amacı

Değişken hava hızlarında silindirik yüzeyinden transfer edilen ısı miktarına zorlanmış taşınımın etkisinin incelenmesi.

3. Deneyle İlgili Genel Bilgiler

İki sistem arasında veya sistemle çevresi arasında bir sıcaklık farkı olduğu zaman enerji transfer edilmektedir. Yalnız sıcaklık farkından dolayı bir sisteme transfer edilen bu enerjiye, termodinamikte ısı enerjisi denilmektedir. Diğer taraftan termodinamiğin ikinci kanununa göre ısı, sıcak bir sistemden daha soğuk bir sisteme doğru akmaktadır. Isı doğrudan doğruya ölçülemez ve gözlenemez, ancak doğrudan tesirler gözlenebilir ve ölçülebilir. Belirli bir sıcaklık farkından dolayı birim zamanda transfer edilen ısı miktarının hesabı, mühendislik açısından çoğu zaman önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Isı bir sistem ile sistemin çevresi arasında yalnız sıcaklık farkından dolayı akan bir enerji şeklindedir. Bu enerji miktarını aşağıdaki ısı transfer şekillerinin birisi, ikisi veya üçü birden kullanılarak belirlenebilir.

a) Isı İletimi (Kondüksiyon)

Isı iletimi aynı katı, sıvı veya gaz ortamındaki farklı bölgeler arasında, veya doğrudan fiziki temas durumunda bulunan farklı ortamlar arasında, moleküllerin fark edilir bir yer değiştirmesi olmaksızın, moleküllerin doğrudan teması sonucunda oluşan ısı yayılımı işlemidir. Isı iletiminin genel denklemi Fourier tarafından aşağıdaki formülle verilmiştir:

$$Q = -k A \frac{dT}{dn} \quad (1)$$

Burada iletimin tek boyutlu olduğu düşünülerek (1) eşitliği aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

$$Q = k A \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad (2)$$

Burada;

Q	: İletimle geçen ısı miktarı,	[W]
A	: Isı iletiminin gerçekleştiği alan,	[m ²]
L	: Isı iletiminin gerçekleştiği malzemenin kalınlığı,	[m]
T ₁ , T ₂	: Isı iletiminin gerçekleştiği malzemenin yüzey sıcaklıkları,	[K]
k	: Malzemenin ısı iletim katsayısı,	[W/(m·K)]

b) Isı Taşınımı (Konveksiyon)

Bir yüzey üzerinden veya bir boru içerisinden akan akışkanın sıcaklığı yüzey sıcaklığından farklı ise, akışkan hareketi sonucu akışkan ile yüzey arasındaki ısı transferi olayı taşınım olarak adlandırılır. Newton'un Soğuma Kanunu olarak adlandırılan aşağıdaki denklem ısı taşınımının özel kanunudur:

$$Q = hA(T_s - T_a) \quad (3)$$

Burada;

h	: Isı taşınım katsayısı,	[W/(m ² ·K)]
T _s	: Yüzey sıcaklığı,	[K]
T _a	: Akışkan sıcaklığı,	[K]

Isı taşınımı akışın yapısına göre sınıflandırılır. Eğer akışkan herhangi bir pompa, vantilatör gibi benzeri cihazlar ile ya da rüzgar tarafından etkilenmiyorsa bu akışkandaki ısı taşınımına doğal ısı taşınımı denir. Eğer akışkan herhangi bir pompa, vantilatör gibi benzeri cihazlar ile ya da rüzgâr tarafından zorlanmış harekete maruz kalıyor ise bu akışkandaki ısı taşınımına zorlanmış ısı taşınımı denir.

c) Isı Işınımı (Radyasyon)

Herhangi bir temas ve akışkan hareketi olmaksızın elektro manyetik dalgalar vasıtası ile olan ısı geçişi olayına radyasyon denir. Işınım yoluyla gerçekleşen ısı geçişi Stefan-Boltzman eşitliği olarak aşağıdaki şekilde tarif edilmektedir.

$$Q = \varepsilon F \sigma A T^4 \quad (4)$$

Burada;

σ	: Stefan-Boltzman sabiti, (σ=5.67·10 ⁻⁸ [W/(m ² ·K ⁴)])
ε	: Işınım yayma katsayısı (neşretme oranı),
F	: Şekil faktörü,

4. Kullanılan Cihazlar

Isı transferi servis birimi (HT 10 X),
Bileşik taşınım ve ısınım deney düzeneği (HT 14).

5. Deneyin Yapılışı

Şekil 1 de gösterilen deney düzeneğinin (HT 14) önden görünüşünde görülen 2 numaralı buton (I) konumuna, Şekil 2'de gösterilen servis biriminde (HT 10 X) A anahtarı (I) ve B anahtarı manuel konumuna getirilir. Ölçümleri yapmak için Şekil 2'de gösterilen düzenekte E düğmesi U_a'ya getirilerek hava akış hızı, V konumuna getirilerek sistemin voltaj değeri ve I konumuna getirilerek sistemin çektiği akım değeri D göstergesinden okunur. Eğer hava akış hızı değiştirilmek istenirse Şekil 1'deki 16 numaralı düğmeyi sola (artırmak için) veya sağa (azaltmak için) çevrilir. Voltaj değerini artırmak veya azaltmak için Şekil 2'deki C düğmesi istenilen değere ayarlanır. Sistem kararlı duruma gelinceye kadar (ilindir yüzey sıcaklığı sabit

oluncaya kadar) çalıştırılır. Kararlı duruma geldikten sonra; ölçümleri yapmak için Şekil 2’de (HT 10 X) gösterilen servis biriminde G anahtarı T9 konumuna getirilerek akışkan sıcaklığı ve T10 konumuna getirilerek yüzey sıcaklığı değeri J göstergesinden okunur. Okunan değerler ilgili formüllerde yerlerine konularak hesaplamalar yapılır.

Deneyde akışkan olarak hava kullanılmaktadır ve iletim ile olan ısı geçişi ihmal edilmektedir.

6. Verilen Sabitler

σ	: Stefan-Boltzman sabiti,	$(\sigma=5.67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)])$
ε	: Işınım yayma katsayısı,	$(\varepsilon=0.95)$
F	: Şekil faktörü,	$(F=1)$
D	: Silindir çapı,	$(D=0.1 \text{ [m]})$
L	: Silindir uzunluğu,	$(L=1.1 \text{ [m]})$

7. Okunan Değerler

I	: Akım,	[A] (Amper)
V	: Voltaj,	[V] (Volt)
U_a	: Hava akış hızı,	[m/s]
T9	: Akışkan sıcaklığı,	[°C]
T10	: Silindir yüzey sıcaklığı,	[°C]

8. Deney Sonucunda Hesaplanacak Değerler

Q_{in}	: Teorik olarak hesaplanan ısı miktarı,	[W]
Q_t	: Toplam ısı geçişi,	[W]
Q_c	: Taşınım ile geçen ısı miktarı,	[W]
Q_r	: Işınım ile geçen ısı miktarı,	[W]
h_c	: Isı taşınım katsayısı (zorlanmış),	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
h_r	: Işınım ile ısı geçiş katsayısı,	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
T_f	: Film sıcaklığı,	[K]
T_s	: Silindir yüzey sıcaklığı,	[K]
T_a	: Akışkan sıcaklığı,	[K]
U_c	: Düzeltilmiş hava hızı,	[m/s]
k	: Havanın ısı iletim katsayısı,	$[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$
Nu_m	: Ortalama Nusselt sayısı,	(Boyutsuz)
Re	: Reynolds sayısı,	(Boyutsuz)
Pr	: Prandtl sayısı,	(Boyutsuz)
ν	: Dinamik viskozite,	$[\text{m}^2/\text{s}]$

9. Kullanılacak Formüller

$$Q_{in} = V I \quad (5)$$

$$Q_t = Q_c + Q_r \quad (6)$$

$$Q_c = h_c A (T_s - T_a) \quad (7)$$

$$Q_r = h_r A (T_s - T_a) \quad (8)$$

$$h_r = \varepsilon F \sigma (T_s^4 - T_a^4) / (T_s - T_a) \quad (9)$$

$$Nu = 3,66 \quad \text{Laminer}$$

$$Nu_m = 0.3 + \frac{(0.62 Re^{0.5} Pr^{0.33})}{\left(1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{0.66}\right)^{0.25}} \left(1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{0.5}\right) \quad \text{Türbülanslı} \quad (10)$$

$$Re = \frac{U_c D}{\nu} \quad (11)$$

$$U_c = 1.22 U_a \quad (12)$$

$$A = \pi D L \quad (13)$$

$$T_f = \frac{T_s + T_a}{2} \quad (14)$$

$$T_s = T_{10} + 273.15 \quad (15)$$

$$T_a = T_9 + 273.15 \quad (16)$$

$$Nu_m = \frac{h_c D}{k} \Rightarrow h_c = \frac{Nu_m k}{D} \quad (17)$$

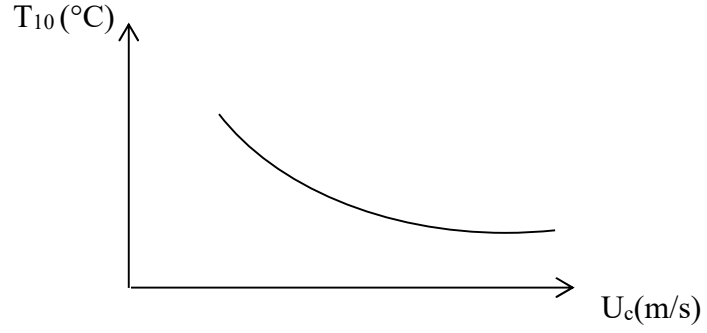
k, Pr, ν film sıcaklığında Tablo 1 kullanılarak bulunacak değerler.

Tablo 1 Havanın atmosfer basıncındaki fiziksel özellikleri

T _{film} [K]	ν [m ² /s]	k [W/(m·K)]	Pr [-]
300	$1.684 \cdot 10^{-5}$	0.02624	0.708
350	$2.076 \cdot 10^{-5}$	0.03003	0.697
400	$2.590 \cdot 10^{-5}$	0.03365	0.689
450	$3.171 \cdot 10^{-5}$	0.03707	0.683
500	$3.790 \cdot 10^{-5}$	0.04038	0.680
550	$4.434 \cdot 10^{-5}$	0.04360	0.680
600	$5.134 \cdot 10^{-5}$	0.04659	0.680

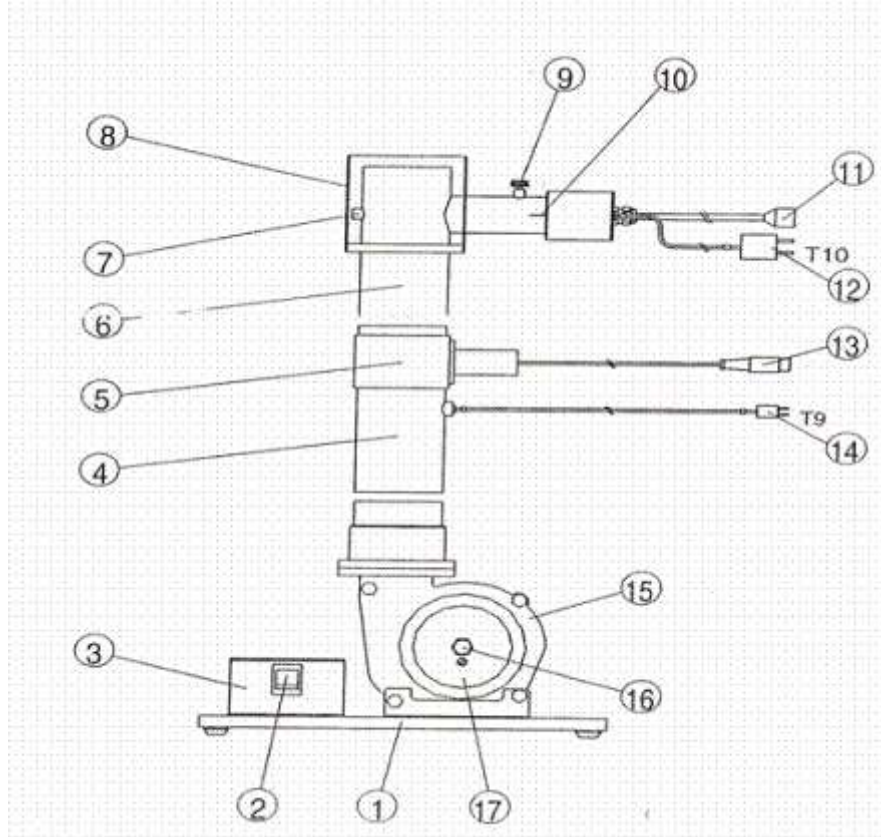
10. İstenilen Grafikler

Hava akış hızı U_c ile T_{10} sıcaklığı arasında grafiğin çizilmesi.

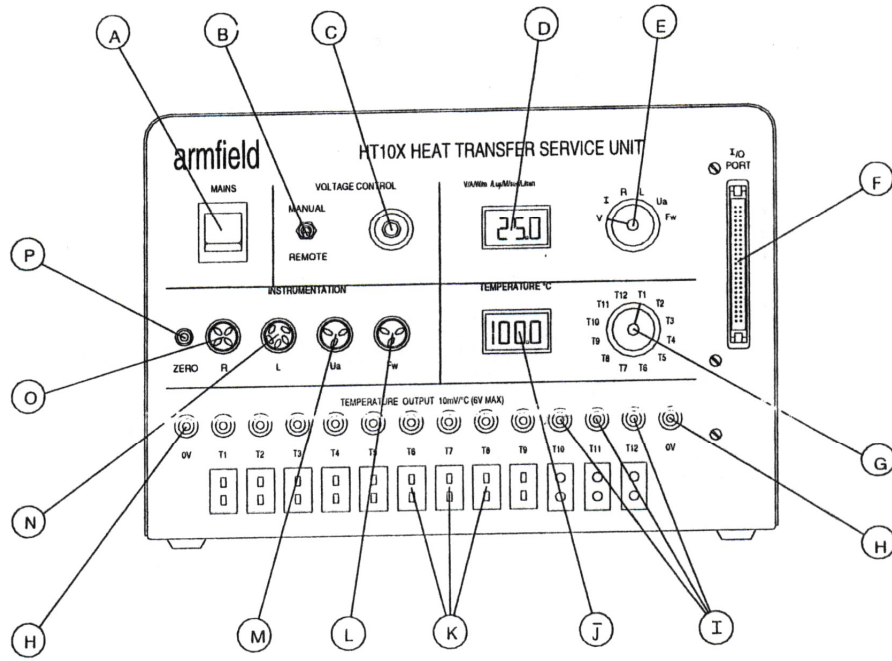


11. Sonuçlar ve Karşılaştırmalar

Sisteme giren ısı miktarı (Q_{in}) ile akışkana transfer edilen ısı miktarını (Q_t) karşılaştırınız.



Şekil 1. Deney düzeneğinin (HT 14) ön görünüşü



Şekil 2. Deney düzeneğinin ana ünitesi

2.6 TERMODİNAMİĞİN I. YASASI DENEYİ

Amaç: Termodinamiğin I. Kanununun, Açık Sistemler için Hava Kanalında İncelenmesi.

1. Teorik Bilgiler

Açık sistem analizinde problemlerin çözümü için iki eşitlik kullanılır. Bunlar kütle korunumunu ve enerjinin korunumunu belirleyen eşitliklerdir.

Kütle Korunumu

Kütle korunumu, belirli bir zaman aralığında, açık sisteme giren ve sistemden çıkan kütle miktarları arasındaki farkın, aynı zaman aralığında kontrol hacmindeki (KH'deki) kütle miktarı değişimine eşit olması ile ifade edilir.

$$\sum m_g - \sum m_\varphi = (m_2 - m_1)_{kh} = (\Delta m)_{kh} \quad (1)$$

Bu eşitlikteki kütle miktarları birim zaman için belirtilmek istendiğinde;

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_\varphi = \left(\frac{dm}{dt} \right)_{kh} \quad (2)$$

Kontrol hacimdeki toplam kütle;

$$m_{kh} = \int_{kh} \rho dV \quad (3)$$

Kontrol hacimdeki kütle değişiminin zamana oranı;

$$\frac{dm_{kh}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{kh} \rho dV \quad (4)$$

Kütle korunumunun genel ifadesi;

$$\frac{d}{dt} \int_{kh} \rho dV + \int_{ky} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (5)$$

Kararlı akış durumunda (2) numaralı eşitlik düzenlenirse

$$\Sigma \dot{m}_g = \Sigma \dot{m}_\varphi \quad (6)$$

Kütlesel debi;

$$\dot{m} = \rho AV = \frac{1}{v} AV \quad (7)$$

Bir boyutlu kararlı akış için, hızın kesit boyunca ortalama değerinde sabit kaldığı kabul edilerek, (5) numaralı eşitlik aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{m} = \rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \text{sabit} \quad (8)$$

Enerjinin Korunumu

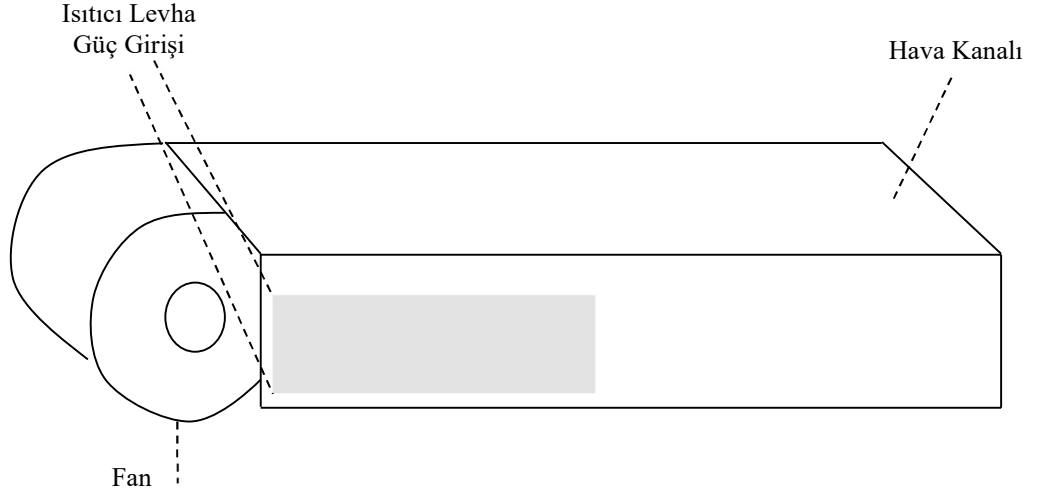
Enerjinin korunumu yasası; belirli bir zaman aralığında, açık sisteme iş, ısı veya kütle ile giren ve sistemden ısı, iş ve kütle ile çıkan enerji miktarları aynı zaman aralığında birbirine eşit olması açık sistemler için Termodinamiğin I. Kanunu olarak bilinir. Kararlı akış için, kontrol hacmindeki enerji değişim miktarı ortadan kalkar ve eşitlik birim zaman için yazıldığında;

$$\dot{E}_g = \dot{E}_\varphi \quad (9)$$

$$\dot{Q}_g + \dot{W}_g + \Sigma \dot{m}_g \theta_g = \dot{Q}_\varphi + \dot{W}_\varphi + \Sigma \dot{m}_\varphi \theta_\varphi \quad (10)$$

2. Deney Düzenegi ve Uygulanması

Deney düzeneginde, kendisine bir **fan** ile hava akışı temin edilen, çevresi ısı geçişine karşı yalıtılmış bir **hava kanalı**, kanal tabanına yarı uzunluğa kadar yerleştirilmiş **ısıtıcı**, iç ve dış ortam sıcaklıklarının okunduğu **dijital gösterge**, çıkıştan önceki son sıcaklık okuma noktasında basınç farkını ölçmek için kullanılan **fark basınç ölçer**, kanal çıkışında hava hızını ölçmek için kullanılan **hızölçer**, çevrenin termodinamik değerlerini ölçmede kullanılan **sıcaklık, basınç ve nem göstericisi**, ısıtıcı plakanın ve fanın çektiği elektrik gücünü bulmak için kullanılan **güç ölçer** ve fanın değişik devirlerde çalışmasını temin etmede kullanılan **varyaktan** oluşmaktadır.



Şekil 1. Deney tesisatının şematik gösterimi

3. Deneysel Ölçümler ve Hesaplamalar

Çizelge 1. Fan ve ısıtıcı aracılığıyla kontrol hacmine giren birim zamandaki enerji

Parametre	1. Deney	2. Deney
Isıttıcı ile giren güç [W]		
Fan ile giren güç [W]		
kh'ye giren toplam güç [W]		

Çizelge 2. Deneysel olarak elde edilen ölçüm sonuçları

Parametre		1. Deney		2. Deney	
Basınç	Giriş (barometre ile)	[mbar]	[kPa]	[mbar]	[kPa]
	Çıkış (Δh_{statik}) (su seviyesi farkı mmSS)	[mmSS]	[kPa]	[mmSS]	[kPa]
Hız (Giriş)	Hızölçer ile [m/s]				
Hız (Çıkış)	Hızölçer ile [m/s]				
	$\Delta h_{\text{dinamik}}$ (Pitot tüpü ile mmSS)				
Sıcaklık	Giriş	[°C]	[K]	[°C]	[K]
	Çıkış				

Çizelge 3. Deneysel hesaplamalardan elde edilen bulgular

Deney	Giriş entalpisi (kJ/kg)	Çıkış entalpisi (kJ/kg)	Kütleli debi (kg/s)	Hız(m/s)- Ölçüm Cihazı	Hız(m/s)- Bağıntılar	Giren güç (W)	Çıkan güç (W)
1.Deney							
2.Deney							

4. Rapor Yazım Formatı ve İstenen Bilgiler

Kapak: Bilgisayar ortamında hazırlanmış föyünüzde bulunan format ile aynı olmalıdır.

Amaç: Kendi yorumunuzla yazınız.

Teorik Bilgiler: Açık ve kapalı sistemlerin tanımlamaları, kararlı akış nedir tanımlanması, kanal içi akış için hız dağılımının gösterilmesi.

Deney Düzenegi ve Uygulanması: Deney düzeneginin şematik olarak çizimi, tüm elemanların tanıtılması ve deneyin uygulanmasının maddeler halinde yazılması.

Deneysel Ölçümler ve Hesaplamalar: Ölçümü yapılan tüm değerlerin föyünüzde yer alan tabloya düzenli bir şekilde işlenmesi, Ölçüm sonuçlarının kullanılarak hesaplanan değerlerin nasıl bulunduğu gösterilmesi, **hızın tespiti için ayrıca fark basınç ölçer kullanılarak bulunması, ilgili formülün çıkartılması**, ayrı ayrı iki deney içinde enerjinin korunum denkleminde yerine koyulması ile ilgili hesaplamalar. **(Hesaplamalar yapılırken birimleri dikkate alınız birimsiz olarak bir sonuç vermeyiniz.)**

Sonuç ve Tartışma: Öncelikli olarak deneye başlamadan önceki hedefinizi ortaya koyunuz.

Yapılan deney sonucunda elde edilen verilerin yorumlanması ve ilk başta belirlediğimiz hedeflere ulaşip ulaşılmadığı, neden bu hedeflere ulaşılmadığı, belirlenen hedeflere ulaşmak için deneyin nasıl yapılması gerektiği ile ilgili özgün yorumlarınızdan oluşmalıdır.

2.7 ISI DEĞİTİRİCİLERİ DENEYİ

Deney içeriđi:

Amaç

1. Genel bilgiler
Tanım ve ısı değıştiricilerin sınıflandırması
2. Isı değıştiricilerin ısıl analizi
3. Ortalama logaritmik sıcaklık farkı metodu
 - 3.1. Isı taşınım katsayılarının hesabı
 - 3.2. Boru içinden akışta ısı taşınım katsayısının hesabı
 - 3.3. Eş merkezli borular arasından akışta ısı taşınım katsayısının hesabı
4. Etkenlik(ϵ)–NTU metodu
5. Genel Değerlendirme ve Sonuç
6. Deneyin yapılışı
7. Deney raporunun hazırlanışı
8. Kaynaklar
9. Ekler
 - Ek 1. Tablo 2. Suyun özellikleri
 - Ek 2. Örnek hesaplama
 - Ek 3. Hesap Tablosu

Amaç:

- Isı değıştiricilerin genel tanıtımı.
- Tek geçişli, iç-içe borulu ısı değıştiricinin, paralel ve ters yönlü akış halinde analitik ve deneysel olarak incelenmesi, ısıl analizinin yapılması.

1. Genel bilgiler:

Değışik amaçlar için farklı sıcaklıklardaki akışkanlar arasındaki ısı geçişini sağlayan cihazlara ısı değıştirici veya ısı eşanjörü adı verilir. Akışkanlar katı bir cidar ile birbirinden ayrıldığı gibi akışkanların karıştığı karışımli ısı değıştiricileri de mevcuttur. Isı, sıcak akışkandan soğuk akışkana taşınım ve iletim ve iletim yoluyla transfer edilir. Bazı ısı değıştiricilerde, örneğin soğutma kulelerinde, soğuk akışkan sıcak akışkan ile temas halindedir ve bu durumda ısı, taşınım ve buharlaşma ile transfer edilir.

Isı değıştiricileri; her türlü ısıtma, soğutma ve iklimlendirme tesisleri, termik santraller, kimyasal işlemler, atık ısının geri kazanılması gibi birçok endüstri alanında kullanılmaktadır. Isı değıştiriciler kullandıkları yerlere göre değışik isimler alırlar. Örneğin termik santralde sıcak duman gazları ve alev radyasyonu ile buharın ısıtıldığı cihaza buhar kazanı adı verilir. Yine termik santralde türbinden çıkan buharı veya soğutma makinasında kompresörden çıkan kızgın buharı yoğunlaştırmak için kullanılan ısı değıştiriciye yoğunlaştırıcı veya kondenser denir. Soğuk hava depolarında ve pencere tipi klimalarda kullanılan soğutucu akışkanın buharlaşarak ısı aldığı ısı değıştiricilerine buharlaştırıcı veya evaporatör ismi verilir.

Yoğuşma ve buharlaşma gibi faz değişiminin gerçekleştiği ısı değiştiricilerde o akışkanın sıcaklığı faz değişimi esnasında sabit kalır. Taşıtlarda, motorda ısınan suyu hava ile soğutmak için kullanılan ısı değiştiriciye de radyatör denilmektedir.

Isı değiştiricide amaç sıcak ve soğuk akışkan arasında mümkün olan maksimum ısı transferinin gerçekleştirilmesidir. Bunun için termodinamik ve ısı transfer kanunları kullanılarak tasarım yapılır.

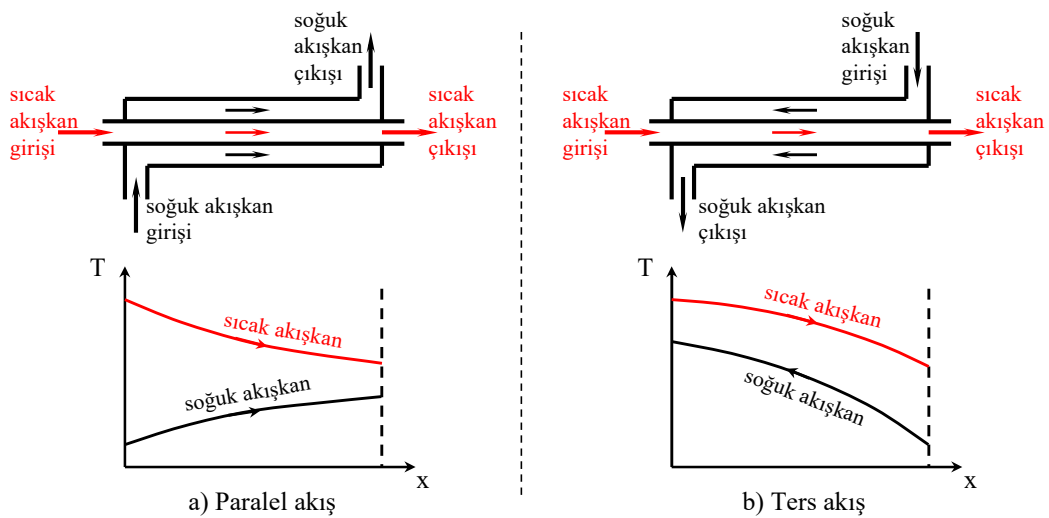
Isı değiştiricileri, çoğunlukla konstrüksiyon tiplerine ve akış düzenlemelerine göre sınıflandırılırlar [2]. Bu deneyde temel bir ısı değiştirici olan iç-içe eş eksenli borulu (veya çift borulu) ısı değiştirici incelenecektir (Şekil 1). Şekil 1a'daki paralel akışlı düzenlemede, sıcak ve soğuk akışkanlar ısı değiştiricinin aynı ucundan girerler, aynı doğrultuda akarlar ve diğer ucundan çıkarlar. Şekil 1b'deki ters akışlı düzenlemede ise sıcak ve soğuk akışkanlar ısı değiştiricinin ters uçlarından girerler, ters doğrultuda akarlar ve ters uçlardan çıkarlar.

Şekil 2'de gösterilen gövde-borulu ısı değiştiricide çok sayıda boru bir gövde içinden dolaştırılmaktadır. Endüstride çok yaygın olarak kullanılan bu tip ısı değiştiricide akışkanlardan biri borular içinden akarken diğeri de boruların dışından yani gövde içinde akar. Gövde tarafındaki akışkanda ısı taşınım katsayısını arttırmak için şaşırtma levhaları konarak çapraz akış ve türbülans oluşturulur. Gövde sayısı ve boru geçiş sayısına bağlı olarak bir gövde iki boru geçişli, iki gövde dört boru geçişli gibi konstrüksiyonları mevcuttur.

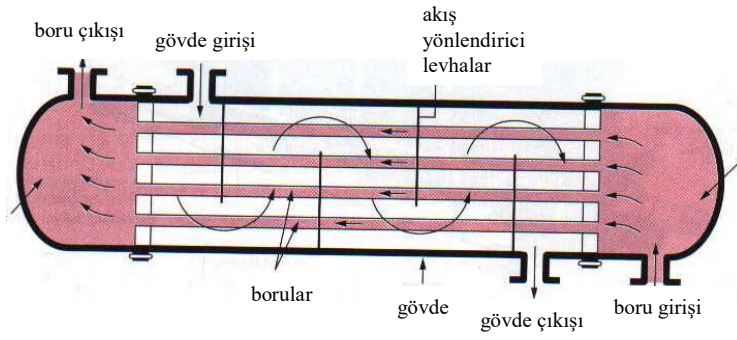
Şekil 3a'da kanatlı borulu ısı değiştirici görülmektedir. Kanatlar ısı geçişini arttırmak için kullanılırlar ve akışkanlardan birinin gaz olması durumunda özellikle gaz tarafına yerleştirilirler. Kanatlarla genişletilmiş yüzeylerin bulunduğu bu tip ısı değiştiricilerine genel olarak kompakt ısı değiştiricileri de denir. Burada amaç birim ısı değiştirici hacmi başına ısı geçiş yüzeyinin artırılmasıdır. Ayrıca akış düzenlemelerine bağlı olarak ta çapraz (dik), paralel ve ters akışlı olarak dizaynları vardır.

Şekil (3 b, c, d) de ise ısı değiştiricilerinin çeşitli uygulama örnekleri bulunmaktadır; sırasıyla araba radyatörü, panel radyatör ve plakalı ısı eşanjörleri.

Isı değiştiricilerin tasarımı, ısı ve ekonomik analizi, boyutlandırılması, kapasitenin belirlenmesi, basınç düşümünün hesaplanması; amaca uygun şekilde akışkanlar mekaniği, termodinamik ve ısı transferi kanunları kullanılarak yapılır. Detaylı bilgi birçok ısı transferi kitabında ve Kaynaklar bölümünde verilen kitaplarda mevcuttur.

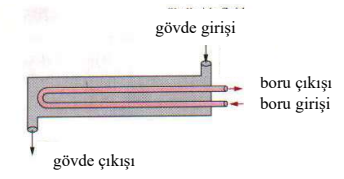


Şekil 1. İç-içe borulu ısı değiştirici

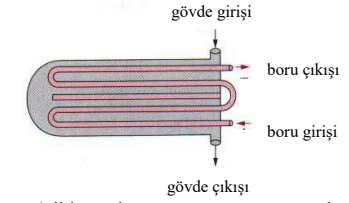


a) bir gövde geçiş ve bir boru geçişli, çapraz-ters akış çalışma düzenlemesi

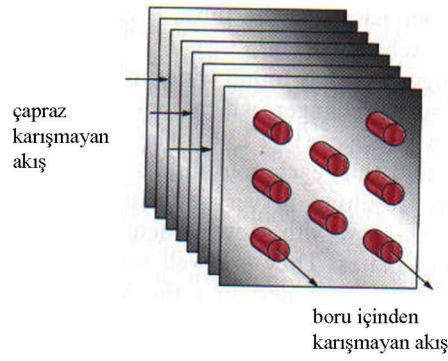
Şekil 2. Gövde- borulu ısı değiştiricisi



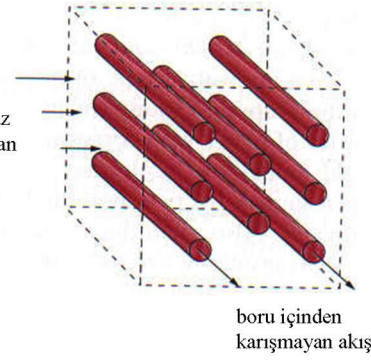
b) bir gövde geçiş ve bir boru geçiş



c) iki gövde geçiş ve dört boru geçiş



a) iki akışkanda karışmıyor



b) Akışkanlardan biri karışıyor diğeri karışmıyor

Şekil 3 a. Kanatlı-borulu ısı değiştirici



Şekil 3b. Araba radyatörü



Şekil 3c. Panel radyatör



Şekil 3d. Plakalı eşanjörler

2. Isı değıştiricilerin ısıl analizi:

Şekil 1 ve 4'te şeması gösterilen paralel akışlı iç-içe borulu ısı değıştiriciyi göz önüne alalım. Bu ısı değıştirici içe-içe eş eksenli olarak yerleştirilmiş iki borudan oluşur. Sıcak akışkan içteki borudan akmaktadır. Soğuk akışkan ise dış boru ile iç boru arasındaki eksenel boşluktan paralel olarak akmaktadır. Dıştaki borunun etrafı izole edilmiştir ve böylece çevreye ısı kaybı olmadığı kabul edilebilir. Akış boyunca sıcak akışkandan soğuk akışkana doğru bir ısı geçişi olacaktır. Sıcak akışkanın soğurken verdiği ısıyı, soğuk akışkan alacak ve ısıacaktır. Böylece akış boyunca, Şekil 4'de gösterildiği gibi sıcak akışkanın sıcaklığı düşerken, soğuk akışkanın sıcaklığı artacaktır. Akış boyunca akışkanların ortalama sıcaklıkları arasında sürekli olarak ΔT kadar bir fark olacaktır. Sıcak akışkanın verdiği ısıyı, Q , soğuk akışkan alacaktır. Buna göre termodinamiğin birinci kanunundan faydalanarak tüm ısı değıştirici için, çevreye ısı kaybı yoksa ve potansiyel ve kinetik enerjideki değışimler ihmal edilerek aşağıdaki toplam enerji dengesini yazabiliriz:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_1(h_{1g} - h_{1c}) \quad \text{sıcak akışkanın ısı kaybı} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_2(h_{2c} - h_{2g}) \quad \text{soğuk akışkanın ısı kazancı} \quad (2)$$

Burada "1" indisi içteki borudan akan sıcak akışkanı, "2" indisi dıştaki borudan akan soğuk akışkanı göstermektedir. Ayrıca "g" ve "ç" indisleri ise sırasıyla akışkanların ısı değıştiriciye

giriş ve çıkış noktalarını sembolize etmektedir. Q [W] toplam ısı geçişi, $\dot{m}_1$ ve $\dot{m}_2$ [kg/s] sıcak ve soğuk akışkanların kütleli debileridir. Ayrıca h_g ve $h_ç$ [J/kg] akışkanların giriş ve çıkıştaki entalpi değerlerini göstermektedir. Akışkanlarda bir faz değişimi yoksa ve özgül ısıyı sabit kabul ederek bu eşitlikleri aşağıdaki şekilde yazmak mümkündür:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_1 c_{p1} (T_{1g} - T_{1ç}) \quad \text{sıcak akışkanın ısı kaybı} \quad (3)$$

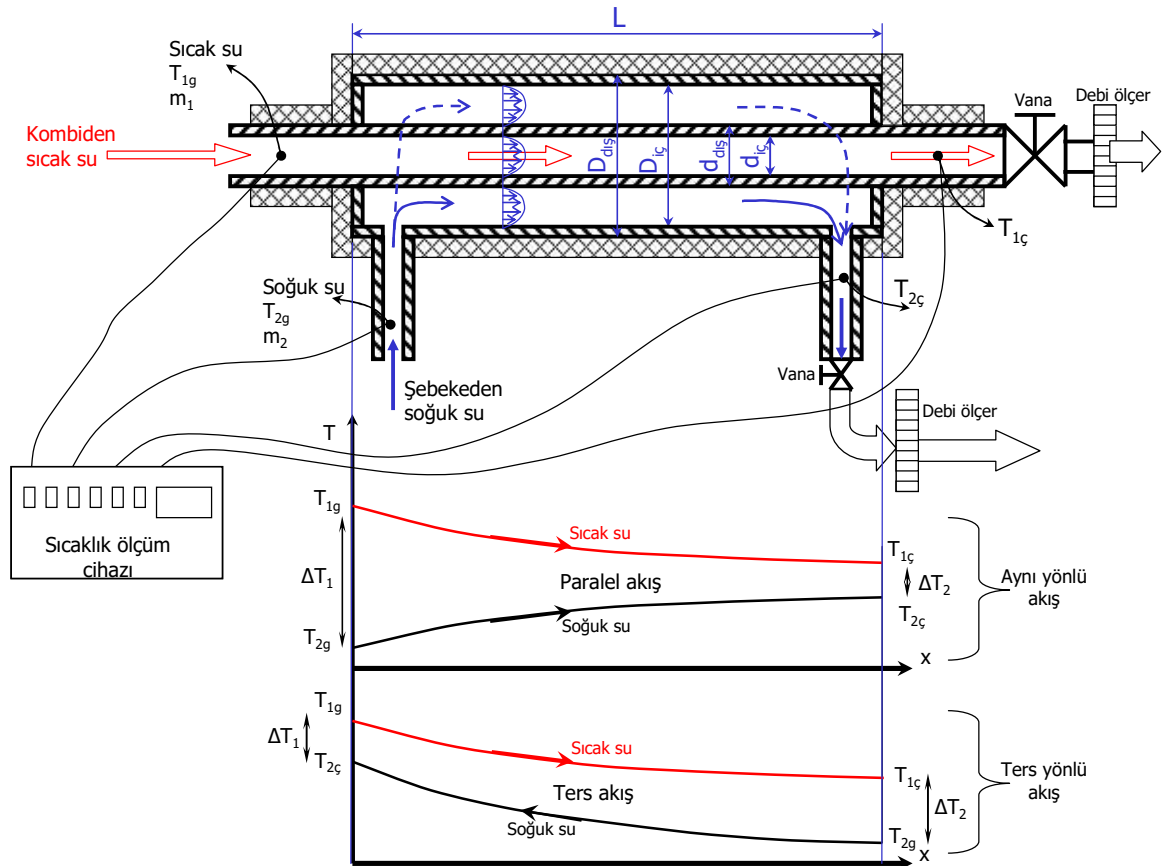
$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_2 c_{p2} (T_{2ç} - T_{2g}) \quad \text{soğuk akışkanın ısı kazancı} \quad (4)$$

Enerji korunumuna göre, bu ısı değerlerinin mükemmel yalıtılmış bir ısı değiştiricide birbirine eşit olması ($\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}$) gerekir. Burada, c_p [J/kg-°C] akışkanın özgül ısısını ve T_g ve $T_ç$ [°C] akışkanın ısı değiştiriciye giriş ve çıkış sıcaklıklarını göstermektedir. Burada özgül ısı sıcaklığın bir fonksiyonudur ve pratik hesaplamalarda o akışın giriş ve çıkış sıcaklıklarının aritmetik ortalamasında değerlendirilir. Özgül ısıнын sıcaklığa göre değişimi o akışkan için deneysel olarak hazırlanmış tablolardan alınır. Örnek olarak suyun özgül ısısının sıcaklıkla değişimi Ek 1’de verilmiştir.

Isı değiştiricilerinin ısı analizinde yaygın olarak kullanılan iki metot bulunmaktadır:

- ortalama logaritmik sıcaklık farkı metodu
- etkenlik-NTU metodu (ϵ - NTU metodu)

Bu metotlar aşağıda sırasıyla incelenmiştir.



Şekil 4. İç-içe borulu ısı değiştirici deneyi şeması ve paralel ve ters akışta akışkan sıcaklıklarının değişimi



Şekil 5. Isı değıştiricisi deney tesisatının görseli

Tablo1. Deney tesisatında kullanılan boru malzemelerinin özellikleri

Boyutlar	İç boru	Dış boru
	R 1/2" [DN 15]	R 1 1/2" [DN 40]
İç çap [m]	0.0168	0.0426
Dış çap [m]	0.0215	0.0484
Uzunluk [m]	1.2	1.2
Malzeme	Çelik (%0.5 C)	Çelik (%0.5 C)
k [W/m°C]	54	54

Tablo2. Örnek veri alma çizelgesi

	Ölçümler	Sıcak su			Soğuk su		
		T_{1g} [°C]	$T_{1ç}$ [°C]	Q_1 [W/h]	T_{2g} [°C]	$T_{2ç}$ [°C]	Q_2 [W/h]
paralel akış	1						
	2						
	3						
	4						
ters akış	5						
	6						
	7						
	8						

3. Ortalama logaritmik sıcaklık farkı metodu:

Sıcak akışkan ile soğuk akışkan arasındaki termodinamiksel olarak yukarıda hesaplanan bu ısı transferinin, Q , geometrik olarak belirlenen ölçüler içinde gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini ısı transferi kanunları belirler. Mevcut geometri için, sıcak ve soğuk akışkan arasındaki bu ısı geçişi Şekil 5’de gösterildiği gibi sırasıyla aşağıdaki üç mekanizmayla oluşur:

- Konveksiyon (Taşınım): Öncelikle; içteki borudaki sıcak akışkan ile iç boru yüzeyi arasında taşınım yoluyla olan ısı transferi gerçekleşir. Akışkan ile katı yüzey arasındaki bu taşınım ısı geçişi Newton’un soğuma kanunu kullanılarak hesaplanır.
- Kondüksiyon (İletim): Ardından; ısı, içteki borunun cidar kalınlığı üzerinden iletimle (Fourier kanunu) iç borunun dış yüzeyine iletilecektir.
- Konveksiyon (Taşınım): Son olarak; ısı, iç-boru dış yüzeyinden soğuk akışkana taşınım yoluyla geçecektir. Akışkan ile katı yüzey arasında gerçekleşen bu ısı taşınımı yine Newton’un soğuma kanunu kullanılarak hesaplanır.

Bu ısı geçiş mekanizmaları ile ilgili daha fazla bilgi ısı transferi kitaplarında mevcuttur [1,2,3].

Sıcak akışkan ile soğuk akışkan arasındaki toplam ısı geçişi, termodinamik kanunları (enerjinin korunumu) kullanılarak denklem 3 ve 4’de $\dot{Q}_1$ ve $\dot{Q}_2$ şeklinde ifade edilmişti. Bu ifadeler geometri ile ilgili bir büyüklük içermemektedir. Bu ısı transferinin gerçekleşebilmesi için gerekli geometrik boyutlar ancak ısı transferi kanunları kullanılarak belirlenebilir.

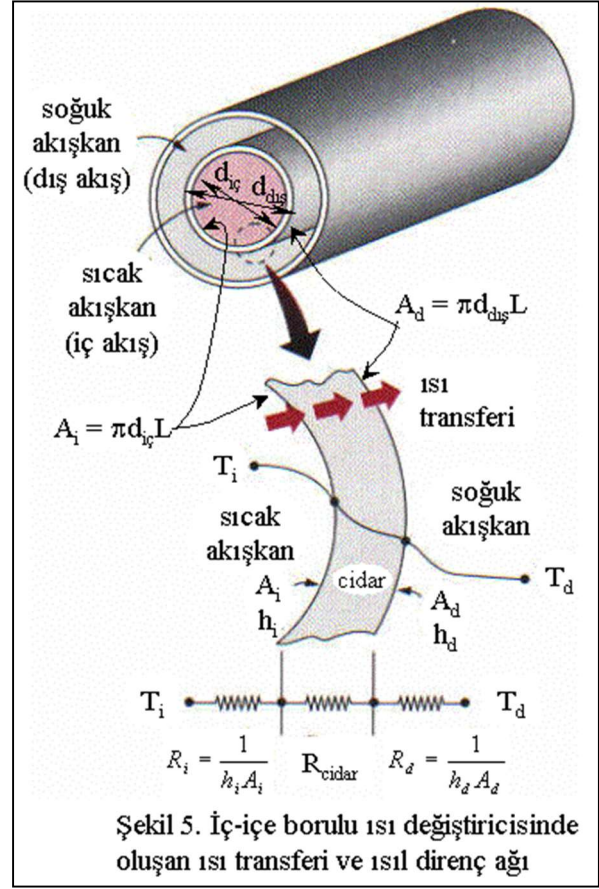
Isı transferi kanunları kullanılarak; sıcak akışkan ile soğuk akışkan arasındaki toplam ısı geçişi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_3 = KA\Delta T_{ln} \quad (5)$$

Bu ısı değerlerinin mükemmel yalıtılmış bir ısı değiştiricide kullanılan korelasyonların doğruluğuna bağlı olarak birbirine eşit olması ($\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3 = \dot{Q}$) gerekir. Bu denklemde K [$W/m^2 \cdot ^\circ C$] toplam ısı geçiş katsayısı, A [m^2] toplam ısı geçiş alanı ve ΔT_{ln} [$^\circ C$] logaritmik sıcaklık farkını ifade etmektedir. Burada, KA , sıcak akışkan ile soğuk akışkan arasındaki tüm ısı dirençlerinin toplamı olarak Şekil 5’de gösterildiği gibi aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\frac{1}{KA} = R_i + \frac{R_{fi}}{A_i} + R_{cidar} + \frac{R_{fd}}{A_d} + R_d \quad ; \quad \frac{1}{KA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{fi}}{A_i} + \frac{\ln(d_d/d_i)}{2\pi k_b L} + \frac{R_{fd}}{A_d} + \frac{1}{h_d A_d} \quad (6)$$

Denklemdeki R_i ve R_d [$^\circ C/W$] sırasıyla iç ve dış akıştaki ısı taşınım dirençleridir. R_{cidar} ise iç borunun et kalınlığının oluşturduğu ısı iletim direncidir. Denklemde belirtilen h_i ve h_d [$W/m^2 \cdot ^\circ C$] ise yine sırasıyla iç ve dış akıştaki ısı taşınım katsayılarıdır. k_b [$W/m \cdot ^\circ C$] içteki boru malzemesinin ısı iletim katsayısı, $A_i = \pi d_i L$ ve $A_d = \pi d_d L$ içteki borunun iç ve dış yüzey alanlarıdır. Burada R_f kirlilik faktörüdür ve zamanla akış yüzeylerinde oluşan kireçlenmeler sonucu dikkate alınması gereken bir ısı dirençtir. Kullanılan deney tesisatı için bu kirlilik ısı direnç değeri ihmal edilebilir.



Şekil 5. İç-içe borulu ısı değiştiricisinde oluşan ısı transferi ve ısı direnç ağı

Bu denklemlerden görüldüğü gibi, akışkanlar arasındaki ısı geçişini arttırmak için toplam ısı geçiş katsayısı, KA, veya logaritmik sıcaklık farkı, ΔT_{ln} , arttırılmalıdır. Çoğu zaman ΔT_{ln} uygulama yerindeki şartlar tarafından belirlidir. Toplam ısı geçiş katsayısını arttırmak içinde ya ısı geçiş katsayıları yada ısı geçiş alanının arttırılması gerekir. Isı geçiş alanı yüzeye yerleştirilen kanatlar vasıtasıyla arttırılabilir ve çok yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu yüzey genişletmesi aynı zamanda akışı düzenleyerek taşınım ile ısı geçişinde artmasını sağlayabilir. Isı iletim katsayısı yüksek olan malzemelerin kullanımı da ısı geçişini arttıracaktır. Ayrıca, akışın türbülanslı bölgede olması da ısı taşınım katsayısını, dolayısıyla da ısı geçişini arttıracak yönde etki eder.

Logaritmik sıcaklık farkı aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\Delta T \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (7)$$

$$\text{Burada; } \Delta T_1 = (T_{1g} - T_{2g}) \quad (8)$$

girişte, sıcak ve soğuk akışkanlar arasındaki sıcaklık farkı

$$\Delta T_2 = (T_{1\phi} - T_{2\phi}) \quad (9)$$

çıkışta, sıcak ve soğuk akışkanlar arasındaki sıcaklık farkı denklemleriyle hesaplanır.

3.1. Isı taşınım katsayılarının hesabı: (h_i , h_d)

İçteki borudan (iç akış) ve borular arasındaki akış için (dış akış), ısı taşınım katsayıları (h_i ve h_d) akışın laminar veya türbülanslı bölgede olmasına bağlı olarak hesaplanır. Akış kesiti ve akış şartları farklı olduğundan hesaplama farklı denklemler kullanılarak yapılır. Aşağıda sırasıyla hesaplama için gerekli denklemler verilmiştir.

3.2. Boru içinden akışta ısı taşınım katsayısının hesabı: (h_i)

Öncelikle, iç borudaki akışı göz önüne alalım. Re sayısı hesaplanarak akışın laminar veya türbülanslı bölgede olduğu belirlenir.

$$Re_1 = \frac{u_1 D_{h1}}{\nu_1} \quad (10)$$

Burada u_1 [m/s] akış kesiti içindeki ortalama hızdır. Ortalama hız, kütleli debi ($\dot{m}$ [kg/s]) veya hacimsel debi ($\dot{Q}$ [m³/s]) cinsinden

$$\dot{m}_1 = \rho_1 \dot{Q}_1 = \rho_1 A_1 u_1 \quad (10a)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanabilir. A_1 akış alanı ise

$$A_1 = \pi d_{ic}^2 / 4 \quad (10b)$$

olacaktır. Hidrolik çap ise,

$$D_{h1} = \frac{4 \times \text{akış kesiti}}{\text{akış kesitinin çevresi}} = \frac{4A}{C} = \frac{4\pi d_{ic}^2 / 4}{\pi d_{ic}} = d_{ic} \quad (11)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanır ve boru içinden akış için iç çapa eşittir.

Suya ait fiziksel özellikler, $\{c_p[\text{J/kg}^\circ\text{C}], \rho[\text{kg/m}^3], k[\text{W/m}^\circ\text{C}], \nu[\text{m}^2/\text{s}], \text{Pr sayısı}\}$ ortalama akışkan sıcaklığında,

$$T_{1ort} = (T_{1g} + T_{1c}) / 2 \quad (11a)$$

tablolardan okunabilir. Doymuş suyun sıvı özellikleri ekte verilen tablo kullanılarak bulunabilir. Boru içinden akış için, Re sayısı 2300 den küçük ise akış laminar bölgede, büyükse türbülanslı bölgede olacaktır.

$$\begin{aligned} Re < 2300 &\Rightarrow \text{Laminar akış} \\ Re > 2300 &\Rightarrow \text{Türbülanslı akış} \end{aligned} \quad (11b)$$

Laminer akış ($Re < 2300$) olması durumunda, boru iç yüzey sıcaklığının sabit olduğu kabul edilirse, hidrodinamik ve ısıl olarak tam gelişmiş akış için Nusselt sayısı

$$Nu_i = \frac{h_i D_{hi}}{k_i} = 3.66 \quad (12)$$

şeklindedir. Buradaki; k_i içteki borudan akan suyun ısı iletim katsayısıdır. Bu denklemden h_i hesaplanır.

Türbülanslı akış ($Re > 2300$) bölgesinde ise Nu sayısı aşağıdaki denklemden hesaplanabilir.

$$Nu_i = \frac{h_i D_{hi}}{k_i} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (13)$$

Buradaki; k_i içteki borudan akan suyun ısı iletim katsayısıdır. Bu denklemden h_i hesaplanır.

3.3. Eş merkezli borular arasından akışta (dış akış) ısı taşınım katsayısının hesabı: (h_d)

Dıştaki borudaki ısı taşınım katsayısının hesabı için öncelikle hidrolik çapı hesaplayalım.

$$D_{h2} = \frac{4A}{C} = \frac{4\pi(D_{ic}^2 - d_{dis}^2)/4}{\pi(D_{ic} + d_{dis})} = D_{ic} - d_{dis} \quad (14)$$

Buna bağlı olarak

$$Re_2 = \frac{u_2 D_{h2}}{\nu_2} \quad (14a)$$

denklemden Re sayısı hesaplanır. Burada, u_2 ortalama hızı, yine debi denklemden

$$\dot{m}_2 = \rho_2 \dot{Q}_2 = \rho_2 A_2 u_2 \quad (14b)$$

hesaplanabilir. A_2 akış alanı ise

$$A_2 = \frac{\pi(D_{ic}^2 - d_{dis}^2)}{4} \quad (14c)$$

olacaktır. Soğuk suyun fiziksel özellikleri de yine soğuk su için ortalama su sıcaklığı

$$T_{2ort} = \frac{T_{2g} + T_{2c}}{2} \quad (14d)$$

kullanılarak ekteki tablodan bakılabilir. Bu eş eksenli borular arasındaki akışta kritik Re sayısı yine 2300 olarak değerlendirilebilir. Yani

$$\begin{aligned} Re < 2300 &\Rightarrow \text{Laminer akış} \\ Re > 2300 &\Rightarrow \text{Türbülanslı akış} \end{aligned} \quad (14e)$$

Laminer akış ($Re < 2300$): bölgesinde, $d_{dış}/D_{iç}$ oranına bağlı olarak, ortak eksenli borular arasındaki laminer akış için verilen aşağıdaki Tablo 1'den Nu_d sayısı tespit edilir. Burada kullanılacak değer birinci kolondaki değerler olacaktır. Çünkü ısı değiştiricinin dış yüzeyi yalıtılmıştır ve iç yüzeyde uniform sıcaklık kabulü yapılabilir. Aşağıdaki Nu sayısı denklemden

$$Nu_d = \frac{h_d D_{h2}}{k_d} \quad (14f)$$

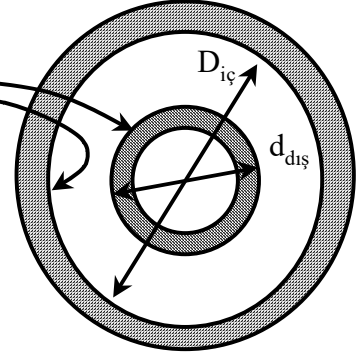
h_d hesaplanır. Buradaki; k_d dış akıştaki suyun ısı iletim katsayısıdır.

Türbülanslı akış ($Re > 2300$): bölgesinde ise Nu sayısı aşağıdaki denklemden bulunur:

$$Nu_d = \frac{h_d D_{h2}}{k_d} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (15)$$

Buradaki; k_d dış akıştaki suyun ısı iletim katsayısıdır. Bu denklemden h_d hesaplanır.

Tablo 1. Bir yüzeyi yalıtılmış diğeri sabit sıcaklıkta olan ortak merkezli borular arasındaki halkasal bölgede tam gelişmiş laminar akış için Nusselt sayısı		
	İç yüzeyde üniform sıcaklık, dış yüzey yalıtılmış	Dış yüzeyde üniform sıcaklık, iç yüzey yalıtılmış
	$Nu_{d_{dış}}$	$Nu_{D_{iç}}$
$d_{dış}/D_{iç}$	(iç borunun dış çapında)	(dış borunun iç çapında)
0.00	-	3.66
0.05	17.46	4.06
0.10	11.56	4.11
0.25	7.37	4.23
0.50	5.74	4.43
1.00	4.86	4.86



4. Etkenlik (ε)-NTU metodu:

Bir ısı değiştiricide akışkanların sadece giriş sıcaklıkları biliniyorsa; ε -NTU yöntemi, ısı analizinde kullanılan faydalı bir yöntemdir. Aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Bir ısı değiştiricinin etkenliği, ε , o ısı değiştiricide pratikte gerçekleşen ısı geçişinin, teorik olarak olabilecek en yüksek ısı geçişine oranı olarak tarif edilir. Maksimum ısı geçişi paralel akış için ancak sıcak ve soğuk akışkanların çıkıştaki sıcaklıklarının birbirine eşit olması ile mümkündür. Burada, akışkanların ısıl kapasite debisi: C ;

$$C = \dot{m}c_p \quad (C_1 = \dot{m}_1 c_{p1}) \quad (C_2 = \dot{m}_2 c_{p2}) \quad (16a)$$

olarak tanımlanır. Bu durumda ısı değiştiricinin etkenliği

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{Q}{C_{\min}(T_{1-g} - T_{2-g})} = \frac{C_1(T_{1g} - T_{1c})}{C_{\min}(T_{1-g} - T_{2-g})} = \frac{C_2(T_{2c} - T_{2g})}{C_{\min}(T_{1-g} - T_{2-g})} \quad (16b)$$

şeklinde tarif edilir. Denklem 16'da ısıl kapasite debisi küçük olan akışkan kullanılmıştır.

Etkenlik boyutsuz bir büyüklüktür ve $0 \leq \varepsilon \leq 1$ arasında değişir. Eğer bir ısı değiştiricinin etkenliği ve soğuk ve sıcak akışkanların giriş sıcaklıkları biliniyorsa, ısı değiştiricide transfer edilebilecek gerçek ısı aşağıdaki bağıntıdan kolaylıkla hesaplanabilir.

$$Q = \varepsilon C_{\min}(T_{1-g} - T_{2-g}) \quad (16c)$$

Bu bakımdan etkenlik kullanımı büyük kolaylık ve fayda sağlar.

Ayrıca, ısı değiştiricileri için etkenlik aşağıdaki bağıntıda yazıldığı gibi NTU, $C_{\min}$ ve $C_{\max}$ sayılarının bir fonksiyonu olarak tespit edilmiştir.

$$\varepsilon = f\left(NTU, \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right) \quad (17a)$$

Burada $C_{\min} / C_{\max}$ oranı sıcak ve soğuk akışkanların ısıl kapasite debilerinin oranıdır. NTU ise geçiş birimi sayısıdır ve ısı değiştirici hesaplarında yaygın olarak kullanılır. NTU aşağıdaki bağıntıyla tanımlanan boyutsuz bir parametredir:

$$NTU = \frac{KA}{C_{\min}} \quad (17b)$$

Paralel akış için $\varepsilon = f(NTU, C_{\min}/C_{\max})$ denklemi aşağıdaki şekildedir ve grafiksel olarak Şekil 6'da gösterilmiştir.

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\{-NTU(1+C_r)\}}{1+C_r} \quad \rightarrow \quad NTU = -\frac{\ln\{1-\varepsilon(1+C_r)\}}{1+C_r} \quad (18)$$

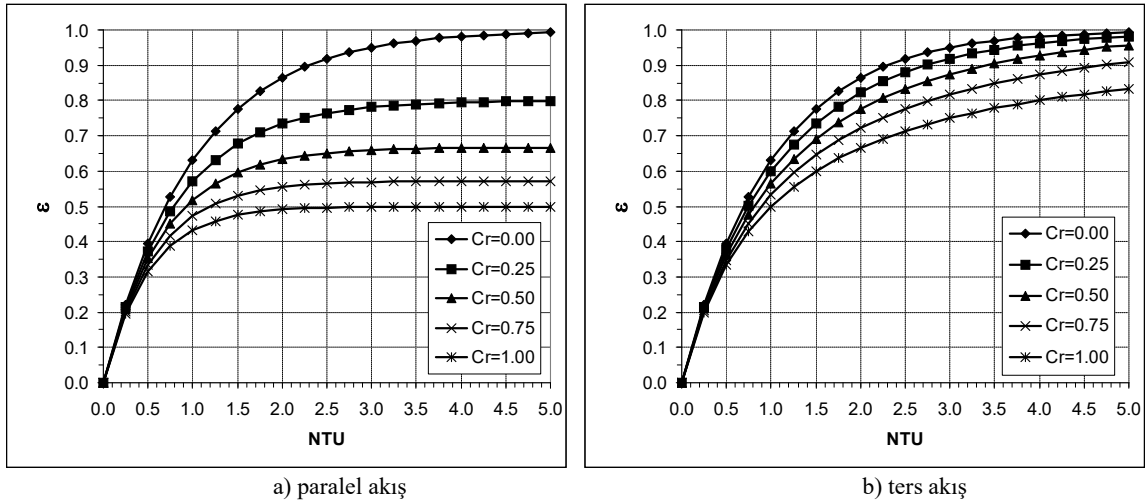
$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{(\dot{m}c_p)_{\min}}{(\dot{m}c_p)_{\max}} \quad (19)$$

Ters akış için ise $\varepsilon = f(NTU, C_{\min}/C_{\max})$ denklemleri

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\{-NTU(1-C_r)\}}{1 - C_r \exp\{-NTU(1-C_r)\}} \rightarrow NTU = \frac{1}{C_r - 1} \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1}\right) \quad (C_r < 1) \quad (20)$$

$$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU} \rightarrow NTU = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (C_r = 1) \quad (21)$$

şeklindedir. Bu denklemler Şekil 6’da grafik halinde gösterilmiştir.



Şekil 6. İç-içe iki borulu ısı değıştiricisinin etkenliğı

5. Belirsizlik Analizi:

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (22)$$

6. Genel Değerlendirme ve Sonuç:

Bu ısııl analiz sonucunda iç-içe borulu ısı değıştiricide belirlenen akış şartları ve geometrik ölçüler için toplam ısı geçişi ve ısı değıştiricinin etkenliğı bulunur. Ardından gerçekte yapılan deneyden elde edilen veriler için de gerekli hesaplar yapılarak, teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılır. Böylece ısı değıştiricinin ısııl analizi teorik ve deneysel olarak yapılmış olur.

7. Deneyin yapılışı:

Sıcak ve soğuk su giriş vanaları açılarak debiler ayarlanır ve suyun giriş ve çıkış sıcaklıkları sabitleninceye kadar sistemin sürekli rejime girmesi için beklenir. Su debileri ve giriş ve çıkış sıcaklıkları okunur. Debi değeri değıştirilerek aynı deney verileri toplam üç defa alınır.

8. Deneysel raporunun hazırlanışı:

Yapılan ölçümler için tüm teorik hesaplar detaylı olarak yapılacak ve sonuçlar tablo halinde Deneysel ve teorik hesaplar karşılaştırılarak yorumlanacaktır.

Hesaplamalar için aşağıdaki sıra takip edilebilir:

1. Ölçülen giriş ve çıkış sıcaklıklarının ortalama değerlerinde sıcak ve soğuk su için özellikler Tablo 2'den belirlenir. (En yakın değer alınabilir veya interpolasyon yapılabilir.)
2. Ölçülen debi değerleri kütleli debiye (kg/s) dönüştürülür. İç ve dış akış alanları hesaplanır. Buna göre iç ve dış akış için debi denklemi yardımıyla ortalama hızlar hesaplanır.
3. 3 ve 4 nolu denklemlerden gerçekleşen ısı transferi hesaplanır. İki değer arasındaki farkın sebepleri tartışılır.
4. Daha sonra ısı transfer kanunları kullanılarak denklem 5'den ($Q_3 = KA\Delta T_{ln}$) ısısının hesaplaması yapılır. Bunun için aşağıdaki sıra takip edilir:
 - 4.1. İç borudaki ısı taşınım katsayısı Bölüm 3.2'de anlatıldığı gibi hesaplanır.
 - 4.2. Dış borudaki ısı taşınım katsayısı Bölüm 3.3'de anlatıldığı gibi hesaplanır.
 - 4.3. Ardından, ısı değiştiricinin toplam ısı geçiş katsayısı denklem 6'dan hesaplanır.
 - 4.4. Logaritmik sıcaklık farkı denklem 7,8,9'dan hesaplanır.
 - 4.5. Sıcak ve soğuk su arasındaki ısı geçişi denklem 5 kullanılarak hesaplanır ve denklem 3 ve 4'den elde edilen değerler ile karşılaştırılır.
5. Isı değiştiricinin etkinliği hesaplanır ve ϵ -NTU yönteminin uygulaması yapılır.
6. Isı transfer miktarı ve etkinlik değerleri paralel ve ters akış için karşılaştırılarak yorumlanır.
7. Bu hesaplar ölçümlerden bir tanesi için detaylı olarak yapıp, diğer ölçümler için sadece sonuçlar tablo halinde gösterilecektir.

9. Ekler:

Ek 1. Tablo 2. Suyun özellikleri (Atmosfer basıncında)

Sıcaklık $T [^{\circ}\text{C}]$	Yoğunluk $\rho [\text{kg/m}^3]$	Özgül ısı $c_p [\text{J/kg}^{\circ}\text{C}]$	Isı iletim katsayısı $k [\text{W/m}^{\circ}\text{C}]$	Dinamik viskozite $\mu [\text{kg/ms}]$	Kinematik viskozite $\nu = \mu/\rho [\text{m}^2/\text{s}]$	Prandtl sayısı Pr
0	999.8	4217	0.561	1.792×10^{-3}	1.792×10^{-6}	13.5
5	999.9	4205	0.571	1.519×10^{-3}	1.519×10^{-6}	11.2
10	999.7	4194	0.580	1.307×10^{-3}	1.307×10^{-6}	9.45
15	999.1	4186	0.589	1.138×10^{-3}	1.139×10^{-6}	8.09
20	998.0	4182	0.598	1.002×10^{-3}	1.004×10^{-6}	7.01
25	997.0	4180	0.607	0.891×10^{-3}	0.894×10^{-6}	6.14
30	996.0	4178	0.615	0.798×10^{-3}	0.801×10^{-6}	5.42
35	994.0	4178	0.623	0.720×10^{-3}	0.724×10^{-6}	4.83
40	992.1	4179	0.631	0.653×10^{-3}	0.658×10^{-6}	4.32
45	990.1	4180	0.637	0.596×10^{-3}	0.602×10^{-6}	3.91
50	988.1	4181	0.644	0.547×10^{-3}	0.554×10^{-6}	3.55
55	985.2	4183	0.649	0.504×10^{-3}	0.512×10^{-6}	3.25
60	983.3	4185	0.654	0.467×10^{-3}	0.475×10^{-6}	2.99
65	980.4	4187	0.659	0.433×10^{-3}	0.442×10^{-6}	2.75
70	977.5	4190	0.663	0.404×10^{-3}	0.413×10^{-6}	2.55
75	974.7	4193	0.667	0.378×10^{-3}	0.388×10^{-6}	2.38
80	971.8	4197	0.670	0.355×10^{-3}	0.365×10^{-6}	2.22
85	968.1	4201	0.673	0.333×10^{-3}	0.344×10^{-6}	2.08
90	965.3	4206	0.675 ⁵⁷	0.315×10^{-3}	0.326×10^{-6}	1.96
95	961.5	4212	0.677	0.297×10^{-3}	0.309×10^{-6}	1.85
100	957.9	4217	0.679	0.282×10^{-3}	0.294×10^{-6}	1.75

Ek 2. Örnek hesaplama

Bu örnek sadece takip edilecek adımları kısmi olarak açıklamak için hazırlanmıştır. Okunan ölçüm değerleri aşağıdaki tablodaki gibi belirlenmiştir.

		Sıcak su			Soğuk su		
	Ölçümler	T _{1g} [°C]	T _{1ç} [°C]	Q ₁ [m ³ /h]	T _{2g} [°C]	T _{2ç} [°C]	Q ₂ [lt/h]
paralel akış	1	47.3	42.3	0.225	15.1	21.9	135
	2						
	3						
	4						
ters akış	5						
	6						
	7						
	8						

Ek 3. Deney düzeneğindeki parametrelerin belirsizliği

Değerler	Birim	Belirsizlik
Yoğunluk	kg/m ³	± %0,03
Hacimsel Debi	m ³ /s	± 3,33*10 ⁻⁶
Özgül Isı	kJ/(kgK)	± %2,5
Sıcaklık	°C	± 0,15

● **1.** Öncelikle, sıcak ve soğuk su için ortalama sıcaklıklar hesaplanır ve hesaplanan ortalama sıcaklıktaki özellikler tablodan tespit edilir.

Sıcak su için:

$$T_{1ort} = \frac{T_{1g} + T_{1ç}}{2} = \frac{47.3 + 42.3}{2} = 44.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Yaklaşık 45°C kullanılarak tablodan

$$\rho_1 = 990.1 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{p1} = 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$k_1 = 0.637 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\nu_1 = 0.602 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr_1 = 3.91$$

$$\rho_2 = 998.0 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{p2} = 4182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$k_2 = 0.598 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\nu_2 = 1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr_2 = 7.01$$

Soğuk su için:

$$T_{2ort} = \frac{T_{2g} + T_{2ç}}{2} = \frac{15.1 + 21.9}{2} = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Yaklaşık 20°C kullanılarak tablodan

● **2.** İşlemlere başlamadan önce okunan debilerin birimlerinin denklemlerde kullanılacak uygun birimlere dönüştürülmesi gerekir.

Sıcak su için okunan hacimsel debi değeri $\dot{Q}_1 = 0.225 \frac{m^3}{h}$, dir.

Bu debi aynı zamanda $\dot{Q}_1 = 0.225 \frac{m^3}{h} = 0.225 \frac{m^3}{3600} = 6.25 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$ birimindedir.

Kütleli debi ise $\dot{m}_1 = \rho_1 \dot{Q}_1 = 990.1 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \times 6.25 \times 10^{-5} \left[\frac{m^3}{s} \right] = 0.062 \frac{kg}{s}$ olacaktır.

Soğuk su için okunan hacimsel debi değeri $\dot{Q}_2 = 135 \frac{lt}{h}$, dir.

Bu debi aynı zamanda

$\dot{Q}_2 = 135 \frac{lt}{h} = 135 \frac{dm^3}{h} = 135 \frac{1 \times 10^{-3} m^3}{h} = 0.135 \frac{m^3}{h} = 0.135 \frac{m^3}{3600s} = 3.75 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$ birimindedir.

Kütleli debi ise $\dot{m}_2 = \rho_2 \dot{Q}_2 = 998.0 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \times 3.75 \times 10^{-5} \left[\frac{m^3}{s} \right] = 0.037 \frac{kg}{s}$ olacaktır.

● **3.** Ardından, sıcak ve soğuk su için ısı kaybı/kazancı hesaplanabilir.

Sıcak suyun ısı kaybı

$$\begin{aligned} \dot{Q}_1 &= \dot{m}_1 c_{p1} (T_{1g} - T_{1c}) = 0.062 \left[\frac{kg}{s} \right] \times 4180 \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right] \times (47.3 - 42.3) [^\circ C] \\ &= 1295.8 [W] \end{aligned}$$

Soğuk suyun ısı kazancı

$$\begin{aligned} \dot{Q}_2 &= \dot{m}_2 c_{p2} (T_{2c} - T_{2g}) = 0.037 \left[\frac{kg}{s} \right] \times 4182 \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right] \times (21.9 - 15.1) [^\circ C] \\ &= 1052.2 [W] \end{aligned}$$

Bu ısı değerlerinin mükemmel yalıtılmış bir ısı değiştiricide birbirine eşit olması ($\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}$) gerekir. Eğer hesaplamalarda eşit çıkmıyorsa, farkın ne tür sebeplerden kaynaklanabileceği yorumlanacaktır.

● **4.** Daha sonra ısı transfer kanunları kullanılarak $\dot{Q}_3 = KA\Delta T_{ln}$ ısıısının hesaplanması yapılır. Bu değerin hesaplanma işlemleri için deney föyünde verilen sıranın takibi uygun olacaktır.

4.1. Öncelikle, içteki borudaki sıcak su akışını göz önüne alalım. Re ($Re_1 = u_1 D_{h1} / \nu_1$) sayısı hesaplanarak akışın laminer veya türbülanslı bölgede olduğu belirlenir. Re sayısının hesaplanması için hız (u_1) ve hidrolik çapa (D_{h1}) gerek vardır.

Boru içinden akış için $D_{h1} = d_{ic} = 0.0168m$ olarak deney föyünde bulunmuştu.

Ayrıca akış kesit alanı ise $A_1 = \frac{\pi d_{ic}^2}{4} = \frac{\pi \times 0.0168^2}{4} = 2.21 \times 10^{-4} m^2$

olacaktır.

Akış kesiti içindeki ortalama hız ise kütleli debi ($\dot{m}$ [kg/s]) veya hacimsel debi ($\dot{Q}$ [m³/s]) denkleminde

$$\dot{m}_1 = \rho_1 \dot{Q}_1 = \rho_1 A_1 u_1 \quad \Rightarrow \quad 0.062 \left[\frac{kg}{s} \right] = 990.1 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \times 2.21 \times 10^{-4} [m^2] \times u_1 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\Rightarrow u_1 = 0.2833 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\text{Re sayısı} \quad Re_1 = \frac{u_1 D_{h1}}{\nu_1} = \frac{0.2833 \left[\frac{m}{s} \right] \times 0.0168 [m]}{0.602 \times 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]} = 7906.046$$

$Re_1 = 8695 > 2300$ olduğundan akış türbülanslı akış bölgesindedir. Bu sebeple türbülanslı akış için verilen Nu sayısı denklemi kullanılacaktır.

$$Nu_{i1} = \frac{h_{i1} D_{hi1}}{k_{i1}} = 0.023 Re_1^{0.8} Pr_1^{0.3} = 0.023 \times 7906.046^{0.8} \times 3.91^{0.3} = 45.472$$

Buradan; iç borudaki ısı taşınım katsayısı (konveksiyonla ısı geçiş katsayısı)

$$Nu_{i1} = \frac{h_{i1} D_{hi1}}{k_{i1}} = 45.472 \quad \Rightarrow \quad Nu_{i1} = \frac{h_{i1} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \times 0.0168 [m]}{0.637 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]} = 45.472$$

$$\Rightarrow \quad \underline{h_{i1} = 1724.146 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \text{ hesaplanır.}}$$

4.2. Borular arasındaki eş merkezli soğuk su akışını göz önüne alalım. Benzer şekilde Re sayısının hesaplanması için hız (u_2) ve hidrolik çapa (D_{h2}) gerek vardır.

Bu akış için deney füyünden $D_{h2} = D_{ic} - d_{dis} = 0.0426 - 0.0215 = 0.0211m$ olarak bulunmuştur.

Ayrıca akış kesit alanı ise $A_2 = \frac{\pi(D_{ic}^2 - d_{dis}^2)}{4} = \frac{\pi \times (0.0426^2 - 0.0215^2)}{4} = 1.0622 \times 10^{-3} m^2$ olacaktır.

Akış kesiti içindeki ortalama hız ise kütleli debi ($\dot{m}$ [kg/s]) veya hacimsel debi ($\dot{Q}$ [m³/s]) denkleminde

$$\dot{m}_2 = \rho_2 \dot{Q}_2 = \rho_2 A_2 u_2 \quad \Rightarrow \quad 0.037 \left[\frac{kg}{s} \right] = 998.0 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \times 1.0622 \times 10^{-3} [m^2] \times u_2 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\Rightarrow u_2 = 0.0349 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\text{Re sayısı} \quad Re_2 = \frac{u_2 D_{h2}}{\nu_2} = \frac{0.0349 \left[\frac{m}{s} \right] \times 0.0211 [m]}{1.004 \times 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]} = 733.456$$

$Re_2 = 733.46 < 2300$ olduğundan akış laminar akış bölgesindedir. Bu sebeple laminar akış için verilen Tablo 1'in ilk kolonundan Nu sayısı belirlenir. Tablodan okumanın yapılması için $\frac{d_{dis}}{D_{ic}} = \frac{0.0215}{0.0426} = 0.504 \cong 0.50$ değeri kullanılarak $Nu_{d2} = 5.74$ olarak okunur.

Buradan bu akış için ısı taşınım katsayısı

$$Nu_{d2} = \frac{h_{d2} D_{hd2}}{k_{d2}} = 5.74 \quad \Rightarrow \quad Nu_{d2} = \frac{h_{d2} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \times 0.0211 [m]}{0.598 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]} = 5.74$$

$$\Rightarrow \quad \underline{h_{d2} = 162.678 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \text{ hesaplanır.}}$$

4.3. Ardından, ısı değiştiricinin toplam ısı geçiş katsayısı aşağıdaki denklemden hesaplanır.

$$\frac{1}{KA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln \frac{d_d}{d_i}}{2\pi k_b L} + \frac{1}{h_d A_d} \quad \text{Burada} \quad A_i = \pi d_{ic} L = \pi \times 0.0168 \times 1.2 = 0.06333 m^2$$

$$A_d = \pi d_{dis} L = \pi \times 0.0215 \times 1.2 = 0.08105 m^2$$

$$\frac{1}{KA} = \frac{1}{1724.146 \times 0.06333} + \frac{\ln \frac{0.0215}{0.0168}}{2\pi \times 54 \times 1.2} + \frac{1}{162.678 \times 0.08105}$$

$$\frac{1}{KA} = 9.1583 \times 10^{-3} + 6.0585 \times 10^{-4} + 0.07584 = 0.085604 = \frac{1}{11.6816} \Rightarrow$$

$$KA = 11.6816 \left[\frac{W}{^\circ C} \right]$$

4.4. Logaritmik sıcaklık farkı aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\Delta T \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \frac{32.2 - 20.4}{\ln \frac{32.2}{20.4}} {}^\circ C_{ln} \quad \text{Burada;} \quad \Delta T_1 = T_{1g} - T_{2g} = 47.3 - 15.1 = 32.2 {}^\circ C$$

$$\Delta T_2 = T_{1c} - T_{2c} = 42.3 - 21.9 = 20.4 {}^\circ C$$

4.5. Sıcak ve soğuk su arasındaki ısı geçişi

$$\dot{Q}_3 = KA \Delta T [W]_{ln}$$

olarak hesaplanır.

Bu ısı değerlerinin mükemmel yalıtılmış bir ısı değiştiricide birbirine eşit olması ($\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3$) gerekir. $\dot{Q}_1 = 1295.8 [W]$, $\dot{Q}_2 = 1052.2 [W]$ $\dot{Q}_3 = 301.969 [W]$ olarak hesaplandı. Farklılıkları yorumlayınız.

5. Ayrıca, ε -NTU yönteminin de uygulamasını yapınız.

$$\text{Sıcak su için} \quad C_1 = \dot{m}_1 c_{p1} = 0.062 [kg/s] \times 4180 [J/(kg \cdot ^\circ C)] = 259.2 [W / ^\circ C]$$

$$\text{Soğuk su için} \quad C_2 = \dot{m}_2 c_{p2} = 0.037 \left[\frac{kg}{s} \right] \times 4182 [J/(kg \cdot ^\circ C)] = 154.7 [W / ^\circ C]$$

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{(\dot{m}c_p)_{\min}}{(\dot{m}c_p)_{\max}} = \frac{154.7}{259.2} = 0.60$$

Sıcak suyun ısı kaybı

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_1 c_{p1} (T_{1g} - T_{1c}) = C_1 (T_{1g} - T_{1c}) = 0.062 [kg/s] \times 4180 [J/(kg \cdot ^\circ C)] \times (47.3 - 42.3) [^\circ C] = 1295.8 [W] \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Paralel akış için maksimum ısı geçişi

$$Q = C_{\min} (T_{1-g} - T_{2-g}) = 154.7 [W / ^\circ C] \times (47.3 - 15.1) [^\circ C] = 4981.3 [W] \text{ olarak hesaplanır.}$$

Isı değiştiricinin etkenliği

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} = \frac{1295.8}{4981.3} = 0.26 \text{ olarak hesaplanır.}$$

Diğer taraftan ε ve NTU değerleri aşağıdaki denklemler kullanılarak da hesaplanabilir.

$$\text{Paralel akış için } NTU = -\frac{\ln\{1-\varepsilon(1+C_r)\}}{1+C_r} = -\frac{\ln\{1-0.26 \times (1+0.60)\}}{1+0.60} = 0.34$$

Grafikten (Şekil 6) değerlendiriniz. Farklılıkları yorumlayınız.

● 6. Belirsizlik analizi örnek hesaplamalar

6.1. Kütleli debi ($\dot{m}$) belirsizlik analizi hesabı

$$w_{\dot{m}} = \left[\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \rho_{su}} w_{\rho_{su}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \dot{V}} w_{\dot{V}} \right)^2 \right]^{1/2} = [(6.25 * 10^{-5} * 3.0299 * 10^{-5})^2 + (990.1 * 3,33 * 10^{-6})^2]^{1/2} = 3.2969 * 10^{-3}$$

$$\text{Yüzdece Hata} = \%0.0531$$

6.2. Isı değıştircisi sıcak su tarafından atılan ısı ($\dot{Q}_{sıcak_su}$) belirsizlik analizi hesabı

$$w_{\dot{Q}} = \left[\left(\frac{\partial \dot{Q}}{\partial \dot{m}} w_{\dot{m}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}}{\partial c_p} w_{c_p} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}}{\partial \Delta T} w_{\Delta T} \right)^2 \right]^{1/2} = [(4,18 * 5 * 3,2969 * 10^{-3})^2 + (0.062 * 5 * 0,1045)^2 + (0.062 * 4,18 * 0,15)^2]^{1/2} = 0.08548$$

$$\text{Yüzdece Hata} = \%6.5966 * 10^{-3}$$

● 7. Isı transfer miktarı ve etkenlik değerleri paralel ve ters akış için karşılaştırılarak yorumlanır.

● 8. Bu hesaplar ölçümlerden bir tanesi için detaylı olarak yapıp, diğer ölçümler için sadece sonuçlar tablo halinde gösterilecektir.

Ek 4. Hesap Tablosu

Isı Değiştiricileri Deneyi Hesap Tablosu								
	Deney 1		Deney 2		Deney 3		Deney 4	
Ölçümler	Sıcak su	Soğuk su	Sıcak su	Soğuk su	Sıcak su	Soğuk su	Sıcak su	Soğuk su
T-g [°C]	47.3	15.1						
T-ç [°C]	42.3	21.9						
Q	0.225 (m ³ /h)	135 (lt/h)	(m ³ /h)	(lt/h)	(m ³ /h)	(lt/h)	(m ³ /h)	(lt/h)
Q (m ³ /s)	6.25E-05	3.75E-05						
m [kg/s]	0.062	0.037						
Tort [°C]	44.8	18.5						
ρ [kg/m ³]	990.1	998.0						
cp [J/kg-C]	4180	4182						
v [m ² /s]	6.020E-07	1.004E-06						
μ [kg/m-s]								
k [W/m-C]	0.637	0.598						
Pr	3.91	7.01						
Q [W]	1295.8	1052.2						
u [m/s]	0.336	0.029						
Re	8595	711						
Nu	48.6	5.74						
h [W/m ² -C]	2010.3	139.5						
KA [W/C]	10.22							
ΔTln [C]	25.85							
Q3 [W]	264.20							

2.8. MOTOR KARAKTERİSTİKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ DENEYİ

1. Deneyin Amacı

İçten yanmalı motor performans parametrelerinin tanıtılması, motor test sistemlerinin tanıtılması, motor performans parametrelerinin motor test sistemi ile ölçülmesi ve test sonuçlarının yorumlanması.

2. Motor Testi

Motor testleri; imalat sonunda motor performansının kontrolü, Araştırma-Geliştirme ile yapılan her türlü motor modifikasyonunun etkilerinin belirlenmesi, çeşitli alternatif yakıtların performansa etkilerinin incelenmesi gibi amaçlarla yapılır.

Motor test sistemlerinde motora ait birçok çalışma parametresi kontrol edilerek ölçümü yapılır. Motorun bulunduğu ortamın sıcaklığı, basıncı ve neminden, motor devir sayısı, gaz keleşğı açıklığı, egzoz sıcaklığı gibi birçok çalışma parametresinin değeri ölçölür. Motor testlerinde genellikle doğrudan ölçölen parametreler; motor torku, devir sayısı, yakıt debisi ve sıcaklığı, emme havası debisi, sıcaklığı ve basıncı, ortam bağıl nemi, soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklığı, egzoz gazı sıcaklarıdır.

Motor testlerinde doğrudan ölçölen bu değeri kullanılarak efektif güç, ortalama efektif basınç, efektif özgül yakıt tüketimi, volümetrik verim gibi motorun karakteristik performans parametreleri hesaplanır. Ölçölen ve hesaplanan bu parametrelerin; devir sayısı, hava fazlalık katsayısı, gaz kolu keleşğı açıklığı ve sıkıştırma oranı gibi parametrelere göre değışimleri eğriler çıkarılarak incelenir.

2.1 Motor Test Çeşitleri

İçten yanmalı motorların uygulamada oldukça geniş bir perspektifte kullanımı söz konusudur. Pistonlu motorlar özeline bakıldığında ise genel olarak kara ve deniz taşıtlarında veya güç depolama ve inşaat tesislerinde güç tedarikinde kullanımı söz konusudur. Son dönemde savunma sanayi alanında İnsansız Hava Araçları' nda da kullanılmaktadır. Kullanım alanlarına göre motorlardan çıktı olarak alınacak performans parametreleri farklılık göstermektedir. Örneğin; bir taşıt motoru sabit gaz durumunda motor yüküne göre belirli bir alt ve üst devir sayısı aralığında çalışmalı ve bu aralıkta özellikleri bilinmelidir. Öte yandan güç tedariki sağlanacak bir tesiste çalışan bir santral motoru; üretilen elektriğin belirli bir frekansta

olması için, sabit devir sayısında çalışmalıdır. Motorların bu farklı tür çalışma koşullarına uygun olarak, motor testleri de farklılık göstermektedir.

2.1.1 Taşıt Motoru Testleri

Taşıt motorlarında, üretilen güç, krank mili yardımıyla güç aktarma donanımına (kavrama, dişli kutusu, diferansiyel ve akslar) iletilir. Bu donanım ile de tekerleklerle iletilir ve taşıt hareketi sağlanır. Taşıt motorları, sürüş koşulları bakımından birçok farklı durum ile karşılaşabilmektedir. Motorun bu koşullara zaman kaybı olmaksızın cevap verebilmesi için farklı gaz durumlarında ve devir sayılarında çalışması gerekir. Bu nedenle taşıt motorları, belirli gaz durumları için değişken devir sayılarında denenmektedir.

Taşıt motorlarının değişik hızlarda denenebilmesi için; tam gaz (%100 açıklık), 3/4 gaz (%75 açıklık), 1/2 gaz (%50 açıklık), 1/4 gaz (%25 açıklık) gibi istenen gaz durumlarında en düşük ve en yüksek devir aralığında çalıştırılmaları gereklidir. Bu amaçla motor çalıştırıldıktan sonra; bir taraftan gaz arttırılırken, dinamometre aracılığı ile motor yavaş yavaş yüklenir (frenletilir). Gaz kolu istenen konuma getirildiğinde motor uygun şekilde yüklenerek en düşük devirde kararlı çalışma sağlanması için beklenir. Kararlı çalışma sağlandıktan sonra motorun devir sayısı en düşük (minimum) devir sayısına ayarlanır. Daha sonra yük yavaş yavaş azaltılarak motorun devir sayısının artması sağlanır. Her adımda; devir sayısı, motor torku gibi motorun istenen karakteristikleri ölçülür. Her hızdaki ölçüm yapılırken motorun kararlı duruma gelene kadar beklenmesi gerekir. Bu süre ortalama 1 dakika sürmektedir. Bir test prosesi bu şekilde tamamlanır ve belirli bir gaz kolu kelebek açıklığı karşısında en düşük devirden en yüksek devire kadar motor karakteristikleri ölçülmüş olur. Farklı gaz kolu kelebek açıklıkları için yeni test prosesi istenirse testler yinelenir.

Motor testleri sonunda ölçülen bu değerler kullanılarak efektif güç, ortalama efektif basınç, efektif özgül yakıt tüketimi, volümetrik verim gibi parametreler hesaplanır. Ölçülen ve hesaplanan bu parametrelerin, devir sayısı, hava fazlalık katsayısı, gaz kolu kelebek açıklığı ve sıkıştırma oranı gibi parametrelere göre değişimleri performans eğrileri çıkarılarak incelenir.

2.1.2 Motor Teknolojisi Geliştirme Testleri

Günümüzde motorların geliştirilme çalışmaları halen devam etmektedir. Motor performansına etki eden sıkıştırma oranı, ateşleme avansı, hava/yakıt oranı gibi teknik özellikler bulunurken, herhangi bir teknik özellik değiştirilmeden ortam basıncı, sıcaklığı veya alternatif yakıt kullanımları gibi performansa etki eden özellikler de bulunmaktadır. Örneğin

her sıkıştırma oranında yükleme ayarlanarak motorun devir sayısının sabit kalması sağlanır. Her adımda gerekli büyüklükler ölçülür. Elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ile sıkıştırma oranının motorun performansını nasıl etkilediği ve en uygun sıkıştırma oranının ne seçilmesi gerektiği belirlenebilir. Bir başka örnek olarak ya, yakıt teknolojilerinin gelişimi ile verilebilir. Benzin yakıtına ilave edilebilecek gaz veya sıvı fazdaki herhangi bir alternatif yakıtın motor performansını iyileştirdiği görülebilmektedir.

2.2 Motor Test Dinamometreleri ve Ölçüm Kontrol Elemanları

Motor performans test uygulamalarında genel olarak motorun belirli özellikleri ölçülmekte ve ölçümlerden yola çıkılarak başka özellikler hesaplanmaktadır.

Motor testlerinde performans ölçümlerinin başlıca test elemanı motor test dinamometreleridir. Motor test dinamometreleri motorun frenlenmesini ve frenlemenin oluşturacağı yükleme şartlarına göre motor torkunu ölçmektedir. Aynı zamanda motorun tekil olarak kontrolünün sağlanmasına ve istenilen devirde çalışmasına yardımcı olan dinamometreler, su freni ve elektrik dinamometreleri olarak ikiye ayrılmaktadır.

Bunun yanında testlerde, özgül yakıt tüketiminin belirlenmesi için kullanılan sıvı ve gaz yakıt debimetreleri kullanılmaktadır. Kullanılan debimetreler ile belirlenen ana yakıt veya alternatif yakıtın debisi ve güç parametresi kullanılarak özgül yakıt tüketimi hesaplanmaktadır. Benzer bir ölçüm aleti olarak emme hattına entegre bir hacimsel ölçüm debimetresi daha bulunmaktadır. Motorun hava dolgusunu hangi oranda aldığına ana göstergesi olan volümetrik verim hesabında bu debimetre kullanılmaktadır.

Motorun emme havası, yakıt, soğutma suyu ve ortam havası sıcaklık ve basınçlarını ölçen sıcaklık sensörleri de genel olarak bu sistemlere dahildir.

Bütün ölçüm sonuçları, kontrol ünitesinde işlenerek, dış bilgisayarda bulunan kumanda ara yüzünden takip edilmekte ve kayıt altına alınmaktadır.

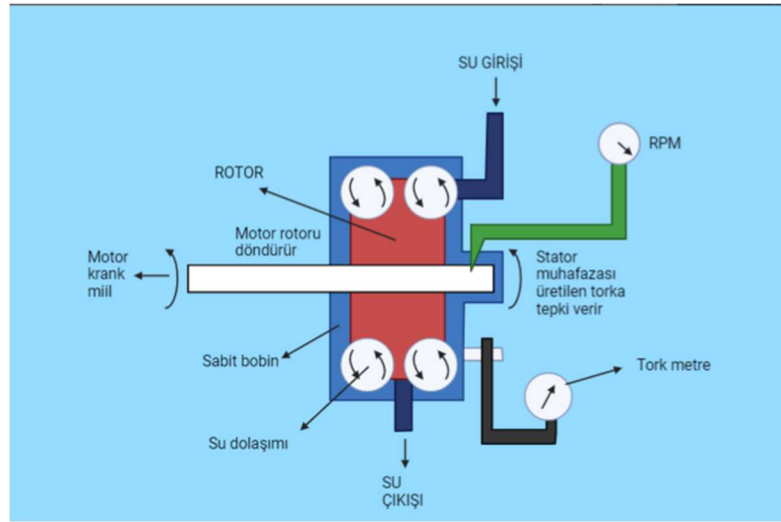
2.2.1 Su Frenli Motor Testi

Motor testi için yaygın ve eski yöntemlerden biri olan su frenli (hidrolik fren) motor testidir, su darbeleri kullanılarak motor yüklenir ve motor döndürme momenti ölçümü gerçekleştirilir.

Motor kapasitesine bağlı olarak kullanılan birçok tipte su frenli motor testleri bulunmaktadır. Ancak temelde kullanılan prensip suyun hareketi ile ölçüm yapmaktır. Krank milinin çıkış noktasına kanatlı bir rotor bağlanarak, yataklardan oluşan bir stator içerisinde

dönme hareketi oluşturmaktadır. Burada rotor ve statorun arasında su bulunmaktadır, su hem hareketi iletmekte hem de ısı emilimi yapmaktadır. Motor milinden elde edilen dönme hareketi rotoru döndürmeye başladıktan sonra statorunda bulunan su kanallarının içerisinde su girdaplarının ve su darbelerinin oluşmasıyla, statorunda da bir dönme hareketi oluşmaktadır. Statora bağlı tork metre bu hareketin oluşturduğu dönme momentini ölçmektedir. Bu şekilde motorun dönme momenti ölçülmüş olmaktadır.

Su frenli motor testleri ile yüksek devirlerde ve hassas ölçümler yapılamamakta ve yoğun bir su tesisatına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemlerde su kaçaklarına bağlı olarak motor ve elemanlarında paslanmalar olabilmektedir. Şekil 1.'de bir su frenli motor test sistemi şeması gösterilmiştir.



Şekil 1. Bir Su frenli motor test sistemi şeması [1]

2.2.2 Elektrikli Motor Test Dinamometresi

Motor performans testlerinin en yeni versiyonu olan bu yöntemde elektrikli dinamometre kullanılarak yüksek devirlere çıkılabilmekte ve daha hassas ölçümler alınabilmektedir. Bu yöntemde motorun frenlenmesi elektrik enerjisi ile sağlanmaktadır. Motorda oluşturulan frenleme işlemi yine motor krank mili çıkışına yerleştirilmiş rotor ve etrafında çevrili stator ile yapılmaktadır. Stator, sistemde bulunan dengeleme elemanına bağlı olacak şekilde tasarlanmıştır. Krank mili ile beraber rotorun dönmesi esnasında oluşan radyal hareketin bir sonucu olarak rotor ve stator arasında elektromotor kuvveti oluşur. Bir elektronik bilgisi olarak elektromotor kuvveti, elektriksel olmayan bir kaynak tarafından üretilen elektriksel eylem olarak tanımlanmaktadır. Yani bir nevi hareket enerjisinin elektrik enerjisine

dönüşümüdür. Bu kuvvet rotor hareketinin radyal doğrultusunda statorun da dönmeye zorlanmasını sağlamaktadır. Bu hareketin bir sonucu olarak statorda oluşacak olan moment aynı zamanda motor milinde oluşan döndürme momentine eşittir. Statordaki bu moment dengelendiğinde ve statordaki moment ölçümü gerçekleştiğinde nihai olarak motorun döndürme momenti ölçülmüş olmaktadır. Dengelemenin sağlanabilmesi için stator, iki ucundan yataklanır ve serbest hareket etmesi sağlanır. Statora etki eden moment, bir ucu moment koluna bağlı ve diğer ucu yere sabit olarak tutturulmuş bir yaylı terazi ve moment koluna asılan ağırlıklar tarafından dengelenir. Sistemde yükleme tamamen bilgisayar kontrollü olarak yapılmaktadır. Motor çalıştırıldığında ölçülen torkun artması için motor devri arttırılmakta bu ise dinamometrenin frenlemeyi azaltmasıyla olmaktadır. Yani dinamometre hem motorun devir kontrolü ve yük seviyesini kontrol etmekte hem de bu esnada tork ölçümünü gerçekleştirmektedir. Şekil 2’de elektrikli bir motor test dinamometresi gösterilmiştir.



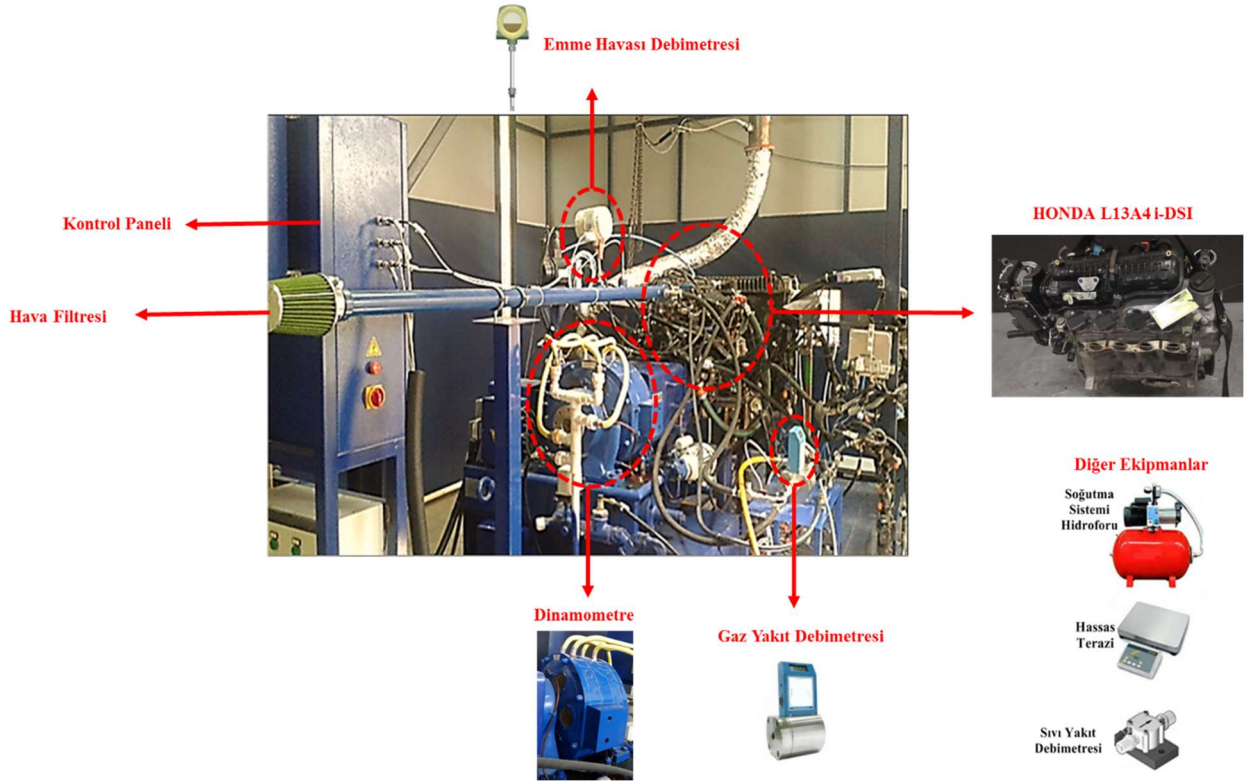
Şekil 2. Elektrikli motor test dinamometresi

3. Test Dinamometresi Özellikleri ve Testin Yapılışı

Test dinamometresinin özellikleri:

Motor testi, Tuzeks firmasına ait TUD100 modeli olan Eddy Current Dinamometre cihazı ile yapılmaktadır. Kullanılan dinamometre sadece akademik amaçlar için değil ticari amaçlar için, bütün motor tiplerinde test için kullanılabilir durumdadır. Ayrıca; doğrudan ve çok hassas frenleme kuvveti ölçümü, yüksek hızlı akım kontrolü sayesinde hızlı reaksiyon verebilme yeteneği, elektriksel sürtünmesiz yapısı dolayısıyla uzun ömürlü yapı, tekrarlanabilir ölçümler alabilen stabil yapı, her iki yönde çalışabilmesi, düşük ataletli rotoru ile birçok test prosedürünü desteklemesi, geniş çap ve yüksek açısız hız sebebiyle düşük devirlerde yüksek

moment üretebilmesi, nikel kaplamalı soğutma kanalları sebebiyle düşük kireçlenme oranı, uzun ömürlü rulman ve yatakları özelliklerine sahiptir. Dinamometre maksimum 100kW güç ölçümü, 500Nm tork ölçümü yapabilmekte ve 3000Nm frenleme torku oluşturabilmektedir. Test sistemi şeması ve resmi Şekil 3’de gösterilmiştir.



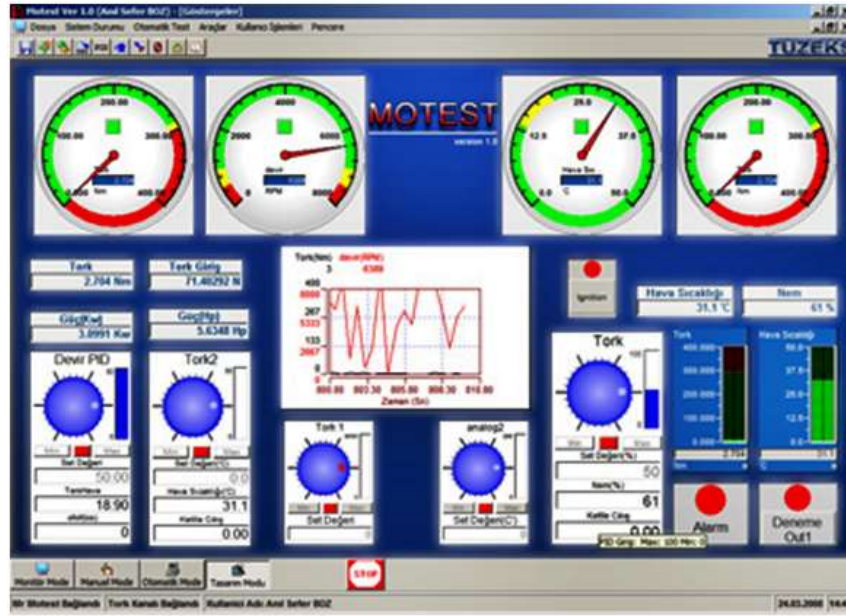
Şekil 3. Motor test sistemi fotoğrafı ve şeması

Dinamometre test esnasında çok yüksek sıcaklıklara kadar ısınmaktadır. Bu nedenle harici bir hidrofor sistemi kuruludur. Bu sistem ile ideal çalışma şartları sağlanarak hem test dinamometresinin uzun ömürlü kullanımı sağlanmakta hem de yataklarda kullanılan yağlama yağının viskoz özelliklerinin korunması sağlanmaktadır.

Ayrıca test dinamometresi ve test motoru aksamaları üzerinde birçok debimetre ve sıcaklık sensörleri bulunmaktadır.

Kumanda bilgisayarına bilgi akışının sağlanması ve motorun şartlandırılması için girilen set değerlerinin işlenerek dinamometreye gönderilmesi için kullanılan kumanda kontrol paneli de sistemin önemli bir parçası olarak yerini almaktadır.

Kumanda bilgisayarının kullanımını uygun bir ara yüz ile sağlayan yazılım da yine Tuzeks firmasına ait olan MOTEST yazılımıdır. Bu yazılım sayesinde işlenen parametreler ve set değerleri kolay bir şekilde izlenebilmekte ve kontrol edilebilmektedir. Şekil 4’de MOTEST ara yüzü gösterilmiştir.



Şekil 4 MOTEST ara yüzü

Testlerde, Honda-Jazz 2004 modelinde bulunan Honda L13A4 tipi i-DSI sıralı çift buji ateşlemeli ticari bir motor kullanılmaktadır. Motor özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Test motorunun teknik özellikleri

Motor Modeli:	HONDA L13A4 i-DSI
Silindir Sayısı:	4
Strok Hacmi (V_H) (cc):	1339
Sıkıştırma Oranı:	10.8 : 1
Güç (kW):	63 (5700 d/dk)
Tork (Nm):	119 (2800 d/dk)

Motor testinin yapılışı:

Motor test sistemi çalıştırılmadan önce, gerekli düzeneğin rutin kontrolleri yapılır ve gerekirse motor yağ, su ve yakıt takviyeleri tamamlanır. Sistemde ilk önce dinamometre soğutma sistemi devreye alınır. MOTEST yazılımı üzerinden set edilen değerlere göre motor test sistemi çalıştırılır ve sistemin bir süre set değerlerine gelmesi ve kararlı duruma geçmesi

beklenir. Sistem kararlı duruma geldikten sonra gaz ayarı yapılır ve tam yükte istenilen devirlerdeki ölçüm sonuçları her yarım saniyede bir sisteme kaydedilir. Test tamamlandıktan sonra sistem kontrollü bir şekilde durdurulur ve kayıtlar rapor halinde alınır. Test sonrası ilgili hesaplamalar yapılarak performans eğrileri oluşturulur.

DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

- ✓ Motor testinin yapılışını anlatınız.
- ✓ Motor kayıplarının, motor karakteristikleri üzerine etkilerini araştırınız. (Verim-enerji kaybı ilişkisini şema üzerinde anlatınız.)
- ✓ Tablodaki boşlukları anlatıldığı gibi hesaplayarak doldurunuz.
- ✓ Performans grafiklerini oluşturunuz.
- ✓ Sonuçları ve grafikleri yorumlayınız.

Devir (rpm)	Tork (Nm)	Güç (kW)	Yakıt kütleli debisi (g/s)	Efektif özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	Efektif verim	Ortalama efektif basınç (Pa)	Efektif iş (J)	Yakıt ile birim zamanda giren toplam enerji (kW)	Emme havası debisi (m ³ /h)	Volümetrik verim	Motor Suyu Çıkış Sıcaklığı (°C)	Motor Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Egzoz Sıcaklığı (°C)
1500													
2000													
2800													
3500													

Fiziksel özellikler:

- Benzinin yoğunluğu: $\rho_{\text{benzin}} = 690 \text{ kg/m}^3$
- Benzinin alt ısı değeri (birim kütledeki enerji miktarı) $H_{\text{LHV,benzin}} = 44.3 \text{ MJ/kg}$
- **M_d**: Krank milinden, doğrudan dinamometre ile ölçülen döndürme momentidir. Birimi Nm (Newton-metre) 'dir.
- **w**: Krank milinin açısal hızıdır ve birimi rad/s (radyan/saniye) 'dir.
- **P_e**: Efektif motor gücü olarak tanımlanır. Motor döndürme momenti ve krank mili açısal hızının birer fonksiyonu olan efektif gücün birimi W (Watt) 'dır.
- **m_y**: Motorda kullanılan sıvı veya gaz haldeki yakıtın kütleli debisidir. Birimi g/s (gram/saniye) 'dir.
- **b_e**: Efektif özgül yakıt sarfıyatı, birim zamanda 1kW güç üretmek için motorun harcadığı yakıt miktarıdır. Birimi g/kWh'dir.
- **Q_{giren}**: Yakıt ile birim zamanda silindir içerisine giren toplam enerji miktarıdır. Aynı zamanda yakıtın kütleli debisi ve alt ısı değerinin birer fonksiyonudur. Birimi birimi W (Watt) 'dır.
- **η_e**: Motorun efektif verimidir.
- **V_H**: Üst ölü nokta ile alt ölü nokta arasında kalan strok (süpürme) hacmidir. Silindir sayısı, çapı ve strok mesafesinin (üst ölü nokta ile alt ölü nokta arasındaki mesafe) birer fonksiyonudur. HONDA L13A4 i-DSI motorunda değeri 1339 cm³ 'dür.
- **n**: Motor devri veya hızı ismiyle ifade edilir. Birim zamanda krank milinin kaç tam tur attığının bir ifadesidir, yani devridir. Birimi d/dk (devir/dakika) 'dır.
- **i**: Motorun çevrim oranıdır. Motorun zamanına bağlı olarak değişkenlik gösterir. 4 zamanlı bir motorda çevrim oranı 0.5 olarak alınır. Birimi 1/d (1/devir) 'dir.

- **P_{me}**: Motorun bir çevrim boyunca kazandığı ve kaybettiği basınçların ortalamasıdır. Motorda üretilen net işin hesaplanmasında kullanılır ve motor için önemli bir karşılaştırma parametresidir. Piston işi, yanma olayının başından sonuna kadar, piston üzerinde oluşacak olan ortalama yayılı yük ile hesaplanır, Bu yük ortalama efektif basıncın bir fonksiyonudur.
- **W_e**: Krank milinden alınan net iş çıktısıdır. Birimi J (Joule)' dir.
- **V_a**: Emme hattından geçen hava debisidir. Hacimsel olarak ölçülür ve birimi (m³/h)' dir.
- **η_v**: Volümetrik verim, emme zamanında motora alınan hava miktarının bir göstergesidir. Emme hattından ölçülen havanın hacimsel debisi ve strok hacminin birer fonksiyonudur.

Efektif motor gücü:

$$P_e = M_d \cdot \omega$$

Efektif özgül yakıt tüketimi:

$$b_e = \frac{\dot{m}_y}{P_e}$$

Efektif verim:

$$\eta_e = \frac{P_e}{Q_{giren}} = \frac{P_e}{H_{LHV} \cdot \dot{m}_y}$$

Ortalama efektif basınç:

$$p_{me} = \frac{P_e}{V_H \cdot \frac{n}{60} \cdot i}$$

Efektif iş:

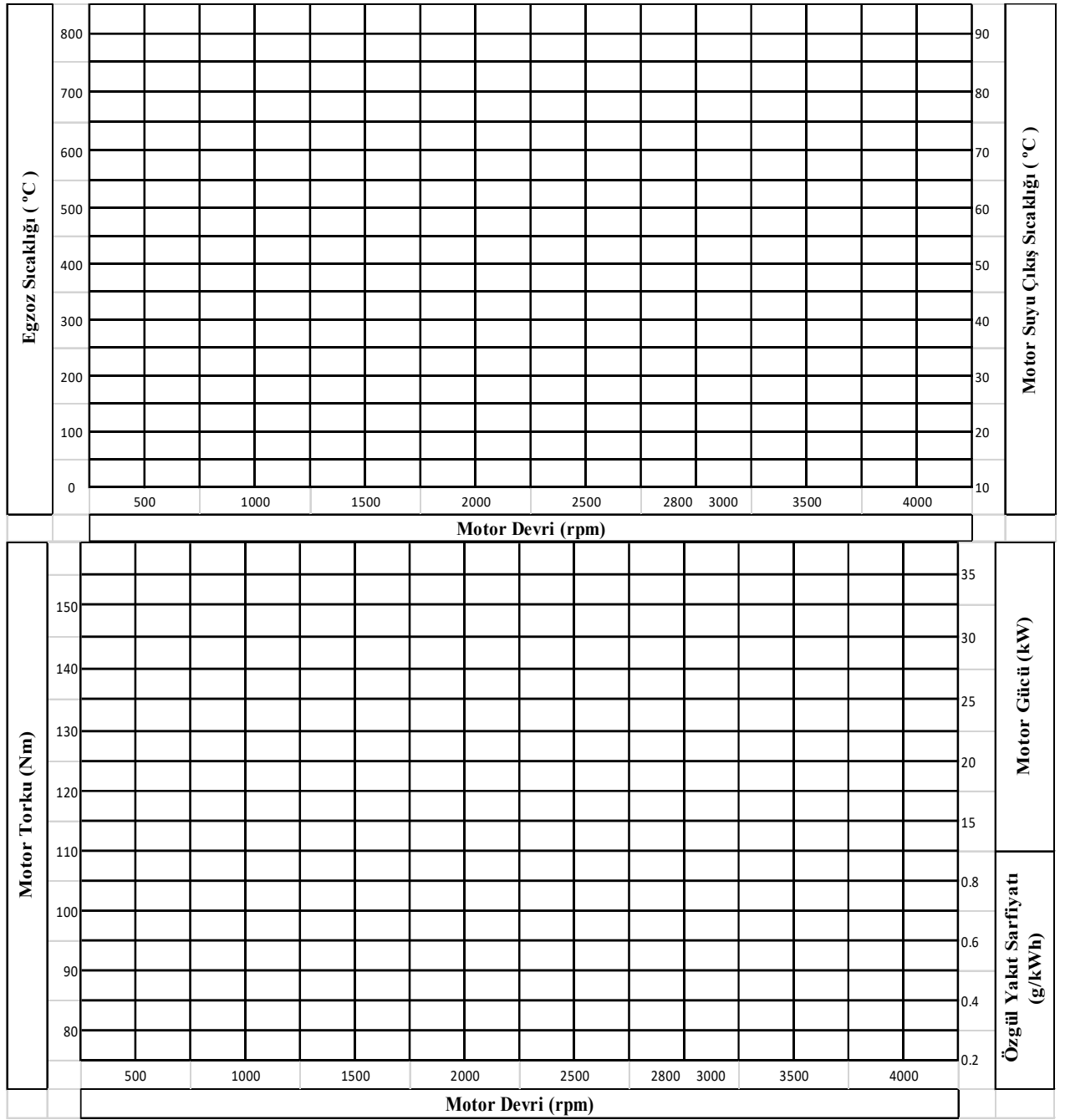
$$W_e = 2 \cdot \pi \cdot M_d = p_{me} \cdot V_H \cdot i$$

Yakıt ile birim zamanda giren toplam enerji:

$$Q_{giren} = H_{LHV} \cdot \dot{m}_y$$

Volümetrik verim:

$$\eta_v = \frac{V_a}{V_H \cdot \frac{n}{60} \cdot i}$$



REFERANSLAR

- [1] https://tr.wikipedia.org/wiki/Su_freni
- [2] Basshuysen, R., V., Schaefer, F., Internal Combustion Engine Handbook, 2nd English Edition, 2016.
- [3] Ferguson, C., Kirkpatrick, A., T., Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences, Wiley; 3rd edition, 2015.
- [4] Heywood, J. B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill College, 1988.
- [5] Pulkrabek, W. W., Engineering Fundamentals of The Internal Combustion Engine, Pearson Prentice Hall, 2004.
- [6] Stone, R., Introduction to Internal Combustion Engines, Macmillan Publishers Limite: 3rd edition, 1999.
- [7] Sürmen, A., Motor Termodinamiği, Alfa Aktüel: 3. Basım, 2019.
- [8] Yaşar, H., İçten Yanmalı Motorlar, Güven Kitabevi: 1. Basım, 2016.

2.9.Eklemeli İmalat Deneyi

EKLEMELİ İMALAT DENEYİ

Eklemeli imalat işlemi genel anlamda nesnelerin katman katman üretilmesi işlemidir. Bu yöntemle üretim bir önceki katman üzerine bir sonraki katmanın eklenmesi nedeniyle katmanlı üretim de denilmektedir.

Eklemeli imalat yönteminin sahip olduğu boyutsal hassasiyet (mikron seviyede boyutsal hassasiyet mümkündür), atık miktarının az olması, az alet gerektirmesi, üstün mekanik özellikler ve nispeten hızlı üretim nedeniyle ilgi çekici üretim yöntemlerinden biridir.

Eklemeli imalat 1980'li yıllarda ortaya çıkmıştır. Özellikle 2000'li yıllardan sonra imalat sektöründe adını sıkça söz ettiren üretim yöntemlerinden birisi haline gelmiştir. Bu yöntem ilk olarak ultraviyole ışın (UV) teknolojisi ile nesnelerin üretilmesi ile ortaya çıkmıştır. Yöntemde içerisinde farklı uygulama prensipleri mevcuttur.

Geleneksel tekniklerle prototip oluşturmak için genellikle birkaç farklı üretim tekniğine ve farklı becerilere sahip kişilere ihtiyaç varken, eklemeli üretim ile doğrudan CAD dosyası üzerinden prototip üretimi mümkün hale gelmektedir. Eklemeli üretim ilk olarak 1980'li yıllarda, ultraviyole ışığa duyarlı sıvı polimerin bir lazer kullanılarak ince tabakalar halinde katılaşması esasına dayanan stereolitografi yöntemi ile ortaya çıkmıştır. Eklemeli üretim, sürecin başlarında sınırlı sayıda malzemenin kullanılabilmesi, üretilen numunelerde oluşan iç boşluklar, basım hataları, moleküllerin yönelim kaybı, yüzey kalitesinin düşüklüğü gibi sebeplerden dolayı çok fazla tercih edilmemiştir. Ancak ilerleyen zamanlarda, artan malzeme çeşitliliği, iç boşlukların giderilmesi, basım hatalarının düzeltilmesi ve daha kaliteli yüzeylerin elde edilebilmesi gibi gelişmeler neticesinde eklemeli üretim temel bir üretim yöntemi haline gelmiştir ve daha fazla uygulama alanı bulmuştur.

Eklemeli imalat yöntemi ile numunelerin üretilmesi işleminde, üretilecek parçanın ilk olarak teknik çizimleri ve ölçüleri belirlenir ve üç boyutlu bir çizim programı ile katı modeli oluşturularak oluşturulan çizim STL formatında kaydedilir ve katmanlara ayırma programına yüklenir ve katmanlara ayırma işleminden sonra üç boyutlu yazıcının (3D yazıcı) üretici başlığının takip edeceği koordinatlar belirlenir. Aşağıda bir numunenin eklemeli imalat işleminde 3D yazıcıda üretilmesinin basamakları verilmiştir:

1. Ölçülerin belirlenmesi ve görünüşlerin çıkarılması
2. Üç boyutlu çizim aracı vasıtasıyla numunenin üç boyutlu modelinin üretilmesi
3. Çizim dosyasının STL. formatında kaydedilmesi
4. Dilimlere programında STL. formatındaki dosyanın açılması
5. Katmanların dilimlenmesi ve üretim kodlarının (G kodları) oluşturulması

Eklemeli imalat ile parçaların üretilmesinde; üretilcek numunelerin malzeme türü, üretimin süresi, numune sayısı, numunenin boyutları gibi birçok parametre dikkate alınmalıdır. Bu yöntemin birçok uygulanma biçimi vardır ve bu uygulamalardan tercih yapılarak üretime karar verilirken bu kriterler göz önüne alınmalıdır. Genel olarak eklemeli imalat yöntemlerini altı grupta sınıflandırmak mümkündür. Bunlar;

1. Malzeme ekstrüzyonu (material extrusion)
2. Fotopolimerizasyon (photopolimerization)
3. Malzeme püskürtme (material jetting)
4. Toz yatağı füzyonu (powder bed fusion)
5. Bağlayıcı püskürtme (binder jetting)
6. Tabaka laminasyonu (sheet lamination)

Bu ders kapsamında malzeme ekstrüzyonu prensibi ile 3D yazıcıda üretim gerçekleştirilecektir. Malzeme ekstrüzyonu yönteminde nozul adı verilen sıcak bir üretim başlığından genellikle termoplastik polimerler ısıtılır, dilimleme programına üretici başlığının hareket edeceği koordinatların belirlenmesi ile, ardından polimerin katmanı oluşturmak amacıyla serimi gerçekleştirilir.

Malzeme ekstrüzyonu yöntemi ile numunelerin üretiminde kullanılan 3D yazıcı temel olarak; üretim başlığı (nozul), üretim tablası ve ana karttan oluşur. Yöntem ile üretilcek numuneler daha akışkan bir hal alması amacıyla nozul yaklaşık olarak polimerin erime sıcaklığına anakart vasıtasıyla ısıtılır. Numunelerin üretim sırasında bulunduğu yerden hareketini önlemek ve sabitlemek amacıyla tabla polimer türüne bağlı olarak 60-70 °C' ye kadar ısıtılır. Yöntemde genellikle; Polilaktik asit (PLA), krilonitril bütadiyen stiren (ABS), Termoplastik poliüretan (TPU) gibi mühendislik polimerleri kullanılır. Kullanılacak polimerin türüne bağlı olarak nozul

220 ile 280 °C'ye kadar ısıtılır (örneğin: PLA ile numune üretiminde nozul sıcaklığı: 220°C, tabla sıcaklığı 60°C'dir).

3D yazıcıda numuneler üretilirken numune içerisindeki boşluklara eriyik polimerin akmasını önlemek amacıyla destek polimerler biriktirilir. Bu destek polimerler suda eriyen polivinilalkol (PVA) gibi özel destek polimerlerinden olabileceği gibi numunenin üretiminde kullanılan ve esas gövde de kullanılan polimerin kendisi de olabilir.

Eklemeli imalat teknolojisinde bilinmesi gereken bazı terimler vardır. Bunlar; dolgu oranı, dolgu deseni, katman kalınlığı, üretim yönü ve yazdırma hızıdır.

- Dolgu oranı: Her katmandaki polimerin doldurduğu miktarın, katmanın hacmine oranıdır.
- Dolgu deseni: Katman oluşturulurken yazıcı başlığının takip ettiği desendir (ızgara, çizgi, üçgen, altıgen gibi).
- Katman kalınlığı: Üretilcek numunenin her bir katmandaki yükselme mesafesidir.
- Üretim yönü: Numunenin biriktirilme yönüdür.
- Yazdırma hızı: 3D yazıcı başlığının üretim esnasındaki hızıdır.

Bu laboratuvar dersi kapsamında Utimaker 3 extended marka ve model 3D yazıcı kullanılacaktır. Bu 3D yazıcının üretim başlığında 2 adet nozul bulunmaktadır. Bu nozullardan birisi numunenin esas polimerin katmandaki dolgusunu yaparken diğeri destek malzemenin katmanının dolgusunu gerçekleştirir. Mikron boyutta hassasiyet ile üretim gerçekleştirebilen bu cihaz mühendislik polimerlerinin yanı sıra biyomühendislik ve biyomedikal ürünlerin üretiminde de kullanılmaktadır. Aşağıda bu ders kapsamında kullanılacak olan cihazın görüntüsü bulunmaktadır (Şekil 1).

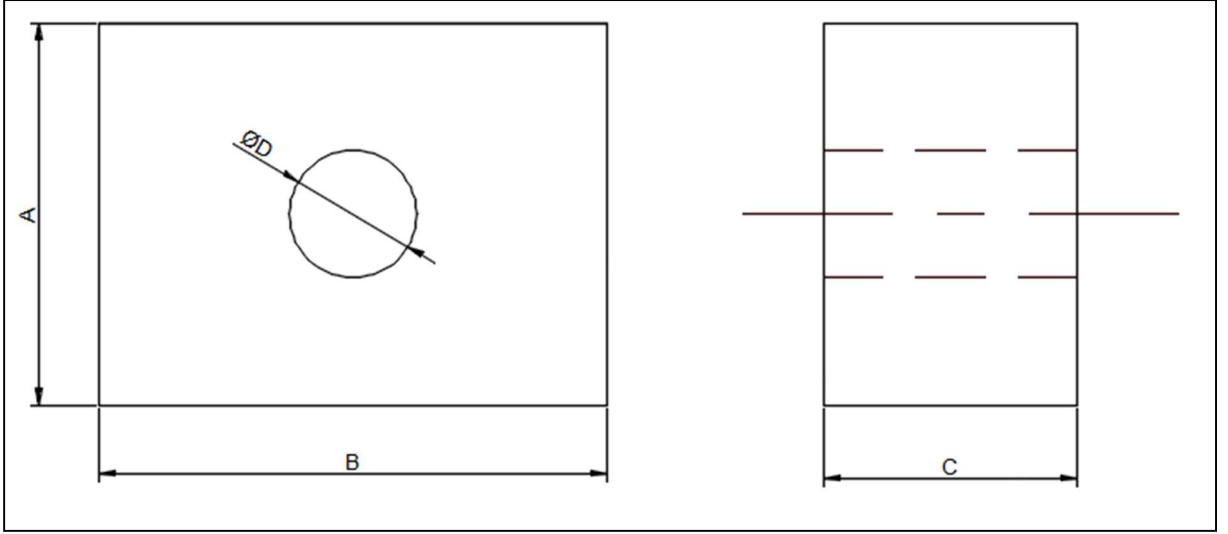


Şekil 1. Ultimaker 3 extended marka ve model 3D yazıcı

Genellikle ticari 3D yazıcıların hepsinin kendilerine özel dilimlere programı bulunur. Ultimaker markasının dilimleme programı ise Ultimaker Cura'dır. Kullanıcılar bu dilimleme programını kullanarak üretimi gerçekleştirirler. Söz konusu üretim şu alt basamaklardan oluşur:

1. Ölçülerin belirlenmesi
2. Katı modelin oluşturulması
3. STL. formatında kayıt
4. Çizimin Ultimaker Cura programında açılması
5. Ultimaker Cura programında (nozul sıcaklığı: 220 ve tabla sıcaklığı 60 olacak şekilde) dilimleme işlemi

Deney kapsamında istenilenler:



Numune ölçüleri aşağıdaki gibidir:

A ölçüsü: Öğrenci numarası son iki hanesinin 2 katı

B ölçüsü: Öğrenci numarası son iki hanesinin 4 katı

C ölçüsü: Öğrenci numarası son iki hanesinin 10 katı

D ölçüsü: Öğrenci numarası son iki hanesinin 1/2 katı

1. Dikdörtgen prizması şeklindeki parçayı çizip dilimlemesi gerekmektedir. (A x B boyutları tabanda olacak biçimde , 3D çizim programında çizip ve Ultimaker Cura dilimleme programından alınmış ekran görüntüsü yüklemelisiniz.)

- 81

Ekler

Ek-1. Deney Raporu Kapak Sayfası Örneği

**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

MAKİNA LABORATUVARI 1

..... **DENEY RAPORU**

Öğrenci No :

Adı-Soyadı :

Deney Grubu :

Deney Tarihi :

Teslim Tarihi :

Notu :