

DENEY 1

DENEY TASARIMI

1 GİRİŞ

Mühendisler, meslek hayatlarında sıklıkla mevcut teorik modellerin davranışlarını tam olarak öngöremediği karmaşık sistemlerle karşılaşmaktadır. Bu tür "kara kutu" sistemleri anlamlandırmak, süreçleri tanımlamak ve sistem davranışını belirlemek için yalnızca teorik bilgi yeterli olmadığından deneysel yöntemlere başvurulması zorunludur. Ancak, bir sistemi etkili bir şekilde karakterize etmek için rastgele ölçümler almak veya yapılandırılmamış testler uygulamak yerine, sağlıklı bir Deney Tasarımı (DT) yönteminin benimsenmesi gerekir. Bu yaklaşımın temel amacı, veri toplama sürecinde harcanan zaman ve kaynakları minimize ederken, sistemin performansına dair elde edilen bilgiyi maksimize etmektir. Bu süreç, muğlak problem ifadelerini hassas istatistiksel sorgulara dönüştüren kavramsal bir tasarımı gerektirir ve yapılandırılmamış testlerin gözden kaçırabileceği karmaşık değişken ilişkilerinin tespit edilmesine olanak tanır.

Herhangi bir deneysel tasarımın temeli, süreci belirli girdileri ve çıktıları olan bir yapı olarak ele alan Sistem Tanımlama yaklaşımıdır. Bu çerçevede değişkenler, deneyi yapılandırmak adına üç temel kategoride sınıflandırılır. İlk kategori, mühendisin bir değişim gözlemlemek amacıyla bilinçli olarak manipüle ettiği ve genellikle belirli seviyelere (düşük ve yüksek gibi) ayarladığı Kontrol Edilebilir Faktörlerden (Girdiler) oluşur. İkinci kategori, termal iletkenlik veya titreşim genliği gibi sistemin davranışını değerlendirmek için ölçülen performans metriklerini içeren Tepki Değişkenleridir (Çıktılar). Son olarak sistem, nem veya ortam titreşimi gibi süreci etkileyen ancak kolayca düzenlenemeyen, genellikle gürültü olarak adlandırılan Kontrol Edilemeyen Faktörleri içerir. Bu değişkenlerin doğru tanımlanması, gerçek süreç değişimleri (sinyal) ile rastgele hataların (gürültü) birbirinden ayırt edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Deneyselde sıkça başvuru alan ancak matematiksel olarak verimsiz ve yanıltıcı olan yaygın bir yöntem, her defada tek etkileşim (HDTE). Bu yöntem, diğer tüm faktörleri sabit tutarken yalnızca tek bir faktörün değiştirilip sonucun gözlemlenmesine dayanır. Sezgisel olarak basit görünse de HDTE, bir değişkenin etkisinin başka bir değişkenin seviyesine bağlı olduğu durumları, yani etkileşimleri tespit edemediği için yetersiz kalır. Örneğin, bir malzeme yalnızca sıcaklık yüksek ve basınç düşük olduğunda yalıtım özelliğini kaybediyorsa, basınç ve sıcaklığın ayrı ayrı test edildiği bir HDTE yaklaşımı bu kritik bölgeyi muhtemelen gözden kaçıracaktır. Bu nedenle, sağlam bir DT yaklaşımı, HDTE yerine faktörlerin belirli bir düzende, örneğin -1 (düşük seviye) ve +1 (yüksek seviye) notasyonu ile eş zamanlı olarak değiştirildiği ve karmaşık etkileşimlerin haritalanabildiği bir Tasarım Matrisi kullanır.

Deneysel sonuçların istatistiksel geçerliliğini güvence altına almak için tasarımın Rassallaştırma, Tekrarlama ve Bloklama olmak üzere üç temel ilkeye sıkı sıkıya bağlı olması gerekir.

Rassallaştırma, deney koşullarının standart bir sıra yerine rastgele bir düzende gerçekleştirilmesidir. Bu teknik, makine ısınması veya takım aşınması gibi zamanla değişebilen dış faktörlerin etkilerini dengeleyerek sistematik hataların sonuçları saptırmasını önler.

Tekrarlama, gerçek deneysel hatayı tahmin etmek için tüm deney koşullarının bütünüyle tekrarlanmasını ifade eder. Tekrarlama ilkesini basit bir tekrardan ayırmak hayati önem taşır; tekrar sadece aynı numunenin iki kez ölçülmesidir ve yalnızca ölçüm cihazının tutarlılığını gösterir, oysa Tekrarlama ilkesi, sürecin doğasında var olan varyasyonu yakalamak için deneyin (örneğin yeni bir numune hazırlayarak) tamamen baştan kurulmasını gerektirir.

Bloklama ise, bilinen ancak istenmeyen bozucu faktörleri yönetmek için deneylerin homojen gruplara ayrılmasıdır. Örneğin, bir deneyin farklı günlerde veya farklı hammadde partileriyle yapılması gerekiyorsa, bloklama tekniği bu değişkenliği istatistiksel olarak izole ederek, sonuçlarda gözlemlenen farkların dış etkenlerden değil, kontrol edilebilir faktörlerden kaynaklandığını garanti eder.

DT'nin bu teorik çerçevesi, mühendislik problemlerinin çözümünde belirli bir Deneysel Kapsam tanımlanarak uygulanır. İster bir İHA'nın termal kaplamasının optimize edilmesi, ister bir gıda taşıma sisteminin verimliliğinin artırılması, isterse de bir arazi aracındaki titreşimlerin azaltılması olsun, izlenen süreç tutarlıdır. Mühendis, duruma özgü nozül sıcaklığı veya yay sertliği gibi Kontrol Edilebilir Faktörleri (x) ve Tepki Değişkenlerini (y) seçerek bir DT hedefi belirler. Bu hedef genellikle, sistemin sadece doğrusal davranışlarını değil, doğrusal olmayan tepkilerini veya sistemin en iyi performansı gösterdiği Optimum Çalışma Aralıklarını belirlemeye odaklanır ve etkileşimlerin haritalanmasını gerektiren bir tasarım sunar.

Bu deneyde, kavramsal bir deney düzeneği tasarlamamız gerekmektedir. Basit veri toplama işlemlerinin ötesine geçmeniz; rassallaştırma, tekrarlama ve bloklama ilkelerinin değişkenler arasındaki etkileşimleri tespit etmek için nasıl kullanıldığını göstermeniz beklenmektedir.

2 VAKA ÇALIŞMALARI

Aşağıda verilen vaka çalışmaları, öğrenci kimlik numaranızın son rakamına göre atanmıştır.

Vaka Çalışması 1 (0, 5) - İHA Kaplamasının Isıl Optimizasyonu:

Problem Tanımı: Bir firma, yüksek irtifa İnsansız Hava Aracı (İHA) için özel bir kompozit malzeme geliştirmektedir. Malzemenin ısı iletim özellikleri doğrusal değildir (non-linear) ve çevresel etkileşimlere karşı hassastır. Isıl iletkenliğin (k), dış uçuş koşullarının etkileşimiyle nasıl değiştiğini belirlemeniz gerekmektedir. k değerini sadece oda sıcaklığında ölçmek yetersizdir; süreci belirli bir aralıkta, $[x_1, x_2]$, tanımlamanız gerekmektedir.

Deneysel Kapsam:

- **Çıktı (y):** Isıl iletkenlik.

- **Kontrol Değişkenleri (x):** Yüzey sıcaklığı, hava basıncı ve malzeme kalınlığı gibi en az üç faktörü incelemelisiniz.
- **Deney Tasarım Hedefi:** Basınç ve sıcaklık arasında anlamlı bir etkileşim olup olmadığını belirleyin. (Örn: Malzeme sadece sıcaklık yüksek olduğunda mı yoksa düşük basınçta mı daha kötü yalıtım sağlıyor?)

Vaka Çalışması 2 (1, 6) - Yüksek Verimli Gıda Taşıma Sistemi:

Problem Tanımı: Bir gıda işleme tesisi, hassas paketlenmiş ürünleri taşımak için bir konveyör sistemi kullanmaktadır. Mevcut sistem, değişken sürtünme nedeniyle tutarsız iş hacmine sahip olup ürün hasarına yol açmaktadır. Yönetim, ürün hasarını önlemek için sürtünme katsayısını (μ) minimize ederken, taşıma hızını (v) optimize edecek yeni bir taşıma tasarımı talep etmektedir.

DeneySEL Kapsam:

- **Çıktı (y):** Sürtünme Katsayısı (μ).
- **Kontrol Değişkenleri (x):** Konveyör yüzey dokusu, ürün yükü (ağırlık) ve bant hızı gibi en az üç faktörü incelemelisiniz.
- **Deney Tasarım Hedefi:** Optimum çalışma aralığını belirleyiniz. (Örn: Hızı artırmak, ısı birikimi nedeniyle sürtünmeyi önemli ölçüde artırıyor mu?)

Vaka Çalışması 3 (2, 7) - 3B Yazıcı ile Üretilmiş Havacılık Parçalarının Yapısal Optimizasyonu:

Problem Tanımı: Bir havacılık girişimi, dronlar için hafif braketler üretmek amacıyla Eriyik Yığılma Modelleme (FDM) yöntemini kullanmaktadır. Ancak, basılan parçalar tutarsız mekanik dayanım göstermekte ve teorik modellerin dayanması gerektiğini öngördüğü yükler altında zaman zaman başarısız olmaktadır. Baskı sürecini aşırı yavaşlatmadan kopma akma dayanımını maksimize edecek optimum baskı parametrelerini belirlemelisiniz.

DeneySEL Kapsam:

- **Çıktı (y):** Akma dayanımı.
- **Kontrol Değişkenleri (x):** Katman kalınlığı, nozül sıcaklığı ve doluluk oranı gibi en az üç faktörü incelemelisiniz.
- **Deney Tasarım Hedefi:** Kontrol değişkenlerinin katman yapışması üzerindeki etkisini belirleyin. (Örn: Nozül sıcaklığını artırmak sadece ince katman kalınlıklarında mı dayanımı artırıyor, yoksa kalın katman kalınlıklarında bozunmaya mı neden oluyor?)

Vaka Çalışması 4 (3, 8) - Arazi Aracı Süspansiyonunda Titreşim İzolasyonu:

Problem Tanımı: Bir ATV üreticisi, zorlu arazi kullanımı için yeni bir süspansiyon sistemi tasarlamaktadır. Sürücüler, yüksek hızlı manevralar sırasında şasi üzerinden iletilen yüksek frekanslı titreşimler nedeniyle aşırı yorgunluk rapor etmektedir. Araç stabilitesini korurken

sürücü koltuğuna iletilen dikey ivmeyi minimize edecek bir süspansiyon kurulumu tasarlamamız gerekmektedir.

Deneysel Kapsam:

- **Çıktı (y):** Koltuk tabanındaki dikey ivme (titreşim genliği).
- **Kontrol Değişkenleri (x):** Yay sertliği, amortisör yağı viskozitesi ve lastik basıncı gibi en az üç faktörü incelemelisiniz.
- **Deneysel Tasarım Hedefi:** Doğrusal olmayan sönümlenme tepkisini tanımlayın. (Örn: Yağ viskozitesini artırmanın titreşimi azaltmayı bırakıp, şasiye daha fazla şok iletmeye başladığı bir "kritik nokta" var mı?)

Vaka Çalışması 5 (4, 9) - Tıbbi İmplantlar için Hassas Yüzey İşleme:

Problem Tanımı: Bir biyomedikal mühendislik firması, CNC frezeleme ile titanyum kalça protezleri üretmektedir. Bu uygulamada yüzey kalitesi kritik öneme sahiptir; yüzey çok pürüzlü olursa implant hastanın kalça eklemine aşınmaya neden olur, ancak işleme çok yavaş olursa üretim maliyetleri yükselir. Uygulama için yeterli kalitede bir yüzey pürüzlülüğünü elde ederken imalat hızını maksimize etmek için işleme sürecini karakterize etmelisiniz.

Deneysel Kapsam:

- **Çıktı (y):** Yüzey pürüzlülüğü.
- **Kontrol Değişkenleri (x):** Çakı dönüş hızı (spindle speed, rpm), ilerleme hızı (feed rate) ve kesme derinliği (depth of cut) gibi en az üç faktörü incelemelisiniz.
- **Deneysel Tasarım Hedefi:** Süreç kararlılık haritasını çıkarın. (Örn: Kesme derinliğini artırmak, sadece belirli çakı dönüş hızlarında titreşimleri tetikleyerek kaçınılması gereken bir çalışma aralığı mı oluşturuyor?)

3 DENEY RAPORU

Raporunuzda kesinlikle aşağıdaki yapıyı takip etmelisiniz. Bu yapı, ders sunumunda ele alınan **Sistem Tanımlama** ve **Kestirim Teorisi** kavramlarını yansıtmaktadır.

3.1 Sistem Tanımlama ("Kara Kutu" Modeli)

Test ettiğiniz sistemi tanımlayın:

- **Girdiler (Değişkenler):** Değişkenlerinizi sınıflandırın. Hangileri kontrol edilebilir sabitlerdir? Hangileri manipüle edeceğiniz değişkenlerdir?
- **Çıktılar (Sistem Cevabı):** Performansı değerlendirmek için neyi ölçüyorsunuz?
- **Kontrol Edilemeyen Faktörler (Gürültü):** "Kara Kutu" modelinizde gürültü görevi gören değişkenleri (örn. nem, titreşimler) tanımlayın.

3.2 Deney Tasarım Stratejisi: DT ve HDTE Karşılaştırması

- **Tasarım Matrisi:** Yapacağınız ölçüm setlerini gösteren bir tablo oluşturun. Değişkenleriniz için standart bir notasyon (örn. Düşük (-1), Yüksek (+1) seviyeleri) kullanın.
- **HDTE'den Farkı:** Vaka çalışmanız için HDTE yaklaşımının neden uygun olmadığını açıkça belirtin. HDTE'nin, vaka çalışmanızda bulunan etkileşimleri yakalamada nasıl başarısız olacağını tartışın.

3.3 İstatistiksel İlkelerin Uygulanması

Derste tanımlanan deney tasarımının üç temelini nasıl uygulayacağınızı açıklayın:

- **Rassallaştırma:** Rassallık ilkesini sağlamak için ölçüm sırasını nasıl rastgele hale getireceksiniz? Sistemik hatalardan kaçınmak için bu neden gereklidir?
- **Tekrarlama:** Yineleme (aynı numuneyi iki kez ölçmek) ile tekrarlama (deneyi en baştan kurarak yeniden yapmak) arasındaki farkı belirtin. Deneysel hatayı tahmin etmek için kaç tekrara ihtiyacınız var?
- **Bloklama:** Bozucu faktörleri yönetmek için bloklama ilkesini nasıl uygulayacaksınız? (Örn: Eğer 2. Vakanın deneyleri farklı nem seviyelerine sahip iki ayrı günde yapılırsa, gün faktörü için nasıl bloklama yaparsınız?)

3.4 Deney Düzenegi

- **Şematik Çizim:** Önerdiğiniz deney düzeneginin ayrıntılı bir çizimi.
- **Ölçüm Cihazları:** Kontrol değişkenleriniz (x) ve çıktılarınızı (y) ölçmek için gereken cihazların listesini verin. Neden bu cihazları seçtiğinizi (ölçüm aralığı, hassasiyet, maliyet ve erişilebilirlik) gerekçelendirin.
- **Prosedür:** Bölüm 3.2'de oluşturulan tasarım matrisinin nasıl uygulayacağınızı adım adım açıklayın.

4 KAYNAKÇA

1. J. P. Holman, Experimental Methods for Engineers, Eighth Edition, Mc-Graw Hill, 2012.

DENEY 2

TERMOKUPL KALİBRASYONU

DENEYİN AMACI

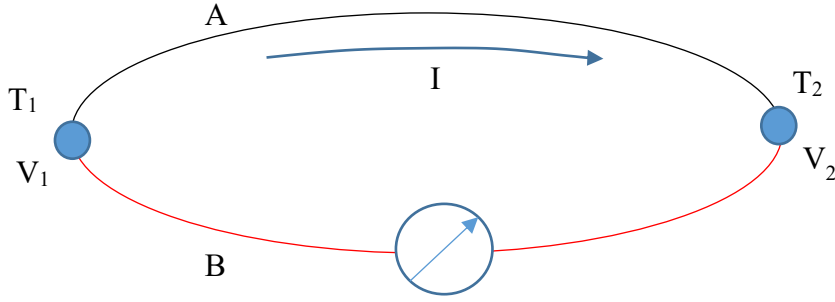
Termokupl kalibrasyon eğrisini ve denklemini çıkarmak.

1. GİRİŞ

Kalibrasyon, belirlenmiş koşullar altında, doğruluğu bilinen bir ölçüm standardını veya sistemini kullanarak diğer test ve ölçüm aletinin doğruluğunun ölçülmesi, sapmalarının belirlenmesi ve belge haline getirilmesi için kullanılan ölçümler dizisidir. Ölçme ve test ekipmanlarının kontrolü ve kalibrasyonu sayesinde üretim ve kontrol esnasında yapılan ölçümlerin uygunluğu güvence altına alınmış olur. Kalibrasyon ile sağlanan bu güvencenin sürekliliği ara ara kalibrasyon yaparak kontrol edilmelidir. Kalibrasyonda amaç kullanılan cihaz veya ekipmanın gerçek değere oranla ne kadar saptığının belirlenmesi ve belgelendirilmesidir. Sonuçta bulunan hata miktarı göz önünde bulundurularak doğru değere ulaşılır. Ya da bulunan hata miktarı kalibrasyonu yapılan cihaz / ekipmanın kullanıldığı prosese yönelik kabul kriterleri ile karşılaştırılarak uygun olup olmadığına karar verilir.

2. TEORİ

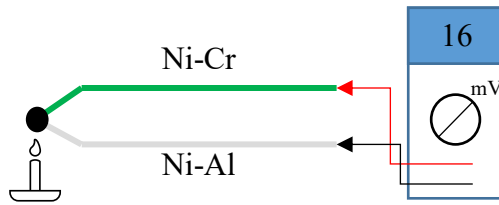
Şekil 1' de görüldüğü üzere, iki farklı A ve B metalinin uçları birleştirilerek kapalı bir devre oluşturulmuştur. Bu durumda iken eğer uçlardan birisi T_1 sıcaklığına çıkarılır ve diğer uç ise daha düşük bir T_2 sıcaklığında bırakılırsa, metal tel üzerinde bir elektrik akımı oluşur [1]. Bu olay termoelektrikte Seebeck etkisi olarak bilinir. Seebeck etkisi, sıcaklık farkının bir potansiyel fark oluşturmasıyla doğrudan elektrik enerjisine dönüşümüdür. Bu akım metallere aynı zamanda T_1 ve T_2 sıcaklıklarına bağlıdır.



Şekil 1. A ve B tellerinden oluşan termoelektrik devre

V_1 gerilimi V_2 geriliminden farklı olduğunda, akım meydana gelir. Burada $T_1 = T_2$ ise, bir akımın oluşmayacağı açıktır.




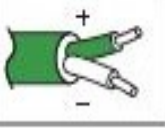
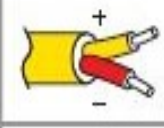

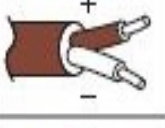
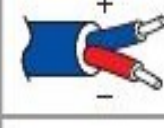
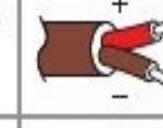
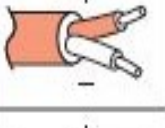

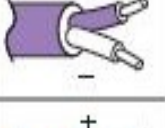

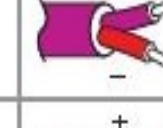



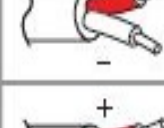

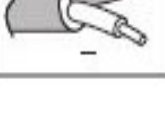
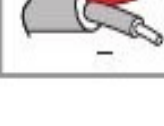
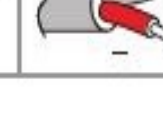
Seebeck etkisi sıcaklığın hassas bir biçimde ölçülmesinde kullanılabilir. K tipi termokuplun artı kutbu Nikel-Krom (Ni-Cr), eksi kutbu ise Nikel-Alüminyum (Ni-Al) olan alaşımları içeren iki farklı telden oluşur. Yeşil kablo artı kutup, beyaz kablo eksi kutuptur. Şekil 2’ de gösterildiği gibi tellerin birleşme noktaları ısıya maruz kaldığında metal uçlar arasında mikrovolt (μV) mertebesinde doğru akım meydana getiren gerilim oluşur. Elde edilen voltaj farkı sıcaklıkla doğru orantılıdır.



Şekil 2. Termokuplın çalışma prensibi

Tablo 1 termokupl tiplerini, kullanılan metal cinslerini ölçüm aralığını ve renk kodlarını göstermektedir.

Tablo 1. Termokupl çeşitleri ve özellikleri

TİP	İLETKEN CİNSİ		SICAKLIK ÖLÇÜM ARALIĞI (°C)	RENK KODLARI		
	(+) Uç	(-) Uç		IEC584-3	ANSI/MS/96.1	DN 43714
J	Fe	Cu-Ni	-210' dan 1200' e			
K	Ni-Cr	Ni-Al	-270' den 1372' e			
T	Cu	Cu-Ni	-270' den 400' e			
N	Ni-Cr-Si	Ni-Cr-Mg	-270' den 1300' e			
E	Ni-Cr	Cu-Ni	-270' den 1000' e			
R	Pt- %13 Rh	Pt	-50' den 1768' e			
S	Pt- %10 Rh	Pt	-50' den 1768' e			
B	Pt- %30 Rh	Pt- %6 Rh	0' dan 1720' ye			

3. TERMOKUPL KALİBRASYONU

Yüksek hassasiyetli kalibrasyonlarda yaygın olarak kullanılan sabit nokta yöntemi su, çinko veya argon gibi maddelerin faz değişim sıcaklıklarının kullanılmasını içerir [2]. Böylece, ölçüm aleti tarafından sağlanan sıcaklık okumaları, kullanılan maddenin faz değişim sıcaklıklarının sabit değerleri ile ilişkilendirir. Sonuç olarak, ölçüm cihazından doğrusal regresyon yoluyla karakteristik bir denklem belirlemek mümkündür. Burada dikkat edilmesi gereken bu denklemin kullanımının yalnızca belirlenen maddenin faz değişim noktalarıyla sınırlanan aralık için tavsiye edilmesidir.

Bu deneyde K tipi termokupl kalibrasyonu, sabit nokta yöntemi ve saf su kullanılarak yapıldı. Saf su kullanımıyla faz değişimi sırasında olabilecek sıcaklık farklılıkları ortadan kaldırıldı. Referans noktası olarak iki sıcaklık dikkate alınmıştır. Bunlar buzlu-su karışımı sıcaklığı (0 °C) ve laboratuvar ortamımızın barometre ile ölçülen basıncına (92,77 kPa) karşılık gelen suyun kaynama sıcaklığıdır (97,429 °C). Termokuplların ölçtüğü sıcaklık değeri ile referans değer arasında fark olduğu bilinmektedir. Bu nedenle termokupllardan okunan sıcaklık değerlerine karşılık gelen referans değerleri lineer regresyon eğrisinden elde edilen denklemle bu deney kapsamında bulunmuştur.

4. DENEYİN YAPILIŞI

1. Termokuplların uçları lehimlenir.
2. Termokuplların açık olan diğer uçları veri kaydedici kasetine bağlanır. Artı uç artı sokete eksi uç eksi sokete gelecek şekilde.
3. Kaset veri kaydediciye takılır.
4. Termokupllar kaynayan suya daldırılır ve veri kaydediciyle sıcaklıklar kaydedilir.
5. Termokupllar buzlu-suya daldırılır ve veri kaydediciyle sıcaklıklar kaydedilir.

5. KALİBRASYON EĞRİSİNİN ÇIKARILMASI

Referans sıcaklık değeriyle termokupldan okunan sıcaklık değerleri arasındaki farkı kaldırmak her bir termokupl için kalibrasyon eğrisi oluşturmakla mümkün olur. Böylece her bir termokupla ait lineer bir denklem elde edilerek termokuplların gerçek sıcaklık değerlerinin okunması sağlanabilir.

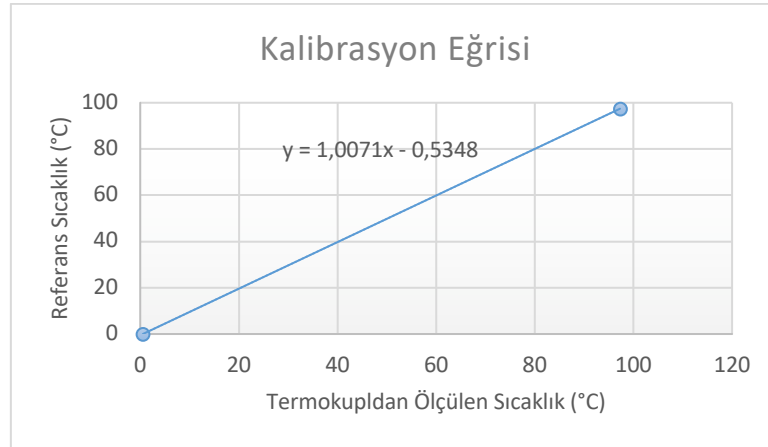
Örnek:

Referans olarak 0 °C' deki buzlu-su karışımına daldıran K tipi termokupldan 0,531 °C sıcaklık değeri okunmuştur. Aynı termokupl referans olarak 92,77 kPa ortam basıncına karşılık gelen 97,429 °C' de kaynayan suya daldırıldığında 97,275 °C sıcaklık değeri okunmuştur.

Tablo 2. Sıcaklık değerleri

Referans Sıcaklık (°C)	Termokupl ile Ölçülen Sıcaklık (°C)
0	0,531
97,429196	97,275

Şekil 3 sıcaklık değerlerinden elde edilen lineer kalibrasyon eğrisini göstermektedir. Referans sıcaklık ve termokupldan okunan sıcaklık değeri arasındaki ilişkiyi ifade eden lineer denklem eğrinin üzerinde verilmiştir. Artık termokuplın ölçtüğü değere karşılık gelen gerçek değer belirlenebilir.



Şekil 3. Kalibrasyon eğrisi

6. DENEY RAPORU

1. Termokupl kalibrasyon yöntemlerini açıklayarak yazınız.

2. Aşağıdaki tabloda deneydeki referans sıcaklıklarına karşılık gelen termokupla ölçülen sıcaklık değerleri verilmiştir. Bu sıcaklıklar için kalibrasyon eğrisini ve denklemini Excel' i kullanarak çıkarınız. Tablodaki boşlukları doldurunuz. (T_r : Referans sıcaklık, T_t : Termokupldan ölçülen sıcaklık, T_k : Kalibrasyon denkleminde elde edilen sıcaklık, E: Kalibrasyon denkleminde elde edilen sıcaklık ve referans sıcaklık arasındaki hata yüzdesi)

	T_g (°C)	T_t (°C)	T_k (°C)	Denklem	E (%)
1	0	0,66			
	97,429196	98,024			
2	0	0,504			
	97,429196	98,045			
3	0	1,234			
	97,429196	97,371			

REFERANSLAR

[1] Allred, D. D., "SCT-93 short course on thermoelectrics: An overview of thermoelectricity", Technical Report, The International Thermoelectric Society, (1993).

[2] J.V. Pearce, V. Montag, D. Lowe, W. Dong, Int. J. Thermophys. (2011). <https://doi.org/10.1007/s10765-010-0892-8>

DENEY 3

KESME HIZININ YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

1. AMAÇ

Bu deneyin amacı; üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğünü belirlemek ve yüzey pürüzlülüğüne etkileyen parametrelerden kesme hızının etkisini incelemektir.

2. TEORİ

İşleme metodu, kesicinin cinsi ve işlenen malzemeye bağlı olarak, işleme sırasında fiziksel, kimyasal ve ısıl faktörlerle, kesen ve kesilen arasındaki mekanik hareketlerin de etkisiyle işlenmiş yüzeylerde, genellikle istenmediği halde tabii olarak bazı izler oluşur. Nominal yüzey çizgisinin altında ve üstünde düzensiz sapmalar meydana getiren bu duruma yüzey pürüzlülüğü denir.

İşlenen yüzeylerin kalitesi işleme performansı üzerinde önemli rol oynar. Kaliteli işlenmiş bir yüzey, yorulma mukavemetini, korozyon direncini ve sürtünme ömrünü önemli derecede iyileştirir. Yüzey pürüzlülüğü ayrıca yüzey sürtünmesine sebep olan temas, aşınma, ısı iletimi, yağ filminin tutulması ve dağıtılması kabiliyeti, kaplama veya direnç ömrü gibi parçaların çeşitli fonksiyonel özelliklerini de etkiler. Bu sebeple istenilen yüzey tamlığı genellikle belirlenir ve ihtiyaç duyulan kaliteye ulaşmak için uygun işlemler seçilir.

Talaşlı imalatla yüzey pürüzlülüğü aşağıdaki faktörlerden etkilenir:

- Takım tezgâhının rijitlik durumu,
- Yataklama sisteminden kaynaklanan hatalar,
- Takım tutucu rijitlik durumu,
- Takım aşınmasının etkileri,
- Takım geometrisi,
- Kesme parametreleri,
- Malzemenin mekanik özellikleri,
- Soğutma sıvısının etkileri.

Kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği gibi kesme operasyonunu kontrol eden faktörler üst seviyede kontrol edilebilir. Buna rağmen takım geometrisi, takım aşınması, talaş yükleri ve talaş oluşumları veya takım ve iş parçasının malzeme özellikleri kontrol edilemeyen özelliklerdir.

Takım tezgâhı titreşimleri, iş malzemesinin yapısındaki hasarlar, takım aşınması veya talaş oluşumunun düzensizlikleri, işleme sırasında yüzeyin bozulmasına neden olurlar.

Yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek ve ilerleme veya kesme hızı gibi işleme parametrelerinin uyumunu değerlendirmek ürün kalitesini yükseltir ve istenilen yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesini sağlar.

Talaşlı işlemede genellikle yüksek kesme hızında daha iyi yüzey kalitesi elde edilir. Ancak yüksek kesme hızı takım körelmesini hızlandırdığı için aynı yüzey kalitesi uzun süre muhafaza edilemez.

Tek ağızlı kesme takımıyla yapılan talaş kaldırma işleminde elde edilen ortalama ideal yüzey pürüzlülüğünün takım uç yarıçapı ve ilerlemesi ile olan ilişkisi aşağıdaki denklemde verilmiştir:

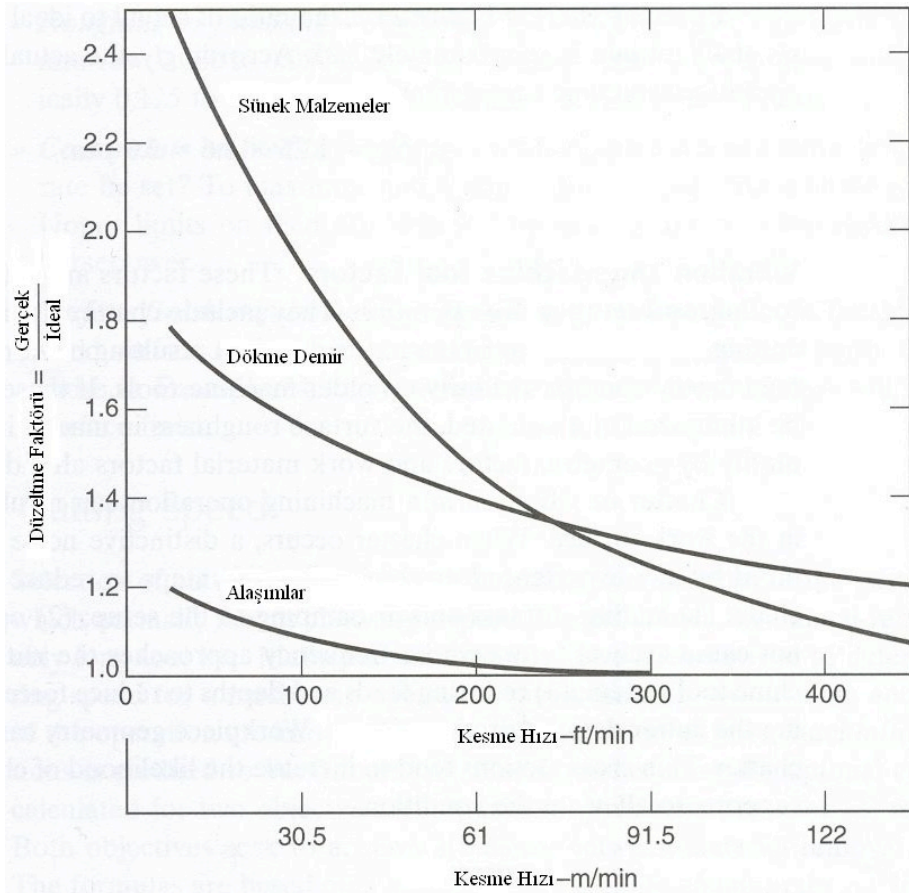
$$R_i = \frac{f^2}{32r}$$

- R_i : İdeal ortalama yüzey pürüzlülüğü, mm
 f : İlerleme, mm/dev
 r : Uç yarıçapı, mm

Yüzey pürüzlülüğüne etki eden faktörlerin etkisiyle oluşan gerçek yüzey ideal yüzeyden daha pürüzlü olur. Bu faktörler göz önünde tutularak ideal ve gerçek yüzey pürüzlülükleri arasında bir düzeltme faktörü geliştirilebilir. Şekil 1'de gerçek yüzey pürüzlülüğü ve ideal yüzey pürüzlülüğü arasındaki düzeltme faktörü gösterilmektedir. İdeal yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak gerçek yüzey pürüzlülüğü aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$R_a = r_{ai} R_i$$

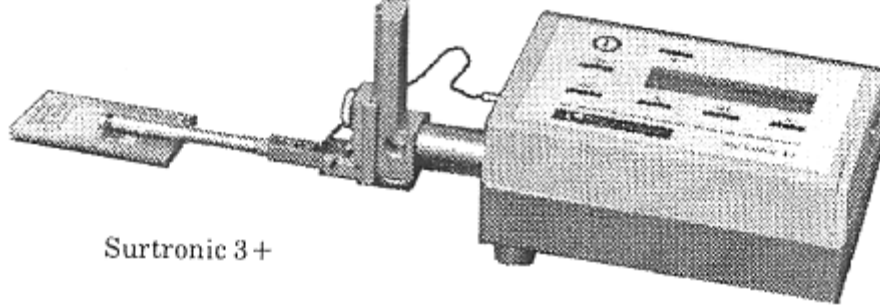
- R_a : Gerçek yüzey pürüzlülüğü
 r_{ai} : Düzeltme faktörü
 R_i : İdeal yüzey pürüzlülüğü



Şekil 1. Yüzey pürüzlülüğü düzeltme faktörü

Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçümü

Deneylerde, Taylor Hubson 3+ Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı (Şekil 2) yardımıyla yüzeyde oluşan çukurcuklar ve tepcikler ölçülecektir.



Şekil 2. Taylor Hubson 3+ yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

Bir yüzey profilinin pürüzlülük hesapları yapılırken, yüzeyin üstünde ve altında kalan alanları eşit şekilde kesen ve ortalama çizgisi olarak adlandırılan referans çizgisinden yararlanılır (Şekil 3). Bu çizgi matematiksel olarak yüzey profilinin ağırlık merkezi şeklinde de ifade edilebilir (L_c).



Şekil 3. Ölçüm ve örnekleme uzunluğu

Örnekleme uzunluğu yüzeyin pürüzlülük karakteristiğini bulmada öncelikli olarak seçilen parametredir. n adet örnekleme uzunluğunun bir araya gelmesi ile L_n şeklinde ölçüm uzunluğu oluşmaktadır (Şekil 3).

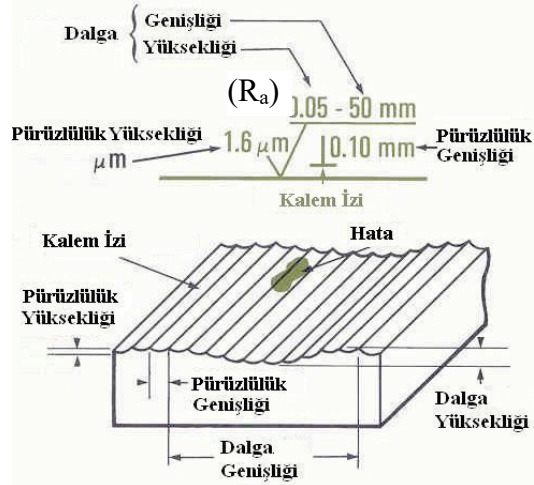
Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (R_a):

Ortalama yüzey pürüzlülüğü, ortalama çizgisinden ölçülen yüksekli değişimlerinin aritmetik ortalamasıdır.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$

R_a değerleri deneyde kullanılacak cihaz tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır.

Yüzey pürüzlülüğü ve karakteristiğini göstermekte kullanılan semboller Şekil 4'te gösterilmiştir.



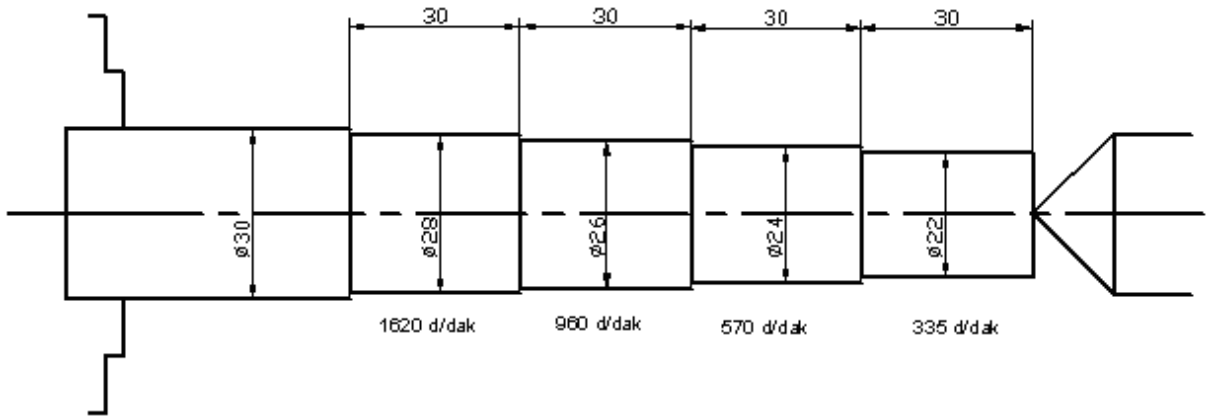
Şekil 4: Yüzey karakteristiği ve sembolleri

3. CİHAZ VE GEREÇLER

Bu deneyde, G.Ü. Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Takım Tezgâhları Laboratuvarlarındaki torna tezgâhı kullanılacaktır.

4. YÖNTEM

1. Tornalama için Ç1010 , Ç1020 veya Ç1030 yuvarlak malzeme temin edilir.
2. Kesici ağız olarak 0.4'lük radyüse sahip sert metal bir kesici uç seçilir ve deney boyunca değiştirilmez.
3. Parça ayna-punta arasına bağlanır ve 30 mm'lik mesafelerle, sırası ile yaklaşık 20, 40, 80 ve 140 m/dak kesme hızlarında tornalanır (Şekil 5).



Şekil 5. Deney numunesinin tornalanması

4. Tornalanması yapılan parçada, yüzey pürüzlülük ölçme cihazı ile her bir çapta en az 3 adet ölçüm alınır.
5. Parçaların yüzey pürüzlülükleri hesaplanır.

5. RAPOR VE DEĞERLENDİRME

Torna tezgâhında işlenmiş parçaların;

1. İşlenen çaplar yukarıda verilen ölçülerden küçük de olsa farklı olduğundan, her bir çapın gerçek değeri ve tezgâhın çalışma hızından faydalanarak elde edilen kesme hızı değerlerinin hesaplanması.
2. Yüzey pürüzlülük cihazıyla ölçülen ve hesaplar sonucunda bulunan yüzey pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması ve yorumlanması.
3. Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen kesme hızı parametresinin karşılaştırılması ve yorumlanması

6. KAYNAKLAR

1. Akkurt, M., “Makina Elemanları Cilt II”, Birsen Yayınevi, İstanbul (2000).
2. Akkurt, M., “Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları”, Birsen Yayınevi, İstanbul (1998).
3. Güllü, A., “Silindirik Taşlamada İstenen Yüzey Pürüzlülüğünü Elde Etmek İçin Taşlama Parametrelerinin Bilgisayar Yardımıyla Optimizasyonu”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Makine Eğitim Bölümü, Ankara, (1995).
4. Huynh, V., M., Fan, Y., “Surface-Texture Measurement and Characterization With Applications To Machine-Tool Monitoring”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 7, 2-10,(1992).
5. Jang, D.Y., Choi, Y.G., Kim, H.G., Hsiao, A., “Study of The Corelation Between Surface Roughness and Cutting Vibrations To Develop An Online Roughness Measuring Tecnique _n Hard Turning”, International Journal of Machine Tools Manufacture, 36(4), 453-464(1996).
6. Özses, B., “Bilgisayar Sayısal Denetimli Takım Tezgahlarında Değişik İşleme Koşullarının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi”. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, (2002).
7. Onwubolu, G., C., “Surface Roughness Prediction Model in Machining of Carbon Steel by PVD Coated Cutting Tools” American Journal of Applied Sciences, 2 (6), 1109-1112 (2005).
8. Groover, M., P., “Fundamentals of Modern Manufacturing- Materials, Processes and Systems”, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 220-639(1996).

DENEY 4

MALZEMELERDE ELASTİSİTE VE KAYMA ELASTİSİTE MODÜLLERİNİN EĞME VE BURULMA TESTLERİ İLE BELİRLENMESİ

1. AMAÇ

Eğme deneyinde amaç bir kirişte kiriş ile uygulanan yük, kiriş kalınlığı, kiriş genişliği ve kiriş uzunluğu ile sehim arasındaki bağıntıların incelenmesi ve çelik malzemenin elastisite modülünün bulunmasıdır.

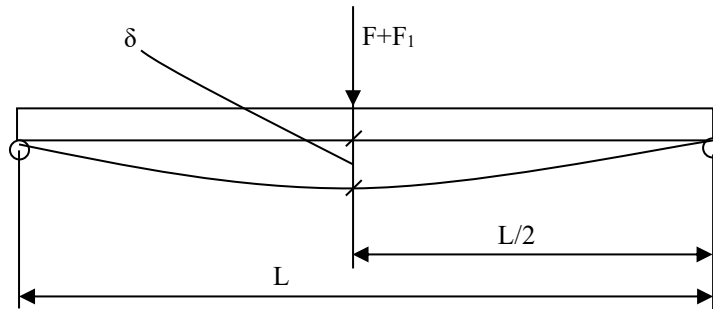
Burulma deneyinde ise amaç bir milde burulma açısının burulma momenti ve mil uzunluğu ile değişimi incelenerek çelik, pirinç ve alüminyum numunelerin kayma modüllerinin bulunmasıdır.

2. TEORİ

2.1 Eğme Deneyi

Bir veya daha fazla noktadan desteklenmiş ve çubuk eksenine dik olarak yüklenmiş elemanlara kiriş denir. Kirişler eğme yüküne maruzdurlar. Eğme deneyi sonucunda malzemelerin şekil değiştirme özellikleri hakkında edinilen genel bilginin yanında eğilme momenti, eğilme gerilmesi, elastisite modülü ve eğilme miktarı (sehim) gibi değerler hesaplanır. Elastisite modülü çekme deneyi ile saptanabileceği gibi eğme deneyi ile de belirlenebilir.

Bu deneyde malzemenin akma sınırından düşük gerilmeler uygulanarak elastik bölge aşılmadan malzemenin elastisite modülü hesaplanacaktır.



Şekil 1. Eğme Deneyi

Orta noktasından F kuvveti uygulanan basit mesnetli kiriş (Şekil 1) için sehim formülü:

$$\delta = \frac{FL^3}{48EI} \quad (1)$$

şeklindedir. Eğilme gerilmesi σ_b ise

$$\sigma_b = \frac{M_b c}{I} \quad (2)$$

olarak ifade edilir.

Burada:

δ = Sehim (mm)

L = Kiriş boyu (mm)

M_b = Eğilme Momenti (Nmm)

σ_b = Eğilme Gerilmesi (N/mm²)

E = Elastisite Modülü (N/mm²)

I = Atalet Momenti (mm⁴)

F_1 = Yük kolunun ağırlığı (N)

F = Eklenen ağırlık (N)

C = h/2 (mm)

Dikdörtgen kesit için $I = \frac{bh^3}{12}$, dairesel kesit için $I = \frac{\pi d^4}{64}$ tür.

2.2 Burulma Deneyi

Burulma deneyi genel olarak malzemelerin kayma elastisite modülü, kayma akma gerilmesi gibi özelliklerinin belirlenmesi için yapılır. Burulma deneyinde, bir mil bir ucundan sabitlenir ve serbest uçtan döndürülerek burulma açısı ve burulma momenti kaydedilir. Elde edilen değerlerden burulma diyagramı olarak adlandırılan burulma momenti-burulma açısı eğrisi çizilir.

Daha çok dairesel kesitli numuneler (miller) burulma gerilmesine maruzdurlar. Deney sırasında uygulanan burulma momenti etkisiyle numunede kayma gerilmeleri oluşur. Bu gerilmeler numunenin merkezinden yüzeyine doğru doğrusal olarak artar. Kayma gerilmesi numunenin merkezinde sıfır iken yüzeyde maksimum değerdedir.

Burulma deneyinde dairesel kesitli numunenin yüzeyinde oluşan kayma gerilmesi

$$\tau = \frac{Tr}{J} \quad (3)$$

olarak yazılabilir. (3) Denkleminde J polar atalet momenti yerine konursa

$$\tau = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (4)$$

bağıntısı elde edilir. Burulma açısının genel formülü

$$\phi = \int_0^L \frac{T(x)dx}{J(x)G} \quad (5)$$

şeklindedir. Sabit burulma momenti ve sabit kesit için (5) ifadesi integre edilirse

$$\phi = \frac{TL}{JG} \quad (6)$$

elde edilir. Burada ϕ radyandır.

3. DENEY ALET VE CİHAZLARI

3.1. Deney Cihazı

Deney düzeneği olarak Burulma ve Eğme Test Cihazı MT 210 kullanılacaktır.

3.2. Deney Numuneleri

Kirişler 650 mm uzunluğunda çelik malzemeden yapılmıştır. Kirişteki her bir çizginin arası 100 mm'dir. Kiriş kesitleri şu şekildedir: 3x25 mm, 4x25 mm, 6x25 mm, 8x25 mm, 4x15 mm, 4x20 mm ve 4x30 mm.

Burulma deneyinde kullanılan numuneler 8 mm çapındaki çelik, alüminyum ve pirinç malzemelerden imal edilmiş olup 650 mm uzunluğundadırlar. Kirişlerde olduğu gibi her bir çizginin arası 100 mm'dir. Ağırlıkların asılacağı ağırlık kolunun ağırlığı 2.5 N'dur. Ayrıca herbiri 5'er N olan 4 adet ağırlık bulunmaktadır. Ölçü aleti olarak 0.01 mm hassasiyetinde komparator kullanılacaktır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1.Eğme Deneyinin Yapılışı

- **Yük ile Sehım Arasındaki Bağıntının İncelenmesi:**

600 mm uzunluğundaki kirişin iki ucuna mesnetler yerleştirilir. Kirişin üzerinde işaretli her iki çizgi arası 100 mm'dir. Kesit uzunlukları 6x25 mm olan test numunesi mesnetlere yerleştirilir. Test numunesinin tam merkezine ağırlık düzeneği asılır. Ağırlık düzeneğinin üst yüzeyine ölçü aleti yerleştirilir ve sıfırlanır. Böylece test düzeneği kurulur. Daha sonra ağırlıklar tek tek konularak sehım miktarları ölçülür.

- **Kiriş Uzunluğu ile Sehım Arasındaki Bağıntının İncelenmesi:**

Yük 10 N'da sabit tutularak 6x25 mm kesitindeki test numunesinin değişik mesnet mesafelerindeki (300 mm, 400 mm, 500 mm, 600 mm) sehımler ölçülür.

- **Kiriş Genişliği ile Sehım Arasındaki Bağıntının İncelenmesi:**

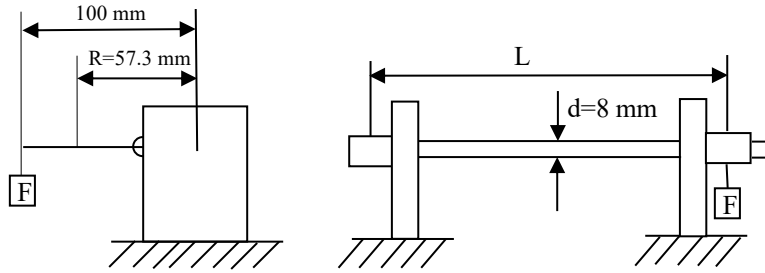
Kiriş uzunluğu 600 mm, kalınlık 4 mm, yük ise 5 N'da tutularak farklı genişlikteki (15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm) kirişlerde oluşan sehımler ölçülür.

- **Kiriş Kalınlığı ile Sehım Arasındaki Bağıntının İncelenmesi:**

Kiriş uzunluğu 600 mm, genişlik 25 mm, yük ise 5 N'da tutularak farklı kalınlıktaki (3 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm) kirişlerde oluşan sehımler ölçülür.

Not: Elastisite Modülü E hesaplanırken ilk ağırlığın (ağırlık kolu) sebep olduğu sehım için ölçü aleti sıfırlanmalıdır. Fakat eğilme gerilmesi hesaplanırken ilk ağırlık da hesaba katılmalıdır.

4.2. Burulma Deneyinin Yapılışı



Şekil 2. Burulma Deney Düzenegi

- **Burulma Momenti ile Burulma Açısı Arasındaki Bağıntının Bulunması:**

Deney numunesinin bir ucu sabitlenerek diğer ucu serbest bırakılır. Numune uzunluğu 600 mm'ye ayarlanır. Serbest ucuna bağlanmış kolun üzerindeki çentiğe ölçü aleti yerleştirilir ve sıfırlanır. Burma kolu üzerindeki çentik ile mil eksenini arası 57.3 mm olarak ayarlanmıştır. Bu mesafede ölçü aletindeki 1mm'lik sapma 1 dereceye karşılık gelir. 2.5 N, 7.5 N, 12.5 N ve 17.5 N'luk yükler dairesel kesitli çubuğun ekseninden 100 mm'lik mesafeden uygulanarak burulma açıları bulunur.

- **Numune Uzunluğu ile Burulma Açısı Arasındaki Bağıntının Bulunması:**

Yük 12.5 N'da sabit tutulup numune uzunlukları 300 mm, 400 mm, 500 mm ve 600 mm'ye ayarlanarak burulma açıları bulunur.

5. HESAPLAMALAR VE İSTENİLENLER

- Sehimi yükün fonksiyonu olarak gösteren diyagramı çiziniz.
- Sehimi kiriş uzunluğunun fonksiyonu olarak gösteren diyagramı çiziniz.
- Sehimi kiriş genişliğinin fonksiyonu olarak gösteren diyagramı çiziniz.
- Sehimi kiriş kalınlığının fonksiyonu olarak gösteren diyagramı çiziniz.

- Her bir yük için eğilme momenti, eğilme gerilmesi, sehim ve elastisite modülünü hesaplayarak tablo halinde gösteriniz ve ortalama elastisite modülünü hesaplayınız.
- Her bir yük için burulma momenti, burulma açısı, burulma kayma gerilmesi ve kayma elastisite modülünü hesaplayarak tablo halinde gösteriniz ve ortalama kayma elastisite modülünü hesaplayınız.
- Burulma açısını burulma momentinin fonksiyonu olarak gösteren diyagram çizin.
- Her bir numune uzunluğu için burulma açısını hesaplayarak burulma açısını numune uzunluğunun fonksiyonu olarak gösteren diyagramı çizin.
- Teori ile deneysel sonuçları karşılaştırınız.
- Hata analizi yapınız.
- Hataların sebeplerini açıklayınız.

DENEY 5

TEK SERBESTLİK DERECELİ SÖNÜMSÜZ SİSTEMİN HARMONİK ZORLANMIŞ TİTREŞİMİ

1 GİRİŞ

Mekanik sistemlerin titreşimleri iki kategoriye ayrılabilir: serbest titreşim ve zorlanmış titreşim. Serbest titreşim, harici bir etki olmadığında bir sistemin denge konumu etrafında salınmasıdır. Titreşim sırasında bir sisteme herhangi bir dış zorlanma etki ediyorsa, sistemin titreşimine zorlanmış titreşim denir. Bu deneyde, dikdörtgen kesitli bir kirişin harmonik zorlanmış titreşimi incelenecek ve deneysel sonuçlar hareket denkleminin analitik çözümü ile karşılaştırılacaktır.

2 TEORİ

2.1 Tek Serbestlik Dereceli Sönümsüz Sistemlerin Serbest Titreşimi

Tüm tek serbestlik dereceli sönümsüz mekanik sistemler Şekil 2.1'de gösterilen eşdeğer sistem modelleri ile temsil edilebilirler. Eğer genelleştirilmiş koordinat yer değiştirme olarak seçilirse, sistem birer eşdeğer kütle ve eşdeğer yay ile temsil edilebilir. Benzer şekilde, açılabilir genelleştirilmiş koordinatlar için sistem birer eşdeğer atalet momenti ve eşdeğer burulma yayı ile temsil edilebilir. Bu sistemler için hareket denklemleri, Newton'un ikinci hareket yasasını uygulayarak şu şekilde elde edilebilir:

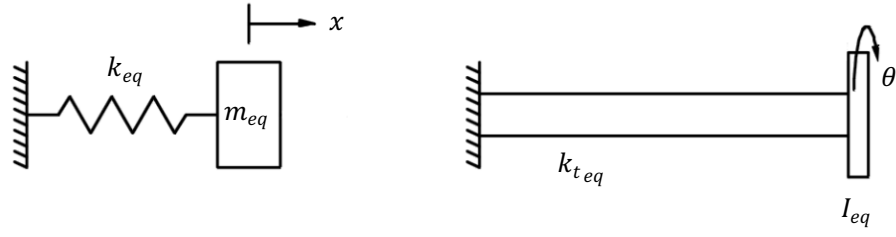
$$m_{eq}\ddot{x} + k_{eq}x = 0 \quad 2.1$$

$$I_{eq}\ddot{\theta} + k_{teq}\theta = 0 \quad 2.2$$

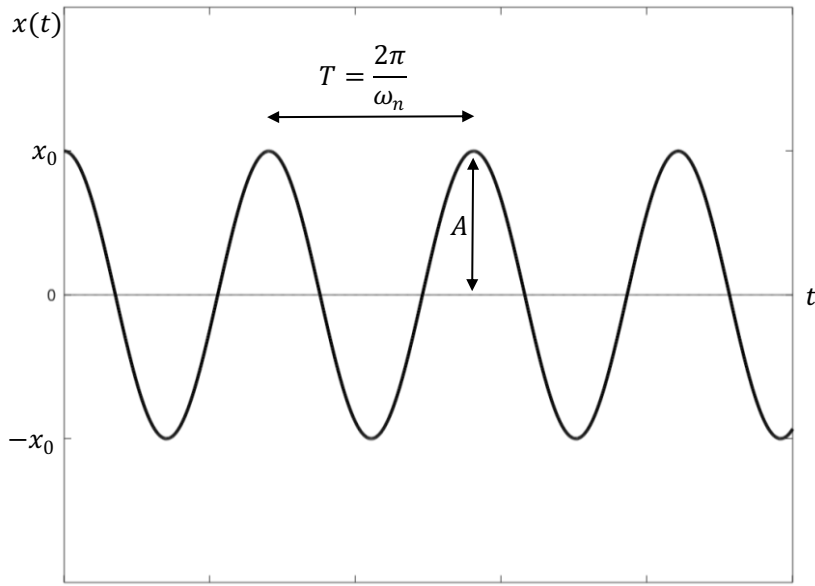
Denklemler 2.1 ve 2.2 ikinci mertebeden lineer homojen diferansiyel denklemlerdir. Adi diferansiyel denklemler konusunda daha ayrıntılı açıklama için herhangi bir diferansiyel denklemler kitabına başvurabilirsiniz [2]. Bu homojen diferansiyel denklemlerin çözümleri aşağıdaki gibidir:

$$x_h(t) = C_1 \cos\left(\sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} t\right) + C_2 \sin\left(\sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} t\right) \quad 2.3$$

$$\theta_h(t) = C_1 \cos\left(\sqrt{\frac{k_{teq}}{I_{eq}}} t\right) + C_2 \sin\left(\sqrt{\frac{k_{teq}}{I_{eq}}} t\right) \quad 2.4$$



Şekil 2.1: Genelleştirilmiş koordinat olarak doğrusal yerdeğiştirme (solda) ve açısal yerdeğiştirme (sağda) kullanılarak oluşturulmuş tek serbestlik dereceli sönümsüz sistemin eşdeğer sistem modelleri



Şekil 2.2: Sönümsüz bir sistemin serbest titreşim tepkisi

Denklem 2.3 ve 2.4'ten sistemlerin denge pozisyonları etrafında sırasıyla $\sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}}$ ve $\sqrt{\frac{k_{teq}}{I_{eq}}}$ frekanslarında titreştiği görülebilir. Bu iki frekans değeri doğal frekans olarak adlandırılır ve literatürde genellikle ω_n ile temsil edilir. Mekanik sistemlerde doğal frekans sistemin serbest titreşim özelliklerini temsil eder. Şekil 2.2'de, $x(0) = x_0$ ve $\dot{x}(0) = 0$ başlangıç koşullarıyla Denklem 2.3'ün çözümünü verilmiştir ve beklenildiği gibi sistemde herhangi bir sönümlenme elemanı bulunmadığından, sistemin enerjisini kaybetmeden sürekli olarak denge noktası etrafında salındığı görülmektedir.

2.2 Tek Serbestlik Dereceli Sönümlü Sistemlerin Serbest Titreşimi

Sönümsüz sistemlere benzer şekilde sönümlü sistemler de eşdeğer sistemleri kullanılarak modellenebilir. Ancak bu sefer sisteme eşdeğer bir sönümlenme elemanı dahil edilmelidir. Mekanik sistemlerde sönümlenmenin temel sebepleri kuru sürtünme ve viskoz sürtünmedir. Şekil

2.3 eşdeğer sistem modellerini göstermektedir ve hareket denklemleri aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$m_{eq}\ddot{x} + c_{eq}\dot{x} + k_{eq}x = 0 \quad 2.5$$

$$I_{eq}\ddot{\theta} + c_{teq}\dot{\theta} + k_{teq}\theta = 0 \quad 2.6$$

Bu noktada Denklem 2.5 ve 2.6'yı basitleştirilmiş bir biçimde ifade etmek yararlı olacaktır:

$$\ddot{x} + 2\zeta_x\omega_{n_x}\dot{x} + \omega_{n_x}^2x = 0 \quad 2.7$$

$$\zeta_x = \frac{1}{2} \frac{c_{eq}}{\sqrt{k_{eq}m_{eq}}}, \quad \omega_{n_x} = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} \quad 2.8$$

$$\ddot{\theta} + 2\zeta_\theta\omega_{n_\theta}\dot{\theta} + \omega_{n_\theta}^2\theta = 0 \quad 2.9$$

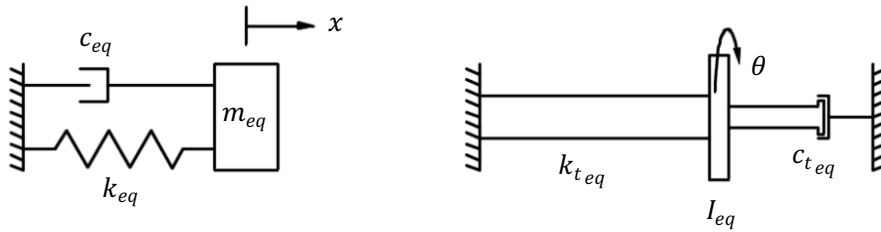
$$\zeta_\theta = \frac{1}{2} \frac{c_{teq}}{\sqrt{k_{teq}I_{eq}}}, \quad \omega_{n_\theta} = \sqrt{\frac{k_{teq}}{I_{eq}}} \quad 2.10$$

Denklem 2.7 ve 2.9'da görünen yeni parametreler (ζ_x, ζ_θ) sönümleme oranı olarak adlandırılır. Denklemlerin basitleştirilmesi iki ana amaca hizmet eder: birincisi, sistemdeki eşdeğer sönümlenmenin boyutsuz hale getirilmesidir ve ikincisi, çözümü daha kısa bir formda sunmaktır. $\zeta_x < 1$ ve $\zeta_\theta < 1$ için bu denklemlerin basitleştirilmiş notasyonla çözümleri aşağıdaki gibidir:

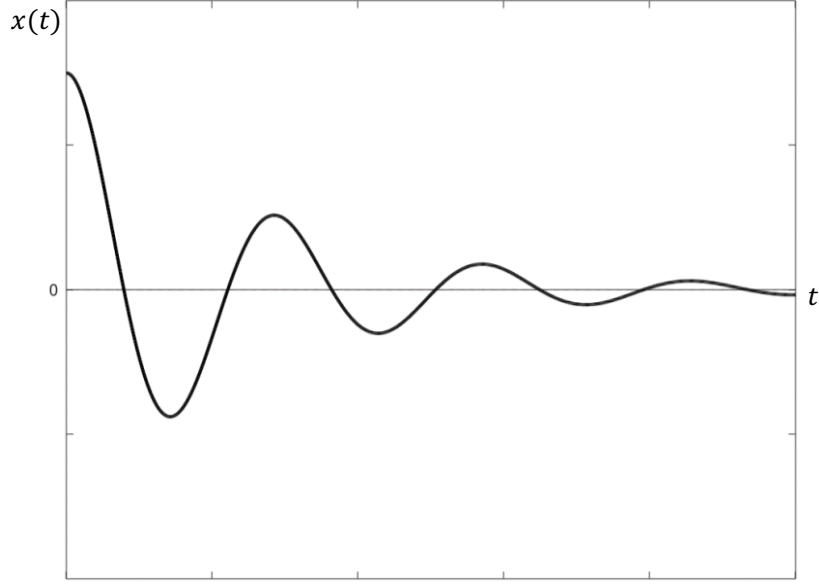
$$x_h(t) = e^{-\zeta_x\omega_{n_x}t} \left[C_1 \cos(\omega_{n_x}\sqrt{1-\zeta_x^2}t) + C_2 \sin(\omega_{n_x}\sqrt{1-\zeta_x^2}t) \right] \quad 2.11$$

$$\theta_h(t) = e^{-\zeta_\theta\omega_{n_\theta}t} \left[C_1 \cos(\omega_{n_\theta}\sqrt{1-\zeta_\theta^2}t) + C_2 \sin(\omega_{n_\theta}\sqrt{1-\zeta_\theta^2}t) \right] \quad 2.12$$

Sönümsüz sistemlerden farklı olarak, sönümlü sistemlerin serbest titreşimi denge noktası etrafında genliği küçülen salınımlar üretir. Denklem 2.11'in çözümü başlangıç koşullarını $x(0) = x_0$, ve $\dot{x}(0) = 0$ olarak Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.3: Tek serbestlik dereceli sönümlü sistemin eşdeğer sistem modelleri



Şekil 2.4: Sönümlü sistemin serbest titreşim tepkisi

2.3 Tek Serbestlik Dereceli Sistemlerin Zorlanmış Titreşimi

Önceki bölümde açıklandığı gibi, bir sistem dış bir zorlanma etkisi altındaysa, o sistemin titreşimi zorlanmış titreşim olarak sınıflandırılır. Bu tür sistemlerin eşdeğer sistem modelleri Şekil 2.5'te verilmiştir. Eşdeğer sistem modelini kullanarak bu sistemlerin hareket denklemlerini elde etmek mümkündür:

$$\ddot{x} + \omega_{n_x}^2 x = \frac{1}{m_{eq}} F_{eq}(t) \quad 2.13$$

$$\ddot{\theta} + \omega_{n_\theta}^2 \theta = \frac{1}{I_{eq}} M_{eq}(t) \quad 2.14$$

Bu deneyde dış zorlanma olarak sadece harmonik kuvvetler kullanılacaktır. Eğer uygulanan kuvvet her T periyodunda kendini tekrarlıyorsa periyodik yada harmonik olarak adlandırılır:

$$F_{eq}(t + T) = F_{eq}(t) \quad 2.15$$

Burdan yola çıkarak bir kuvvetin frekansı aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad 2.16$$

Bu deneyde, aşağıdaki forma sahip tek frekanslı bir kuvvet ile çalışacağız:

$$F_{eq}(t) = F_0 \sin(\omega t + \psi) \quad 2.17$$

burada F_0 kuvvetin genliği, ω frekansı ve ψ fazıdır. Zorlanma frekansının sistemin doğal frekansından bağımsız olduğuna unutulmamalıdır.

Denklem 2.13 ve 2.14'te verilen diferansiyel denklemler, sağ taraftaki eşdeğer kuvvet ve moment terimleri sebebiyle artık homojen değildir. Homojen olmayan diferansiyel denklemlerin genel çözümü aşağıdaki gibi elde edilebilir:

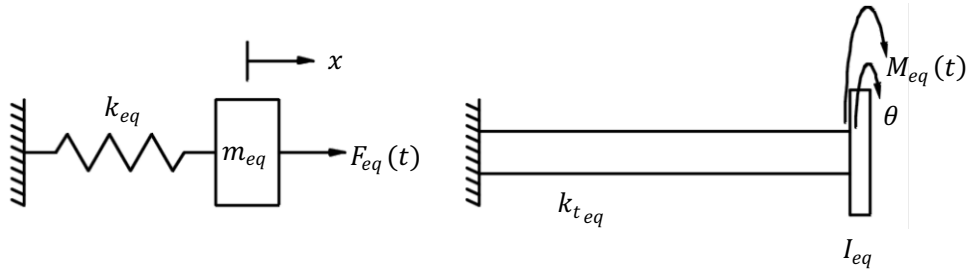
$$x_g(t) = x_h(t) + x_p(t) \quad 2.18$$

burada $x_h(t)$ Denklem 2.3'te elde edilen homojen çözümü ve $x_p(t)$ çözümü $F_{eq}(t)$ 'e bağlı olan özel çözümü temsil eder. $F_{eq}(t)$ 'in Denklem 2.17'de verilen formda olduğunu varsayarak, $x(0) = x_0$ ve $\dot{x}(0) = \dot{x}_0$ başlangıç koşullarıyla Denklem 2.13'ün genel çözümü $\omega \neq \omega_n$ için aşağıdaki gibi elde edilir:

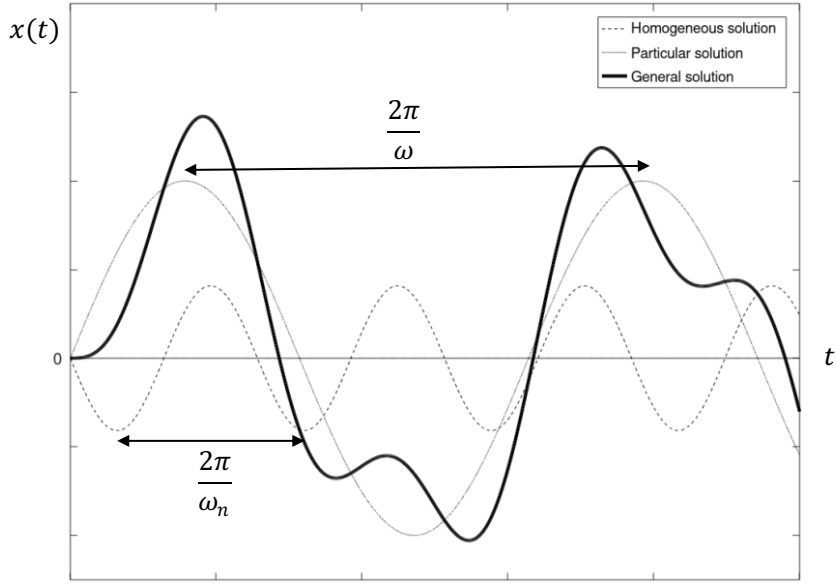
$$x_h(t) = C_1 \cos(\omega_n t) + C_2 \sin(\omega_n t) \quad 2.19$$

$$x_p(t) = \frac{F_0}{m_{eq}(\omega_n^2 - \omega^2)} \sin(\omega t + \psi) \quad 2.20$$

$$x_g(t) = \left[x_0 - \frac{F_0 \sin \psi}{m_{eq}(\omega_n^2 - \omega^2)} \right] \cos(\omega_n t) + \frac{1}{\omega_n} \left[\dot{x}_0 - \frac{F_0 \omega \cos \psi}{m_{eq}(\omega_n^2 - \omega^2)} \right] \sin(\omega_n t) + \frac{F_0}{m_{eq}(\omega_n^2 - \omega^2)} \sin(\omega t + \psi) \quad 2.21$$



Şekil 2.5: Tek serbestlik dereceli sönümsüz sistemin eşdeğer sistem modelleri



Şekil 2.6: Harmonik zorlanmış sönümsüz sistemin titreşim tepkisi

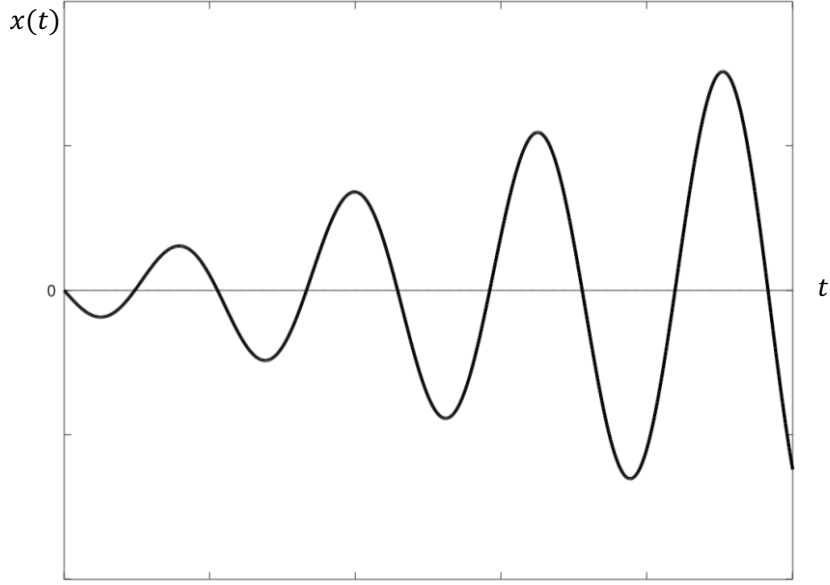
Şekil 2.6'da verilen sistem tepkisi farklı frekansa sahip iki trigonometrik fonksiyonun toplamıdır. $\omega = \omega_n$ durumu özeldir ve zorlanma frekansı doğal frekansa eşit olduğunda homojen ve özel çözümler doğrusal olarak bağımlı hale gelir. Bu nedenle, bu durum için başka bir özel çözüme ihtiyaç vardır. $F_{eq}(t)$ 'in Denklem 2.22'de verilen forma sahip olduğu varsayılırsa, özel ve genel çözümler şu şekilde bulunur:

$$F_{eq}(t) = F_0 \sin(\omega_n t + \psi) \quad 2.22$$

$$x_p(t) = -\frac{F_0}{2m_{eq}\omega_n} t \cos(\omega_n t + \psi) \quad 2.23$$

$$x_g(t) = x_0 \cos(\omega_n t) + \left(\frac{\dot{x}_0}{\omega_n} + \frac{F_0 \cos \psi}{2m_{eq}\omega_n^2} \right) \sin(\omega_n t) - \frac{F_0}{2m_{eq}\omega_n} t \cos(\omega_n t + \psi) \quad 2.24$$

Zorlanma frekansının doğal frekansa eşit olduğu durumda sistemin titreşim genliği, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi sınırlanmadan artar. Genliğin sınırlanmadan arttığı bu duruma rezonans denir. Matematiksel olarak mümkün olmasına rağmen, gerçek bir fiziksel sistemde titreşim genliği sınırlıdır ve sistemde bulunan sönümlenme etkileri nedeniyle sürekli olarak artmaz. Rezonans, mekanik veya yapısal bir sistemde tehlikeli bir durumdur ve istenmeyen büyük yer değiştirmelere veya kırılmaya neden olur. Burulma modunda rezonans salınımları ünlü Tacoma Narrows Köprüsü'nün yıkılmasının temel sebeplerinden biridir. Bu nedenle, bir mühendis tasarlanacak sistemin doğal frekanslarının ve çalışma koşullarının daima farkında olmalıdır.



Şekil 2.7: Zorlanma frekansı doğal frekansa eşit olduğunda sönümsüz sistemin tepkisi

2.4 Deney Düzeneginin Modeli

Şekil 2.8’de verilen sistemin modeli aşağıdaki elemanlardan oluşur:

- i. Rijit, kütlesi m , uzunluğu L olan A noktasından döner mafsalla bağlanmış AD kirişi.
- ii. Kirişe C noktasından bağlanmış sabiti k olan yay.
- iii. Dengelenmemiş kütleye sahip olan iki tane disk ω sabit açısal hızıyla döndüren, B noktasından kirişe bağlanmış, M kütleli motor ünitesi. İki diskin üzerinde de m_u kütleli ve e eksen kayıklığına(eksentrisite) sahip dengelenmemiş kütleler bulunmaktadır.
- iv. D noktasında, sistemin eşdeğer kütlesinin değiştirilmesini sağlayan her biri m_d kütleli n tane sökülebilir ağırlıklar mevcuttur.

Sistemin hareket denklemleri aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\left(\frac{1}{3}mL^2 + ML_1^2 + nm_dL_2^2\right)\ddot{\theta} + kL_2^2\theta = m_u eL_1\omega^2 \sin(\omega t) \quad 2.25$$

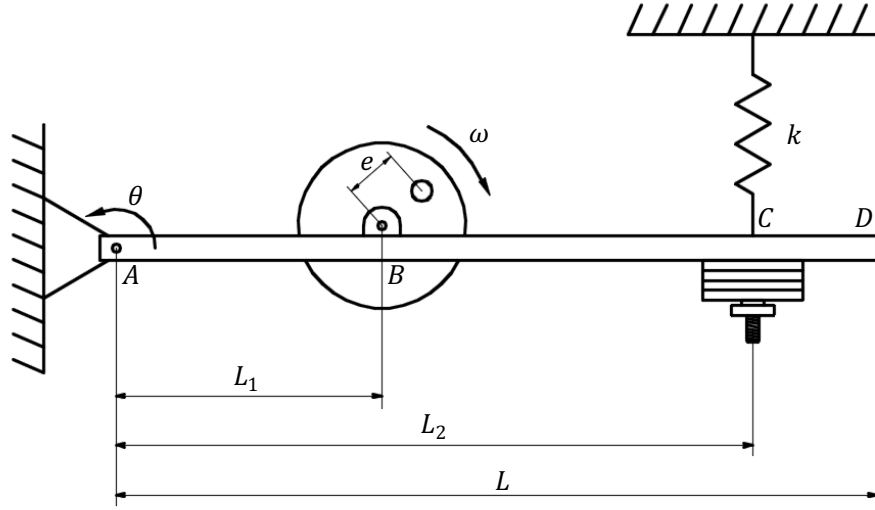
Denklem 2.24’ü aşağıdaki gibi basitleştirilmiş biçimde ifade etmek daha uygun olacaktır:

$$\ddot{\theta} + \omega_n^2\theta = F_0 \sin(\omega t) \quad 2.26$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{kL_2^2}{\left(\frac{1}{3}mL^2 + ML_1^2 + nm_dL_2^2\right)}} \quad 2.27$$

$$F_0 = \frac{m_u e L_1 \omega^2}{\left(\frac{1}{3} m L^2 + M L_1^2 + n m_d L_2^2\right)} \quad 2.28$$

Daha önce de belirtildiği gibi, sönümsüz bir sistemin zorlanmış titreşim tepkisi iki kısımdan oluşur: homojen ve özel çözüm. Sistem sönümsüz olarak modellenmesine rağmen, gerçek bir sistemde mafsallı sürtünmesi ve hava direnci gibi küçük sönümlenme etkileri mevcuttur. Bu nedenle, sistemin tepkisi kararlı duruma yaklaştıkça, homojen çözümün etkisi sönümlenme nedeniyle kaybolur ve özel çözüm sistemin hareketini belirler. Başka bir deyişle bir müddet sonra sistem zorlanma frekansında salınmaya başlar.

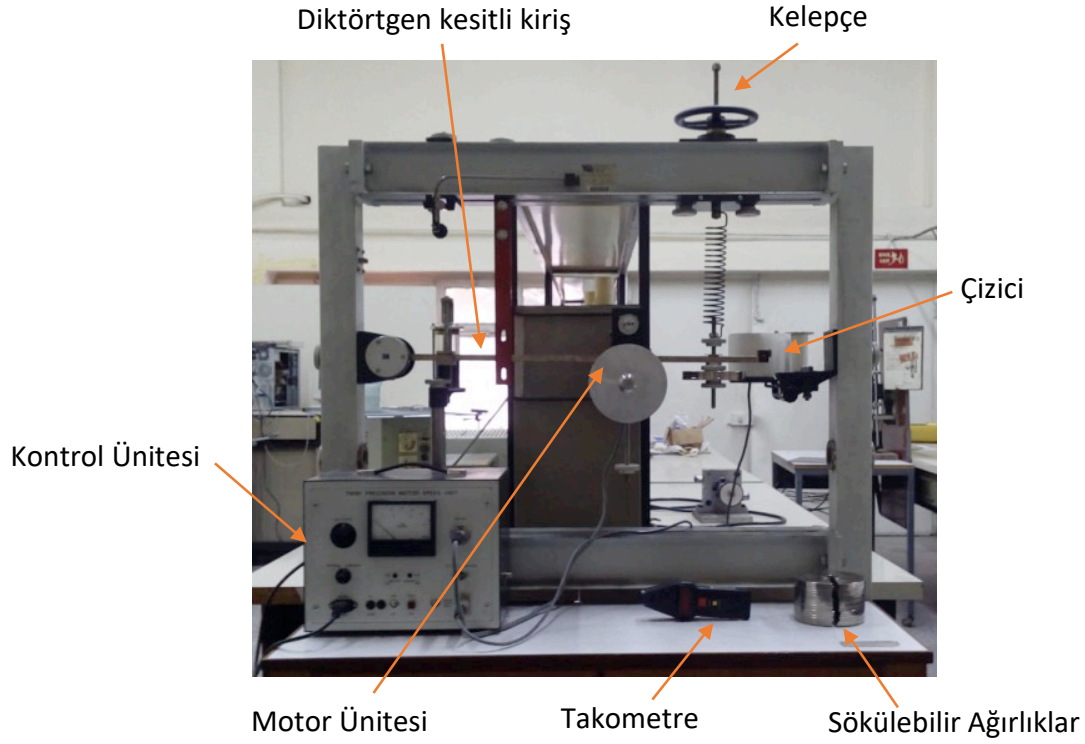


Şekil 2.8: Deney düzeneğinin modeli

3 DENEY DÜZENEGİ

Şekil 3.1'de verilen deney düzeneği aşağıdaki ekipmanlardan oluşmaktadır:

- i. Dikdörtgen kesitli kiriş: Kiriş, test yatağına bir uçtan döner mafsallı ile ve diğer uçtan da yay ile bağlıdır. Yayın alt ucu serbestçe hareket ederken, üst ucu bir kelepçe ile test yatağına bağlıdır. Bu kelepçe yardımıyla yayın üst ucunun konumu ayarlanabilir.
- ii. Motor ünitesi: Motor ünitesi kirişe sıkıca vidalanmıştır. Harmonik zorlanma, motorun çıkış miline bağlanan ve dengelenmemiş kütleye sahip iki diskin döndürülmesiyle elde edilir. Meydana gelen zorlanmanın frekansı, hız kontrol ünitesi yardımıyla motorun dönme hızının değiştirilmesi ile ayarlanır.
- iii. Çizici: Titreşim grafiği, dikdörtgen kirişin sağ ucuna sabitlenmiş bir çizici ile elde edilir.



Şekil 3.1: Deney düzeneği

4 DENEYİN YAPILIŞI

Senkron motorun elektrik kablosu, kontrol ünitesindeki elektrik soketine takılır. Daha sonra kiriş, kelepçe ayarlanarak yatay konuma getirilir. Çizicinin konumu, kirişin ucunda bulunan kalem kağıt rulosuna hafifçe degecek şekilde ayarlanır. Deneydeki sistem parametrelerinin sayısal değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Sistem parametrelerinin sayısal değerleri

<i>Parametre</i>	<i>Sembol</i>	<i>Değer</i>	<i>Birim</i>
<i>Motor ünitesinin kütlesi</i>	<i>M</i>	4.930	<i>kg</i>
<i>Kirişin kütlesi</i>	<i>m</i>	1.922	<i>kg</i>
<i>Dengelenmemiş kütle</i>	<i>m_u</i>	33.051	<i>g</i>
<i>Sökülebilir ağırlıkların kütlesi</i>	<i>m_d</i>	400	<i>g</i>
<i>Eksentirisite</i>	<i>e</i>	41.750	<i>mm</i>

Deneye başlamadan önce L , L_1 ve L_2 değerlerini ölçün. Ayrıca yay sabiti k 'yi hesaplamak için gerekli ölçümleri yapın.

Deney sırasında, farklı motor hızlarında aşağıdaki parametreleri ölçün ve sistemin rezonans frekansını belirlemeye çalışın.

- i. Zorlanma Frekansı: Bu sistemde, zorlanma frekansı motorun açısal hızıdır. Düşük hızlarda disklerin devrini sayarak ve yüksek hızlarda optik bir takometre kullanarak motorun açısal hızını ölçün.
- ii. Titreşim Genliği: Kirişin sağ ucundaki çizici üzerindeki grafikten titreşimin genliğini ölçün.

5 RAPOR

Raporunuzun hesaplama kısmında aşağıdaki sonuçlar yer almalıdır:

- Tablo halinde deneysel veriler,
- Yay sabitinin bulunması için yapılan hesaplamalar,
- Analitik model kullanılarak hesaplanan sistemin doğal frekansı,
- Deneysel veriler kullanılarak çizilecek olan zorlanma frekansı vs. titreşim genliği grafiği, ve bu grafikten belirlenecek olan sistemin rezonans frekans değeri.

Raporunuzun sonuç kısmında aşağıdaki hususlar hakkında yorum yapmanız beklenmektedir:

- Analitik modelden hesaplanan doğal frekans değeri deneysel sonuçlarla örtüşüyor mu? Analitik ve deneysel sonuçlar arasındaki farkın olası nedenlerini tartışın.
- Analitik modele göre rezonans halindeyken sönümsüz sistemin titreşim genliğinin sürekli artması gerekir. Rezonans tepesinin sınırlı olmasına sebep olan etkenleri tartışın.

6 REFERANSLAR

1. Kelly, S. Graham. *Fundamentals of Mechanical Vibrations*. McGraw Hill, 2000.
2. Boyce, William E., et al. *Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems*. Wiley, 2017.
3. *Tacoma Bridge - YouTube*. www.youtube.com/watch?v=3mclp9QmCGs.

DENEY 6

ZORLANMIŞ VORTEKS DENEYİ

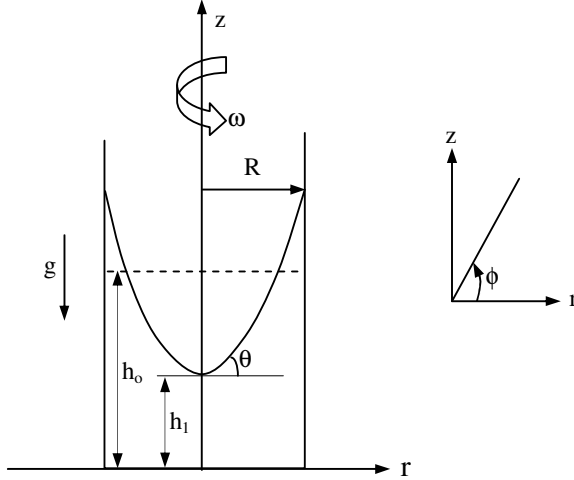
1. AMAÇ

Deneyin amacı, zorlanmış vorteks hareketi yapan bir silindir içindeki sıvıda basınç dağılımının belirlenmesi.

2. GİRİŞ

Kısmen dolu olan bir silindir içindeki sıvı sabit bir ω açısal hızı ile kendi eksenini etrafında döndürülürse kısa bir süre sonra silindir içinde relatif hızlar ortadan kalkar ve sıvı rijit cisim gibi hareket etmeye başlar (Şekil 1).

Zorlanmış bir vortekste, dışarıdan enerji sağlama nedeniyle akışkanın hızı ve basıncı artar. Bu prensip santrifüj pompalarda kullanılır. Sıvı, pompaya merkezden alçak basınçla girer. Kanatların veya savurucunun merkezinden, çevreye doğru ilerlerken hızı ve basıncı artar. Bu sayede pompa kanatlarında basınçlandırılan sıvı belli bir yüksekliğe basılabilmektedir.



Şekil 1. ω açısal hızı ile döndürülen sıvının yüzeyi ve koordinat sistemi

3. TEORİ

Silindirik koordinat sisteminde Navier-Stokes denklemleri yazılırsa.

r - yönünde,

$$\rho \left(\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\phi}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \phi} - \frac{V_\phi^2}{r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) = F_r - \frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \phi^2} - \frac{2}{r^2} \frac{V_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

ϕ - yönünde,

$$\rho \left(\frac{\partial V_\phi}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\phi}{\partial r} + \frac{V_\phi}{r} \frac{\partial V_\phi}{\partial \phi} + \frac{V_r V_\phi}{r} + V_z \frac{\partial V_\phi}{\partial z} \right) = F_\phi - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \phi} + \mu \left(\frac{\partial^2 V_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\phi}{\partial r} - \frac{V_\phi}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\phi}{\partial \phi^2} + \frac{2}{r^2} \frac{V_r}{\partial \phi} + \frac{\partial^2 V_\phi}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

z - yönünde,

$$\rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\phi}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \phi} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

denklemleri elde edilir.

Zorlanmış vorteks hareketinde, V_r , V_z , F_r , F_ϕ , $\frac{\partial V_\phi}{\partial \phi}$ ifadelerinin sıfır olduğu ve hareketin zamana bağlı olmadığı göz önüne alınırsa, yukarıda verilen (1), (2) ve (3) nolu eşitlikler önemli oranda basitleşir.

r - yönündeki eşitlik,

$$\rho \left(-\frac{V_\phi^2}{r} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} \quad (4)$$

ϕ - yönündeki eşitlik,

$$\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \phi} = 0 \quad (5)$$

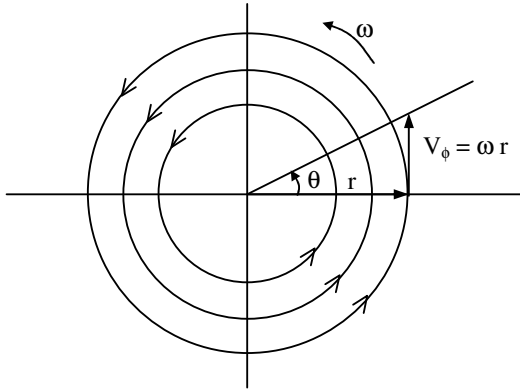
z - yönündeki eşitlik,

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (6)$$

haline gelir. (4), (5) ve (6) ifadeleri incelendiğinde basıncın r ' nin ve z 'nin fonksiyonu olduğu görülür ($P = P(r,z)$). Silindirik içindeki basınç ifadesini hesaplamak isteyelim.

Şekil 2 'de görüldüğü gibi zorlanmış vortekste ϕ yönündeki hız ifadesi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Katı cisim hareketi).

$$V_\phi = \omega r \quad (7)$$



Şekil 2. Zorlanmış vortekste akım çizgileri

(7) nolu ifadeyi (4) nolu denklemde yerine koyarsak aşağıdaki basınç ifadesi elde edilir.

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \rho \frac{\omega^2 r^2}{r} = \rho \omega^2 r \quad (8)$$

Yukarıdaki ifadenin integrali alınarak,

$$\int_{P_1}^P dP = \int_{r_1}^r \rho \omega^2 r dr$$

$$P - P_1 = \rho \frac{\omega^2 (r^2 - r_1^2)}{2} + c(z) \quad (9)$$

(9) eşitliği elde edilir. $c(z)$ fonksiyonunun değerini tespit etmek için (6) nolu eşitliği kullanalım:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g = c'(z)$$

Bu eşitlik integre edilirse,

$$c(z) = -\rho g(z - z_1) \quad (10)$$

elde edilir. Eş. (10), Eş. (9) 'da yerine konulursa, $P = P(r,z)$ ifadesinin genel şekli bulunur.

$$P - P_1 = \rho \frac{\omega^2 (r^2 - r_1^2)}{2} - \rho g(z - z_1) \quad (11)$$

Eğer 1 noktası serbest yüzeyde eksen üzerinde alınır, $P_1 = P_{atm}$, $r_1 = 0$, $z_1 = h_1$ olur. Bunun sonucu olarak Eş. (11) şu hale gelir.

$$P - P_{atm} = \rho \frac{\omega^2 r^2}{2} - \rho g(z - h_1) \quad (12)$$

Sıvı yüzeyinde basıncın sabit ve atmosfer basıncına eşit olduğu düşünülürse ($P = P_{atm}$),

$$0 = \rho \frac{\omega^2 r^2}{2} - \rho g(z - h_1) \quad (13)$$

Bu eşitlik düzenlenirse serbest yüzey denklemi elde edilir.

$$z = h_1 + \frac{(\omega r)^2}{2g} \quad (14)$$

Zorlanmış vorteks hareketi esnasında hacmin sabit kaldığı düşünülürse h_1 ifadesi h_0 , R bilinenleri cinsinden yazılabilir.

Dönme olmadığı durumdaki sıvı hacmini yazalım.

$$V = \pi R^2 h_0 \quad (15)$$

Dönme esnasındaki sıvı hacmini yazalım.

$$V = \int_0^R \int_0^z 2\pi r dz dr = \int_0^R 2\pi r z dr \quad (16)$$

$$V = \int_0^R 2\pi \left(h_1 + \frac{\omega^2 r^2}{2g} \right) r dr \quad (17)$$

Buradan,

$$V = \pi \left(h_1 R^2 + \frac{\omega^2 R^4}{4g} \right) \quad (18)$$

ifadesi elde edilir. Dönme olmadığı durumdaki sıvı hacmi, Eş. (18) deki hacme eşit olduğu düşünülürse, h_1 için şu eşitlik bulunur.

$$h_1 = h_0 - \frac{(\omega R)^2}{4g} \quad (19)$$

Sonuç olarak sıvının serbest yüzeyinin eşitliği için, aşağıdaki ifade elde edilir.

$$z = h_0 - \frac{(\omega R)^2}{2g} \left[\frac{1}{2} - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (20)$$

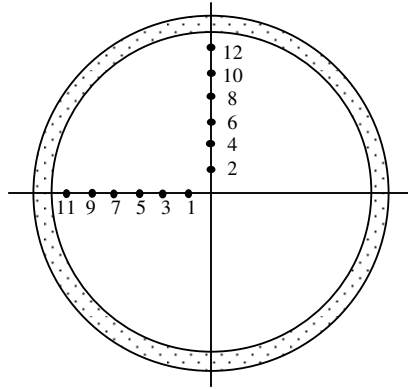
Serbest yüzeyin eğimini bulmak için (20) nolu ifadenin r 'ye göre türevi alınır. Bu durumda,

$$\frac{dz}{dr} = \frac{\omega^2 r}{g} \quad (21)$$

elde edilir.

4. TEKNİK VERİLER

Zorlanmış vorteksin oluştuğu silindirik kaba ait basınç ölçüm noktaları Şekil 3 'de ve radyal yöndeki uzaklıkları Tablo 1 'de verilmektedir.



Şekil 3. Silindir kabın tabanındaki basınç ölçüm noktaları

Tablo 1. Silindir tabanındaki basınç ölçüm noktalarının radyal yönde merkeze olan uzaklıkları

No	R (mm)
1	30
2	40
3	50
4	60
5	70
6	80
7	90
8	100
9	110
10	120
11	130
12	140

Ayrıca deneyde kullanılan silindire ait bazı veriler aşağıda verilmiştir:

Silindir iç yarıçapı (R)	: 145 mm
Silindirin içindeki su yüksekliği (h_0)	: 300 mm
Yerçekimi ivmesi (g)	: 9.81 m/s ²
Elektrik motoru devir sayısı (n)	: 1000 dev/dak
Dişli oranı	: 6/31

5. CİHAZ VE GEREÇLER

- Silindir kap
- Elektrik motoru
- Redüktör
- Basınç ölçüm aleti

6. DENEYİN YAPILIŞI VE İSTENENLER

Silindir içinde belli yükseklikteki su, tabandaki döner bir pleyt (kanatçık) vasıtasıyla ω açısal hızı ile tahrik edilir.

Belli bir süre sonra, tabandan verilen hareket bütün sıvı içinde yayılır ve sıvı katı bir cisim gibi dönmeye başlar. Bu esnada sıvı içinde tabandan basınç ölçümü yapılır ve ölçüm panosunda radyal yönde bir dağılımın olduğu gözlenir.

1. Deney esnasında basınç ölçüm panosundaki basınç değerlerini mmss olarak kayıt ediniz. Bu değerleri teorik değerlerle karşılaştırınız.
2. Ölçülen basınç değerlerini kullanarak serbest yüzeyin eğrisini bulunuz ve bu eğriyi teorik olarak elde edilen eğri ile karşılaştırınız.

Bulduğunuz bütün sonuçları ve grafikleri düzgün bir şekilde deney yazım formatına uygun olarak hazırlayınız. Birimlere dikkat ediniz. Bulduğunuz sonuçların birimlerini yazmayı unutmayınız. Bulduğunuz deneysel ve teorik değerler arasındaki farkı yorumlayınız.

DENEY 7

SİLİNDİRLER ÜZERİNE ETKİ EDEN SÜRÜKLEME KUVVETLERİNİN BELİRLENMESİ

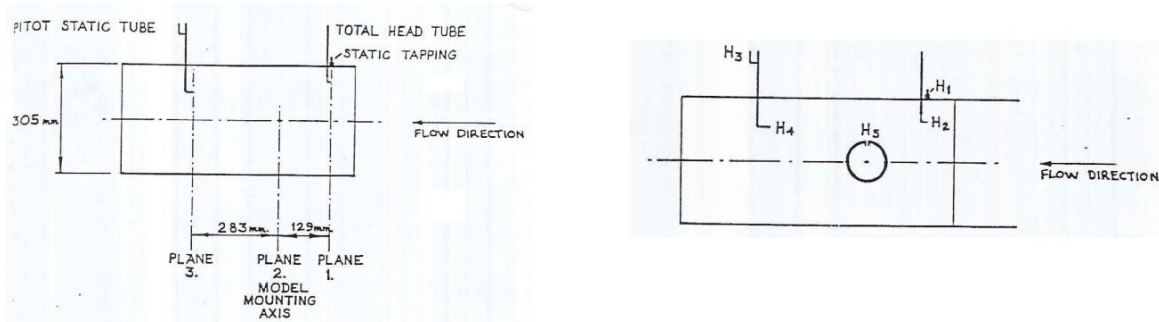
AMAC

Bu deneyin amacı, silindir üzerindeki statik basınç dağılımını, akışkan tarafından silindir üzerine uygulanan kuvveti ve silindir yüzeyindeki sürüklenme katsayısını belirlemektir. Deneyler farklı Reynolds sayıları ile yapılacaktır.

EKİPMAN

Bu deneyi gerçekleştirmek için bir açık devre tipi rüzgar tüneli kullanılmaktadır. Hava, uygun şekil verilmiş ve koruyucu bir ızgara ile kaplanmış bir alandan tünele girer. Deney sisteminin test kısmı şeffaf cam ile kaplanmışdır. Test kısmı kesit boyutları 305 mm x 305 mm'dir. Test kısmından sonra, difüzör ve aksel fan bulunmaktadır. Fan çıkışında akış hızı çift kelebek vana sayesinde kontrol edilmektedir. Fan susturucu ile çalışmaktadır.

Test bölümünde, bir adet toplam basınç tüpü, bir adet pitot-satik tübü, 24 bölümlük su manometresi, ve 64 mm çapında 305 mm uzunluğunda bir silindir bulunmaktadır. Silindir, basınç ölçüm uçları (tapları) ile birlikte yerleştirilmiştir (Şekil 1).

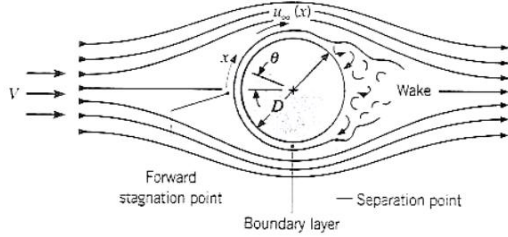


Şekil 1. Çalışma bölümünün şematik olarak görünümü

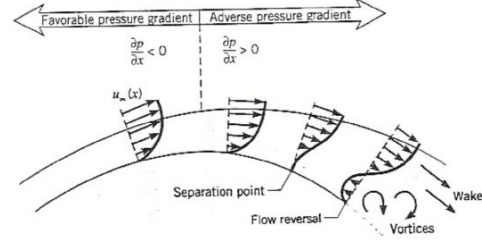
TEORİ

Şekil 2' de görüldüğü gibi, serbest akış ön durma noktasında basınç artışı ile birlikte durmaktadır. Bu noktadan sonra, basınç artan x (akım çizgisi koordinatı) yönünde azalır, ve sınır tabaka uygun bir basınç gradyanı etkisiyle gelişir ($dp/dx < 0$). Bununla birlikte, basınç silindirin sonunda en düşük değerine ulaşmakta ve silindirin arka kısmına doğru, sınır tabaka oluşumu ters yönde bir basınç gradyanının ($dp/dx > 0$) etkisinde kalır. Akışkan durma noktasındaki $u=0$ ' dan başlayarak, uygun basınç gradyanı ($dp/dx < 0$ olduğunda $du/dx > 0$) ile hızlanmaktadır, $dp/dx=0$ olduğunda en yüksek hıza ulaşır, ve ters basınç gradyanı sonucunda ise ($dp/dx > 0$ olduğunda $du/dx < 0$) yavaşlar. Akışkan yavaşlarken, yüzeydeki hız gradyanı, $(\partial u / \partial y)_{y=0}$, sıfır olmaktadır (Şekil 3). Ayrılma noktası denilen bu yerde, yüzeye yakın akışkanın basınç gradyanını yenmek için yeterli momentumu

yoktur ve aşağı yöndeki hareketi olanaksızdır. Arkadan gelen akışkan, geri yöndeki akışa engel olduğu için, sınır tabaka ayrılması oluşur. Bu noktada sınır tabaka yüzeyden ayrılır ve aşağı akış yönünde bir art bölge oluşur. Bu bölgedeki akış, girdapların oluştuğu, ve düzensiz bir akış olarak karakterize edilir.



Şekil 2. Silindir üzerinde akan akışta sınır tabaka oluşumu ve ayrılma



Şekil 3. Silindir üzerindeki akışta sınır tabakasının ve hız profillerinin şematik gösterimi

Reynolds sayısına bağlı olan sınır tabakanın laminerden türbülansa geçişi, ayrılma noktasının konumundan büyük ölçüde etkilenir. Silindir için karakteristik uzunluk çapıdır ve Reynolds sayısı,

$$Re_D = \frac{\rho u D}{\mu} = \frac{u D}{\nu} \quad (1)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada, ρ havanın yoğunluğu olarak ifade edilir ve değeri ise 1.24 kg/m^3 , ν hızı Bernoulli denkleminde aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir:

$$u = (2\Delta h / \rho)^{1/2} \quad (2)$$

Rüzgar tüneli içerisinde ölçülen basınç düşümü mmSS ile ifade edilir.

$$1 \text{ mm H}_2\text{O} = 9.81 \text{ N/m}^2$$

Burada, Δh dinamik basıncı ifade etmektedir ve 1 nolu düzlemde elde edilmektedir.

$$\Delta h = H_2 - H_1 \quad (3)$$

3 nolu düzlemde ise,

$$\Delta h = H_4 - H_3 \quad (4)$$

Türbülans sınır tabakada akışkanın momentumu, laminer sınır tabakadaki akışkanın momentumundan büyük olduğu için, laminerden türbülansa geçişin ayrılmayı daha ilerideki bir noktaya ertelenmesi beklenir. Ortalama hız değeri için sürtünme kuvveti değeri bulunurken, model üzerindeki blokaj etkisinin oluşmasına izin verildiğine dikkat edilmelidir. Bu durum için düzeltme faktörü 1.06' dır.

Yukarıda sözü edilen olgular, silindire etki eden F_D sürüklenme kuvvetini büyük ölçüde etkiler. Bu kuvvetin iki bileşeni vardır. Bunlardan birincisi sınır tabaka yüzey kayma gerilmesinden kaynaklanır ve sürtünme direnci olarak adlandırılır. Diğeri ise, art bölgenin oluşumundan kaynaklanan akış yönündeki basınç farkı ile ilişkilidir ve biçim direnci veya basınç direnci olarak bilinir. Sürüklenme kuvveti aşağıdaki şekilde belirlenebilir;

$$F_3 = (P_3 - P_1)A + \rho A(u_1^2 - u_3^2) \quad (5)$$

burada $P_1 = H_1g$ ve $P_3 = H_3g$ olarak elde edilir. Sürüklenme kuvvetinin hesaplanmasından sonra, sürüklenme katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$C_D = F_D / A_f (\rho u^2 / 2) \quad (6)$$

burada A_f , silindirin akışa dik düzlem üzerindeki izdüşüm yüzey alanını (serbest akış yönü hız bileşenine dik doğrultudaki izdüşüm alanı), F_D ise akışkan tarafından silindire etki eden sürüklenme kuvvetini ifade etmektedir.

DENEYİN YAPILIŞI:

Deneyler, silindir yüzeyi boyunca basınç değişimini farklı Reynolds sayıları için elde etmek amacıyla yapılacaktır. Ölçülen basınç değerleri kullanılarak, sürüklenme katsayısı, C_D , elde edilecektir. Deneyi tamamlamak için, aşağıdaki işlemler akışkanın (havanın) farklı hızları (Reynolds sayısı) için tekrar edilecektir.

- Silindiri açılı pozisyonda yerleştiriniz?
- Tünelin çıkış kısmında bulunan çift kelebek vanayı istenilen Reynolds sayısını sağlayacak şekilde ayarlayın.
- Silindiri döndürerek farklı açılı pozisyonlar için silindir üzerindeki farklı noktalarda basınç değerlerini ölçün.
- Havanın hızını değiştirerek (kelebek vananın pozisyonunu değiştirerek) yukarıdaki işlemleri tekrarlayın.

VERİ ANALİZİ

1. Dairesel silindir çevresindeki basınç dağılımını çiziniz (en yüksek hız değeri için bir grafik)
2. Silindir çevresindeki basınç dağılımı H_5 değerinin θ değerleri ile değişiminin grafiğini çizdiriniz ve basınç değerinin minimum olduğu yerde ayrılma noktasının açı değerini belirleyiniz (bir grafik üzerinde üç doğru çiziniz)
3. Denklem 5' i temel denklemleri (Momentum ve süreklilik denklemleri) kullanarak elde ediniz.
4. Sürüklenme kuvvetinin Reynolds sayısı ile değişiminin grafiğini çiziniz.
5. Artan Reynolds sayıları ile ayrılma açısı nasıl bir değişim gösterir?
6. Artan Reynolds sayısı ile sürtünme ve ayrılma değerleri nasıl etkilenir?
7. Sürüklenme kuvveti, C_D , değerinde sınır tabaka geçişinden dolayı büyük bir düşme meydana gelir. Ayrılma, art bölge ve biçim direnci değeri nasıl etkilenir?
8. Sınır tabaka geçişinin olup olmadığını açıklayın.
9. Rüzgar tüneline meydana gelen blokajı belirleyin.
10. Silindirin çapı 64 mm' den daha büyük olursa, ne olur?
11. Statik basınç duvar üzerindeki statik basınç tablalarından veya statik basınç probundan yararlanılarak ölçülmüştür. Bu iki yöntem arasındaki fark nedir?

SİMGELER

A	Tünelin kesit alanı	m^2
A_f	Silindirin ön yüz alanı	m^2
C_D	Sürtünme kuvveti	
D	Silindirin çapı	m
F_D	Sürtünme kuvveti	N
H_1	Çalışma alanına girişteki statik basınç	mmH ₂ O
H_2	Çalışma alanına girişteki toplam basınç	mmH ₂ O
H_3	Modelin alt kısmındaki statik basınç	mmH ₂ O
H_4	Modelin alt kısmındaki toplam basınç	mmH ₂ O
H_5	Model üzerinde basınç tapındaki statik basınç	mmH ₂ O
H_θ	Modelin θ açısı kadar döndürülmesindeki statik basınç	mmH ₂ O
Δh	Dinamik basınç	mmH ₂ O
Re	Silindir için Reynolds sayısı	
u	Hız	m/s
θ	Üst tarafındaki pozisyondaki basınç tabından itibaren döndürülen silindirin açısı	degs
ρ	Havanın yoğunluğu	kg/m ³
ν	Havanın kinematik viskozitesi	m ² /s
μ	Havanın dinamik viskozitesi	kg/ms

KAYNAKLAR

1. Incropera, F.P. and Dewitt, D.P., "Introduction to Heat Transfer", Third Edition, John Wiley and Sons, 1996.
2. Fox, R.W. and McDonald, A.T., "Introduction to Fluid Mechanics", Fourth Edition, John Wiley and Sons, 1994.
3. Cengel, Y.A., "Heat Transfer", Mc Graw Hill, 1998.

H ₁ =	(mmH ₂ O)
H ₂ =	(mmH ₂ O)
H ₃ =	(mmH ₂ O)
H ₄ =	(mmH ₂ O)
θ (deg)	H ₅ (mmH ₂ O)
0	
20	
40	
60	
80	
100	
120	
140	
160	
180	

H ₁ =	(mmH ₂ O)
H ₂ =	(mmH ₂ O)
H ₃ =	(mmH ₂ O)
H ₄ =	(mmH ₂ O)
θ (deg)	H ₅ (mmH ₂ O)
0	
20	
40	
60	
80	
100	
120	
140	
160	
180	

H ₁ =	(mmH ₂ O)
H ₂ =	(mmH ₂ O)
H ₃ =	(mmH ₂ O)
H ₄ =	(mmH ₂ O)
θ (deg)	H ₅ (mmH ₂ O)
0	
20	
40	
60	
80	
100	
120	
140	
160	
180	
200	
220	
240	
260	
280	
300	
320	
340	
360	

DENEY - 8**DOĞAL KONVEKSİYON İLE ISI TRANSFERİ****1. GİRİŞ**

Bir çok endüstriyel uygulamada ısı transferi doğal konveksiyon yolu ile gerçekleşmektedir. Bu uygulamalarda ısı transferi katsayısının belirlenmesi sistem tasarımı bakımından çok önemlidir.

Bu deneyin amacı dikey bir kanalın yan duvarına yerleştirilen kanatçıklı bir yüzyedeki ısı transferinin incelenmesi ve bu yüzyedeki ısı transferi katsayısının belirlenmesidir.

2. TEORİ

Bir yüzey ile bu yüzeyin üzerinden geçen akışkanın sıcaklıklarının farkı nedeniyle meydana gelen ısı transferi Newton'un soğutma kanunu kullanılarak,

$$Q = h.A.(T_{\text{yüzey}} - T_{\text{akışkan}}) \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada

Q : Konveksiyon ısı transferi (W),

h : Yüzeyin konveksiyon ısı transferi katsayısı (W/m^2K),

A : Isı transferi yüzey alanı ($A = 0,13 m^2$),

$T_{\text{yüzey}}$: Yüzey sıcaklığı (K),

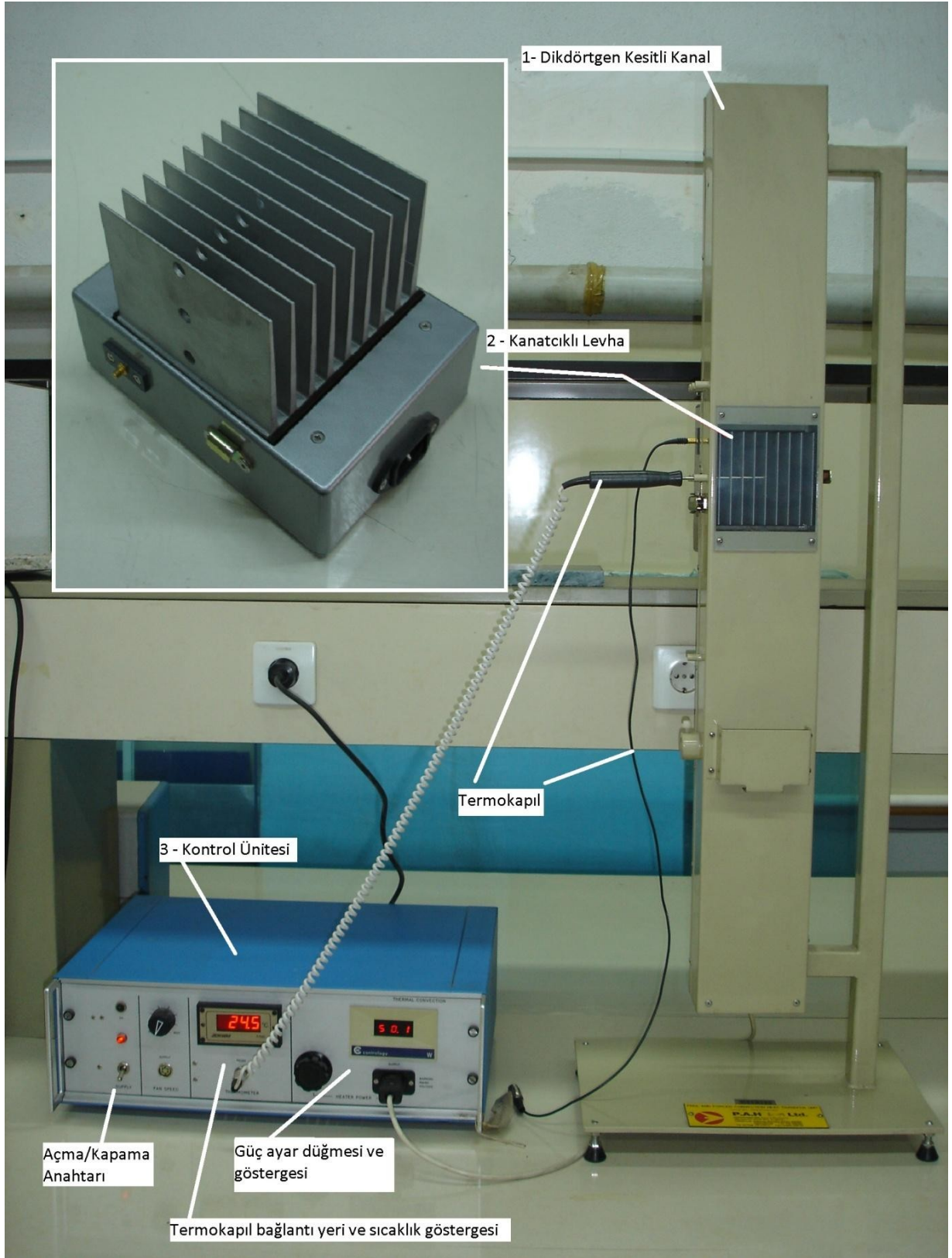
$T_{\text{akışkan}}$: Akışkan sıcaklığı (K)'dir.

Eğer bir yüzeyden olan konveksiyon ısı transferinin miktarı, yüzey sıcaklığı ve akışkan sıcaklığı biliniyorsa o yüzyedeki ısı transferi katsayısı Denklem (1) kullanılarak hesaplanabilir.

3. DENEY DÜZENEGİ

Bu deneyde kullanılan deney düzeneği Şekil 1. de gösterilmiştir.

Deney düzeneği dikdörtgen kesitli bir kanal (1), bu kanal içerisine yerleştirilen kanatçıklı levha (2) ve güç kontrolü ile sıcaklık ölçümlerini yapmakta kullanılan bir kontrol ünitesinden oluşur (3). Sıcaklık ölçümlerinin alınmasında termokapılardan faydalanılır (4).



Şekil 1. Deney Düzeneği

4. DENEYİN YAPILIŞI

Deneyin yapılışında izelenecek yol aşağıda açıklanmıştır.

1. Kanatçıklı levha kanal içerisindeki bölmeye yerleştirilir ve sabitlenir.
2. Kontrol ünitesi ile kanatçıklı levhanın güç bağlantıları yapılır.
3. Kontrol ünitesinin fişi güç kaynağına bağlanır ve üzerinde bulunan açma kapama anahtarı açılır.
4. Isıtıcı gücü kontrol ünitesi üzerinden istenilen değere ayarlanır.
5. Sistem sürekli rejim şartlarına gelene kadar plaka yüzey sıcaklığı belirli aralıklarda ölçülerek kaydedilir. (Ek 1.)
6. Sistem sürekli rejim şartlarına geldikten sonra sırasıyla A, B, C, noktalarındaki sıcaklıklar ölçülür. (Ek 1.)
7. Yukarıdaki işlemler farklı ısı akıları için tekrarlanır.
8. Deney sonunda
 - a. Kontrol ünitesi üzerindeki açma kapama anahtarı kapatılarak güç ünitesinin fişi çekilir.
 - b. Kontrol ünitesi ile güç kaynağı arasındaki bağlantı sökülür.
 - c. Kanatçıklı levha kanal içerisinden çıkartılır.

Not: Deney sırasında elektrik ile ilgili güvenlik kurallarına uyulması zorunludur. Bunun yanısıra özellikle kanatçıklar ısınacağından montaj ve sökme işlemlerinde sıcaklıklara dikkat edilmesi gerekmektedir.

5. SONUÇLAR

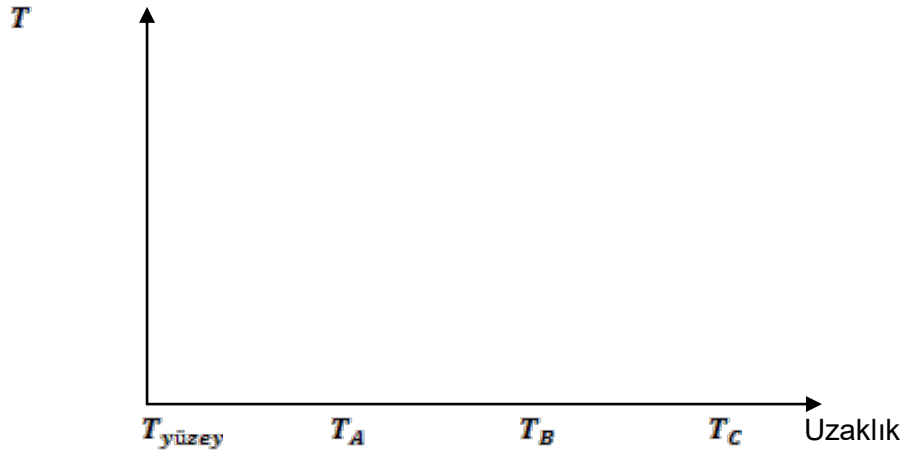
Deney sonucunda çizilmesi istenilen grafikler ve yapılması istenilen hesaplamalar aşağıda belirtilmiştir.

1. Sistem sürekli rejim şartlarına gelirken ölçülen sıcaklıkları kullanarak *Plaka yüzey sıcaklığı - Zaman* grafiğini (Ek 2.) çiziniz. (Her ısı akısı için ayrı ayrı çizilecektir.)
2. Sistem sürekli rejim şartlarına geldikten sonra ölçülen sıcaklıkları kullanarak *Kanatçık yüzey sıcaklığı - Uzaklık* grafiğini (Ek 3.) çiziniz. (Her ısı akısı için ayrı ayrı çizilecektir.)
3. Sistem sürekli rejim şartlarına geldikten sonra ölçülen sıcaklıkları kullanarak Ortalama ısı transferi katsayısını hesaplayınız. (Her ısı akısı için ayrı ayrı hesaplanacaktır.)
4. *Isı transfer katsayısının - Isı akısı* ile değişimi grafiğini (Ek 4.) çiziniz.

Ek 1. Ölçüm tabloları

Deney No:			
Q:			
Zaman			...
$T_{yüzey}$...

Deney No	Q	$T_{giriş}$	$T_{yüzey}$	T_A	T_B	T_C

Ek 2. Plaka yüzey sıcaklığı - Zaman grafiği**Ek 3. Kanatçık yüzey sıcaklığı - Uzaklık grafiği****Ek 4. Isı transfer katsayısının - Isı akısı ile değişimi grafiğini**