

ÖZET

DIKEY BİR LEVHADA DOĞAL ISI TAŞINIMININ ROBOT KOL KULLANILARAK İNCELENMESİ

ATABAŞ İrfan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. İbrahim UZUN

Haziran 2006, 74 sayfa

Dikey ve sabit yüzey sıcaklığındaki bir plakada doğal ısı taşınımı büyüklüklerinin deneysel olarak ölçülmesi yapılmıştır. Sabit sıcaklıkta bir yüzey elde etmek için kaynama sıcaklığındaki bir akışkan deposu kullanılmış ve depo sıcaklığının değişmemesi için kaynama sıcaklığına ayarlanmış bir termostat bağlantılı ısıtıcı kullanılmıştır. Yüzeyin istenilen noktasına konumlandırılabilen dört kol serbestlik derecesine sahip ve kartezyen koordinatlarda üç boyutlu çalışan robot kol tasarımı yapılmıştır. Robot kolunu hareket ettiren adım motorlarından biri bir ray üzerinde robot kolun (x) yönündeki hareketini, diğer üç adım motoru ise robot kolun (y-z) düzleminde hareket etmesini sağlamaktadır. Bu plaka yüzeyinde istenilen noktaya(x,y,z) konumlandırılabilen robot kolunun en uç noktasına yerleştirilen hız veya sıcaklık algılayıcı büyüklüğü okuyarak sisteme bağlı bilgisayara

aktarmaktadır. Bilgisayarda çalışan bir program ve bu programın ara yüzü ile kontrol edilebilen robot kolu istenilen noktadaki sıcaklık veya hız değerlerini okumaktadır. Okunan sıcaklık değerleri bir bütünlük içerisinde değerlendirilerek dikey doğrultuda sıcaklık dağılımları grafiksel olarak elde edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar ile analitik olarak hesaplanan büyüklükler karşılaştırmalı olarak tablo ve grafiklerle verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Robot kol, dikey levha, sıcaklık algılayıcılar, doğal taşınım.

ABSTRACT

AN INVESTIGATION ON NATURAL HEAT CONVECTION IN A VERTICAL PLATE USING ROBOT ARM

ATABAŞ İrfan

Kırıkkale University

Graduate School Of Natural Applied Sciences

Division of Mechanical Engineering, M. Sc Thesis

Supervisor: Associate Professor İbrahim UZUN

June 2006, 74 pages

In this study, an experimental work was performed to measure natural heat convection parameters (temperature and air velocity) in a vertical plate with a constant surface temperature. In order to obtain a constant surface temperature a fluid reservoir at boiling temperature was used. A heater with a thermostat set to boiling temperature was utilized to keep reservoir's temperature at a constant level. A robot arm was designed to reach any desired point at the surface. It has four degrees of freedom and can operate three dimensionally in x, y and z cartesian coordinates. One of the step motors moves the robot arm in x direction, while the other three step motors move it in y-z plane. A velocity or temperature sensor can be mounted at the tip of the robot arm to read air velocity and temperature values at any point.

The data can then be transferred to a computer for graphical and tabular analysis. A software written in Visual Basic was developed to control the robot arm. The experimental and analytical results were compared both graphically and in tabular form.

Key Words: Robot arm, vertical plate, temperature sensor, naturel convection

SİMGELER DİZİNİ

q	Geçen Isı Miktarı (W)
A	Kesit Alanı (m ²)
L	Uzunluk (m)
T	Sıcaklık (K)
k	Isı İletim Katsayısı, (W/m.K)
h	Isı Taşınım Katsayısı, (W/m ² K)
T _∞	Yüzey Sıcaklığı, (K)
T _w	Akışkan Sıcaklığı, (K)
σ	Stefan-Boltzman sabiti (σ=5.67.10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴)
ε	Isı Yayınım Katsayısı
F	Geometrik Biçim Katsayısı
η	Benzerlik Parametresi
X	Boyutsuz Koordinat(x/L)
Y	Boyutsuz Koordinat (y/L)
x,y	Koordinat
Gr _L	Grashof Sayısı
β	Hacimsel Genleşme Katsayısı
θ	Boyutsuz Sıcaklık
h	Isı Taşınım Katsayısı (W/m ² K)
τ,u	Boyutsuz Zaman
v	Hız(m/s ²)

P	Basınç (Pa)
L	Uzunluk (m)
g	Yerçekimi Kuvveti (m/s^2)

ÖZET	i
1 GİRİŞ.....	1
2 MATERYAL VE YÖNTEM	8
2.1 Endüstriyel Robotun Tanımı Ve Tasarım Şekilleri	8
2.2 Robot Şekilleri(Konfigürasyonları)	8
2.3 Robotların Kullanıldığı Yerler.....	10
2.4 Robot Kolun Yapımında Kullanılan Malzemelerin Temel Özellikleri	11
2.4.1 Adım Motorlarının Özellikleri	13
2.4.2 Adım Motoru Çeşitleri Ve Çalışma Yöntemleri	13
2.4.3 Adım Motorlarına Ait Önemli Parametreler	17
2.4.4 Adım Motorlarının Uyarımı	19
2.5 Deney Robotun genel özellikleri	21
2.6 Sıcaklık Algılayıcısı.....	24
2.7 Motor Sürücü Devresi	26
2.7.1 Mikrodenetleyici Özellikleri	30
2.7.2 Kontrol Kartı	34
2.8 Bilgisayar Yazılımının Özellikleri.....	35
2.9 Doğal Isı Taşınımı	39
2.10 Isı İletimi	40
2.11 Isı Işınımı (Radyasyon).....	42
3 ARAŞTIRMA BULGULARI.....	44
3.1 Sayısal çözüm	44
3.2 Analitik Hesap.....	48
3.3 Deneysel Ölçümler	50

4	TARTIŞMA VE SONUÇLAR	57
i)	Robot Resimleri	61
ii)	Baskı Devre.....	61
iii)	Program Kaynak Kodları	62
	Kaynaklar	71

1 GİRİŞ

İnsanlığın kendine yardımcı olacak mekanizmalar düşünmesi, tahminlerimizden çok daha öncelere uzanmaktadır. MÖ 800'de Homeros İlyada adlı eserinde verilen görevleri yerine getirebilen hareketli 3 ayaklılardan bahseder. MÖ 350'de Aristo, bir eserinde "eğer her araç kendi işini görebilseydi, insan eline ihtiyaç duymadan mekik kendi dokuyabilseydi, lir kendi kendine çalabilseydi, yöneticilerin elemanlara ihtiyacı kalmazdı," diyerek ilk otomasyon fikrini ortaya atar. 13. yüzyılda ise Eb-ul-iz-el-Cezeri, otomatlar hakkında bir kitap yazar. Kitapta 300'e yakın otomatik mekanizmanın yanı sıra, çamaşır teknesini doldurup boşaltabilen otomatik bir arap kadını tasvir edilir.^[1]

Robot teknolojisi bu adı, çek oyun yazarı Karel Capek'in, "Rossum'un evrensel robotları (1921)" oyununa borçlu. Yazar, angarya-zorunlu anlamına gelen "robota" söz gücüyle işçi anlamına gelen "robotnik" sözcüğünü birleştirerek "robotic" kelimesini türetir.[1]

Robot; değişik işler için yeniden programlanan, malzeme, parça, ağırlık taşıyan, hızı ve konumu kontrol edilen; çok eklemli, çok fonksiyonlu bir araçtır. Robotları kullanmadaki temel sebep, üretimde kullanılan diğer otomatik makinelerden ziyade, her tarafa yönelebilir ve programlanabilir olmalarıdır. Bu her tarafa yönelebilme özelliği artan üretkenliğe, üretim kalitesine ve birçok bakımdan azalan üretim maliyetine olanak sağlar. Üretimi periyodik bir şekilde değişen piyasalarda, robot kullanma ve programlama maliyeti, karmaşık otomasyon makinelerini yeniden düzenlemenin maliyetinden daha düşüktür.^[2]

1988 yılında Tsuji ve Nagano izotermal dikey bir levha için deneysel çalışmalar yapmıştır.^[3] Türbülanslı akış şartlarında çözüm yapmışlardır. Deneysel sonuçların karşılaştırma unsuru olarak 1946 yılında Ostrach tarafından yapılan benzerlik çözümlerini kullanmışlar ve analitik çözümlerle uğraşmamışlardır.

Dochan Kwak ve arkadaşları tarafında dikey bir levha için sınır tabaka denklemleri nümerik metotlarla çözülmüştür.^[4] Bu çözümlerde bazı basitleştirmeler kullanılmış elde edilen denklem takımlarının çözümünde Jacobian matris metodu kullanılmıştır.

Eğitimde kullanılmak amacı ile tasarlanan endüstriyel bir robot, bilgisayar aracılığı ile konum kontrolü gerçekleştirmiştir.^[5] Eğitim amaçlı kullanılmak üzere tasarlanan endüstriyel bir robot, gövdesi çelik malzeme, ön kol ise ağaç malzemedir tasarlanmıştır. Eklem tahrikleri adım motorları ile bilgisayar kontrollü olarak sürülmüştür. Yazılan bilgisayar programı ile robot hareketleri kontrol edilmeye çalışılmıştır.

Saç plakaların taşınması için elektromekanik bir tutucu ile bu tutucuyu taşıyan SCARA tipi dört serbestlik dereceli bir robot kol tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirmiştir.^[6] Tasarlanan tutucu 2.5 kg ağırlığında olup ve 1 kg'a kadar ferromagnetik esaslı parçaları kaldırabilmektedir. Bu robot kolun, üç tane dönme serbestliği DC motorlarla, 1 tane ötelenme serbestliği ise pnömatik olarak sağlanmıştır.

Ortak çalışan iki serbestlik dereceli düzlemsel hareket yapan İki robot manipülatör tasarlanarak kontrolü gerçekleştirilmiştir. İki robot kolun ortak manipülasyonu ile bir cisim tanımlanan yörüngede hareket ettirilmeye

çalışılmıştır. Manipülatörün eklemlerine ait açısal konum ve açısal hız değerleri, hesaplanmış tork tekniği ile model esaslı PD kontrol (MRAC) ve model esaslı adaptif kontrol tekniklerine göre kontrol edilerek, hatayı minimum yapan parametreler araştırılmıştır. Tek robotlu manipülasyona göre dinamik modelde ve uygulanan kontrol tekniklerindeki temel özellikler ve farklılıklar belirlenmeye çalışılmıştır.^[7]

Kaynak işlemlerinde kullanılmak üzere genel amaçlı altı serbestlik dereceli endüstriyel robot tasarlanarak gerçekleştirilmiştir.^[8] Gerçekleştirilen robotta AC servo sistem ve AC fırçasız motorlar kullanılmıştır.

Esnek imalat sistemlerinde kullanılmak üzere üç serbestlik dereceli bir robot tasarlanmış ve uygulanmıştır.^[9] Tasarlanan endüstriyel robot, CNC tezgâhları ile birlikte aynı bilgisayardan kontrol edilmiştir. Modellenen robotun kontrol simülasyonları eklem uzayında kompanzasyonlu PD, hesaplanmış tork, ters kinematik, robust ve adaptif kontrol gibi kontrol teknikleri için gerçekleştirilmiştir. Bu robotta dönme hareketleri adım motorları tarafından sağlanmıştır.

Parça taşınması amacı ile beş serbestlik dereceli bir endüstriyel robot tasarlanmış ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. İstenen amaca uygun olarak beş serbestlik derecesi için robotun kinematik ve dinamik denklemleri çıkarılmıştır. Robot denetimi için PID kontrol algoritması kullanılmıştır.^[10]

Küçük yüklerin taşınması amacıyla esnek robot kol tasarlanmış ve gerçek zamanlı kontrolü gerçekleştirilmiştir.^[11] Düşük frekanslarda robotun çalışması durumunda robot ele olan etkileri de araştırılmıştır.

Üç serbestlik dereceli bir endüstriyel robotun dişli ve iletişim mekanizmaları araştırılmıştır.^[12] Elde edilen sonuçlara göre iki serbestlik dereceli bir robot tasarlanarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen robotun hesaplanmış tork tekniği kullanılarak kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Endüstriyel robotların kontrolünde çok çeşitli denetleyiciler kullanılmıştır. Bunlardan oransal(P), integral(I), ve türevsel(D) denetleyicinin toplamı olan PID denetleyiciler, süreç denetiminde çok yaygın kullanılmaktadır. Uygulamada en iyi bilinen PID denetleyicidir ve PLD denetleyicinin türev ve integral kısmının sisteme ayrı ayrı etkileri vardır, PID kontrol algoritması kullanarak çeşitli serbestlik derecelerinde endüstriyel robotlara uygulanmıştır.^[13, 14, 15]

Robotların belli yörüngelerde hareket ettirilmesinde programlanabilir lojik denetleyiciden (PLC) de faydalanılır. PLC'ler lojik tabanlı kontrol işlemlerinde kullanılır.^[16, 17] PLC'lerin günümüzde tarama hızı ve komut işleme hızları oldukça artmıştır. Bu nedenle bir PLC çok karmaşık bir sistemin kontrolünü yapabilmektedir.^[18] Kontaklı kumanda devreleri ile birlikte PID gibi yazılımla gerçekleştirilebilen her türlü denetleyici mümkün olabilmektedir.^[19] Kullanılan PLC modeline göre giriş çıkış sayısı değişir. Giriş ve çıkış sayılarının artması durumunda genişleme modülleri PLC'lere eklenerek giriş çıkış sayısı artırılabilir.^[20]

Robot kontrolünde PID kontrol algoritması dışında adaptif kontrol teknikleri ve zeki kontrol teknikleri de uygulanmıştır. Bu kontrol tekniklerinin uygulanması ile robotların öğrenebilmeleri sağlanmıştır. Değişik şartlar altında özellikle tekrarlı görevlerde kullanılan bu teknikler büyük performans

özelliği göstermektedir ve yüksek çalışma hızları ve taşınan yükteki değişmeler durumunda ortaya çıkacak istenmeyen etkileri dengelemektedirler.

Değişen durumlara uyum sağlayabilen adaptif yapılar kullanılarak robot kontrolü konusunda çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Kullanılan adaptif yapılardaki amaç, kontrol için en uygun sistem parametrelerini bulmak şeklindedir. [10, 12, 21, 22] Bazı belirsiz durumlarda daha iyi sonuç alınması için nöro-adaptif yapılarda kullanılmıştır.[23, 24]

Değişen durumlarda ne yapması gerekeceğini kendi kendine karar verebilen zeki robot sistemleri geliştirilmiştir. [25] Yapay sinir ağları robot manipülatörün kinematik ve dinamik denklemlerinin çözümünde kullanıldığı gibi robotun kontrolünde de kullanılmaktadır.[25, 26]

Robotikte yapay sinir ağları dışında zeki sistemler olarak bulanık mantık da kullanılmaktadır. Klasik PID yapıları, bulanık PID yapıları ve adaptif bulanık PID yapıları geliştirilmiştir.[27, 28] Bulanık kontrolde, sistem davranışını en iyi şekilde tanımlanabilmesini sağlayan bir matematiksel modelleme yöntemi kullanarak sistem değişkenleri dilsel olarak ifade edilir. Dilsel olarak ifade edilen sistem değişkenlerden faydalanılarak, kontrol edilen sistemin giriş ve çıkışı arasındaki optimum ilişki kuralları şeklinde ifade edilir. Bilgi tanımının dilsel olarak yapılması sayesinde kontrol stratejisi, bunun nasıl yapıldığı, bilginin açıklığı, hatırlanması, anlaşılması ve düzeltilmesi oldukça kolaylaşır, Robot sistemleri doğrusal olmayan sistemler olduğundan bulanık mantık kullanılması kolaydır.[27, 29]

Endüstriyel robotların kontrolünde kameralardan ve farklı sensörlerden de faydalanılmaktadır.^[14, 30, 31, 32, 33] Bu tür kontrollerde kamera çıkışı ile istenen robot el konumu arasındaki ilişki zeki kontrol teknikleri ile öğrenilmektedir.

Bu çalışma iki ayrı bölümden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi bir robot tasarımıdır. Bu tasarımda robotun temel özelliği; belirli bir bölgede üç boyutlu hareket etmesidir. Üç boyutlu hareket alanında istenilen koordinata (x,y,z) robot konumlanabilmektedir. Bu hareket için temel hesaplamalar bilgisayar yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise dikey bir levha yüzeyi ve yüzeye yakın noktalarda sıcaklık değerlerinin ölçülmesidir. Ölçülecek büyüklük robot kola takılacak algılayıcı çeşidine göre değişebilmektedir. Örneğin sıcaklık algılayıcısı yerine hız algılayıcısı veya basınç algılayıcısı bağlanabilir. Ancak bu çalışmada sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temelinde ve planlanan deneysel çalışmada istenilen noktaya algılayıcının elle konumlandırılmasındaki koordinat hatalarını azaltmaktır. Böylece hem bir robot tasarlanmış hem de bu robotu bir deney düzeneğinde kullanımı gerçekleştirilmiştir.

Robot kolun kontrolü bilgisayar yazılımı ile yapılmaktadır. Bu yazılımda robot kolun (x,y,z) koordinatında istenilen noktaya gitmesi sağlanabilmekte, istenilen noktaya giderken gidiş hızı ve yörüngesi belirlenebilmektedir. Robot kolda bulunan sınır anahtarları sayesinde robota bir başlangıç noktası belirlenebilmektedir. Program ile istenilen zamanda robotun başlangıç noktasına gitmesi sağlanabilir. Ayrıca programa bir koordinat listesi yüklenebilir robot bu listedeki koordinatlara gidip o noktaların sıcaklıklarını

sırayla kaydeder. İstenilen noktadaki sıcaklığı ölçerken sıcaklık algılayıcısının özelliğine bağlı olarak bir bekleme zamanı vardır. Bilgisayar yazılımı ile ölçüm sırasında bir bekleme zamanı ayarlanabilir. Veya ölçülen noktadaki sıcaklık değişiminin belirli bir noktaya kadar azalması beklenebilir.

2 MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Endüstriyel Robotun Tanımı ve Tasarım Şekilleri

Endüstriyel robot, genel amaçlı, insana benzer özelliklere sahip programlanabilir bir makinedir. Bir robotun insana benzeyen en önemli özelliği onun koludur. Tutma ve yerleştirme işlemlerinde robot kolu kullanılır. Robot kolu, başka bir makineyle birleştirilerek, malzemenin yüklenmesi ve takım değiştirme işlemini yapmaktadır. Kesme, şekil verme, yüzey kaplama, silindirik ve düzlem yüzey taşlama gibi imalat işlemlerini gerçekleştirir. Montaj ve kontrol uygulamalarında kullanılmaktadır.^[34]

2.2 Robot Şekilleri(Konfigürasyonları)

Bir robot hareketinin kapasitesi, kontrol edilebilmesi mümkün olan eksenlerdeki hareketlerle belirlenir. Sayısal denetimdeki hareketlere çok benzerdir. Endüstriyel robotlar değişik tip ve boyutlarda yapılmaktadırlar. Çeşitli kol hareketlerini yapabilirler ve farklı hareket sistemlerine sahiptirler. Endüstriyel robotlar genel olarak şu konfigürasyonlarda üretilmektedirler.^[35]

- a) Küresel (polar koordinat) konfigürasyonu
- b) Silindirik koordinat konfigürasyonu
- c) Mafsallı kol (jointed arm) konfigürasyonu
- d) Kartezyen koordinat konfigürasyonu



Şekil 2.1. Robot Şekilleri

Küresel Koordinat Konfigürasyonu: Çoğunlukla polar konfigürasyon diye adlandırılan küresel tasarım silindirik kol konfigürasyonunun değişik bir uyarlamasıdır. Her türlü uygulamada robot konfigürasyonunun sağladığı çalışma hacmi (çalışma zarfı) önemli bir yer tutar. Kol, küresel bir hacim içinde hareket eder. Robotun bir döner tabanı vardır ve teleskopik kolu yukarı-aşağı hareket ettirmek için bir mafsal kullanılır. Bu robot tipine örnek Unimate 2000 serisi robotlardır.

Silindirik Koordinat Konfigürasyonu: Silindirik kol tasarımı, çalışma bölgesinde engellerin olmadığı uygulamalarda kullanılır. Diğer yandan mafsallı bir robot engellerden kaçınmak için programlanabilir. Silindirik konfigürasyonunun tipik işi nesnelere bir yerden başka bir yere taşımaktır (al ve yerleştir). Bu konfigürasyonda, robot gövdesi düşey eksen etrafında dönebilen düşey bir kolondur. Kol kısmının bir kaç hareketli kısmı vardır. Bu hareketli kısımlar kolu yukarı-aşağı ve içeri-dışarı hareket ettirir ve bilek kısmının dönmesini sağlarlar.

Mafsallı Kol Konfigürasyonu: Bağlantı parçalarından oluşan robot kol konfigürasyonu genellikle antropomorfik veya mafsallı robot diye adlandırılır. Yaygın bir şekilde kullanılır, çünkü otomotiv endüstrisindeki nokta kaynağı ve boyama işlemlerinde olduğu gibi maharetli hareketleri yapabilecek kabiliyete sahiptirler. Mafsallı kol konfigürasyonu, insan kolunun yapısına benzer şekilde tasarlanmıştır. Robotun, insan omuzu, dirsek ve bilek mafsallarını yaptığı hareketlere benzer hareketleri yapabilmesi için hareketli parçaları mafsallarla birleştirilmiştir. Robot kol bir tabana bağlıdır. Bu taban kendi eksenini etrafında dönebilir.

Kartezyen Koordinat Konfigürasyonu: Bu konfigürasyon en kısıtlı hareket serbestine sahip robot tasarım şeklidir. Bazı parçaların montajı için gerekli işlemler kartezyen konfigürasyonlu robotlar tarafından yapılır. Bu robot şekli birbirine dik üç ekseninde hareket eden kısımlara sahiptir. Hareketli kısımlar X, Y ve Z kartezyen koordinat sistemi eksenlerine paralel hareket ederler. Robot, üç boyutlu dikdörtgen prizması hacmi içindeki noktalara kolunu hareket ettirebilir.

2.3 Robotların Kullanıldığı Yerler

Günümüzde robotların büyük bir çoğunluğu endüstride kullanılıyor. Bunun nedeniyse robotların hassaslık ya da güç gerektiren işleri, büyük bir hızla hatasız olarak yerine getirebilmeleri. Bu yüzden robot teknolojilerini geliştirmede büyük şirketler (Sony, Honda) üniversiteler ve teknoloji kurumlarıyla baş başa gitmektedirler.

Robotlar, endüstriden başka okyanusların derinlikleri, volkanın kraterleri gibi insanların çalışamayacağı yerlerde de sıklıkla kullanılıyor. İnsanların gidemeyeceği yerlere onlarca mini robot gönderilerek araştırmalar yapılıyor. NASA da robotları uzay araştırmalarında sıklıkla kullanılmakta Mars'a gönderilen Pathfinder, Spirit, Opportunity bunların sadece birkaçı. NASA'nın hedefiyse diğer gezegenlerde bizim yerimize hayat arayacak robotlar bulmak belki yaşam ışık hızıyla gitsek bile bizden yüzlerce belki de binlerce yıl uzakta hiçbir insan ömrü buna yetmeyeceği için şimdilik en iyi fikir robotlar.

Massachusetts Teknoloji Enstitüsünde (MIT) geliştirilen 'kısmet' adlı robot, yüz ifadeleri olarak adeta bir insan. İnsanların yüzlerini tanımlayıp, korku, merak mutluluk gibi ifadeleri taklit edebiliyor. Ve daha birçok yerde robotlar kullanılıyor ve her geöen gün bu oran biraz daha artıyor.

2.4 Robot Kolun Yapımında Kullanılan Malzemelerin Temel Özellikleri

Adım motorları: Herhangi bir mekanik sistemin hareketinin sağlanabilmesi için motorlara ihtiyaç vardır. Robot mekaniğinin uzayda herhangi bir noktaya ulaşabilmesi için, pozisyon kontrollü motorlar veya pnömomatik, hidrolik sistemler kullanılır. Servo veya fırçasız DC motorlarda çalışma gerilimi veya yük değişikliğinde motor devri değişebilmektedir. Bu motorlarda geri beslemeli bir kontrol sisteme ihtiyaç duyulur. Geri beslemesiz sistemlerde bu motorlar sabit pozisyonda kalmazlar. Motor gücü, yük torkundan fazla olan adım motor uygulamalarında geri beslemeli sistemlere ihtiyaç duyulmayabilir. Adım motorları diğer motor türleri gibi elektrik

enerjisini, mekanik enerjiye çevirirler. Fakat adım motorları diğer motor türlerinden farklı olarak yönü, hızı dijital kontrollü olmasıdır.

Açısal konumu adımlar halinde değiştiren, çok hassas sinyallerle sürülen motorlara adım motorları denir. Adım motoru motorun sargılarına uygun sinyaller gönderilerek kontrol edilir. Herhangi bir uyarımda, motorun yapacağı hareketin ne kadar olacağı, motorun adım açısına bağlıdır. Adım açısı motorun yapısına bağlı olarak $3,6^\circ$ $1,8^\circ$ veya daha değişik açılarda olabilir. Bu projede kullanılan motorlar $1,8^\circ$ dir. Motora uygulanacak sinyallerin frekansı değiştirilerek motorun hızı kontrol edilebilir. Adım motorlarının dönüş yönü uygulanan sinyallerin sırası değiştirilerek saat ibresi yönü (CW) veya saat ibresinin tersi yönünde (CCW) olabilir.

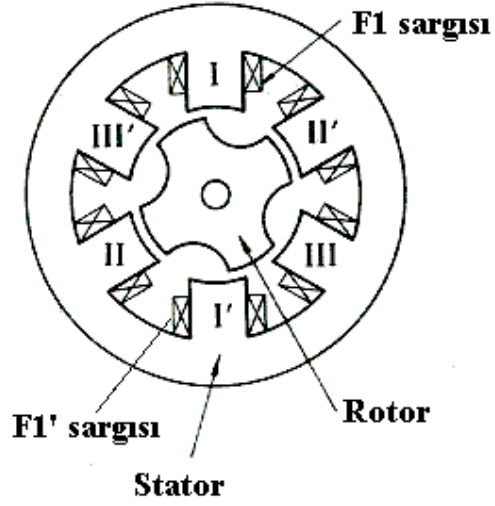
Adım motorlarının hangi yöne doğru döneceği, devir sayısı, dönüş hızı gibi değerler mikroişlemci veya bilgisayar yardımı ile kontrol edilir. Sonuç olarak adım motorlarının hızı, dönüş yönü ve konumu her zaman bilinmektedir. Bu özelliklerinden dolayı bu projede adım motorları seçilmiştir. Adım motorlarının kullanıldıkları yerlere örnek olarak, endüstriyel kontrol teknolojisi içerisinde bulunan bazı sistemler, robot sistemleri, takım tezgahlarının ayarlama ve ölçmeleri verilebilir. Ayrıca, adım motorları konumlandırma sistemlerinde ve büro makineleri ile teknolojisi alanında da kullanma alanı bulmaktadır.

2.4.1 Adım Motorlarının Özellikleri

- Geri beslemeye ihtiyaç göstermezler. Açık döngülü olarak kontrol edilebilirler.
- Motorun hareketlerinde konum hatası yoktur.
- Sayısal olarak kontrol edilebildiklerinden bilgisayar veya mikroişlemci gibi elemanlarla kontrol edilebilirler.
- Mekanik yapısı basit olduğundan bakım gerektirmezler.
- Herhangi bir hasara yol açmadan defalarca çalıştırılabilirler.
- Adım açıları sabit olduğundan hareketleri sürekli değil darbelidir.
- Sürtünme kaynaklı yükler, açık döngülü kontrolde konum hatası meydana getirirler.
- Elde edilebilecek güç ve moment sınırlıdır.

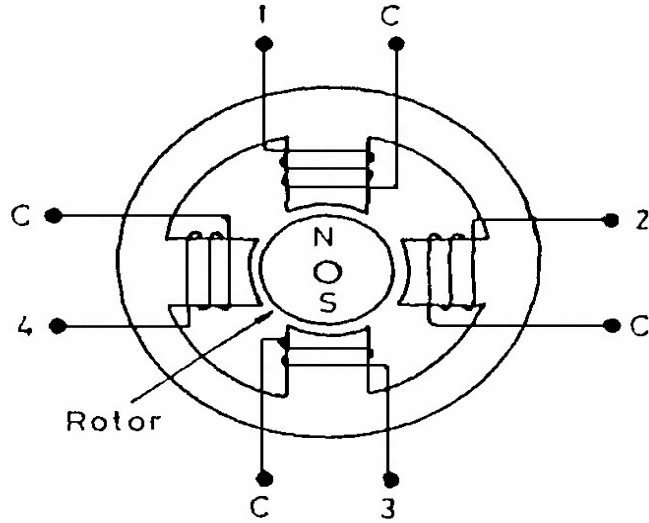
2.4.2 Adım Motoru Çeşitleri Ve Çalışma Yöntemleri

Değişken relüktanslı adım motoru en temel adım motoru tipidir. Bu motorun temel prensiplerinin daha iyi anlaşılabilmesi için kesit görünüşü Şekil 2.2 de gösterilmiştir. Bu üç-fazlı motorun 6 adet stator kutbu vardır. Birbirine 180° açılı olan herhangi iki stator kutbu aynı faz altındadır. Bunun anlamı, karşılıklı kutupların üzerindeki sargıların seri veya paralel olması demektir. Rotor 4 adet kutba sahiptir. Stator ve rotor nüveleri genellikle ince tabakalı silisli çelikten yapılırlar.



Şekil 2.2. DR adım motoru

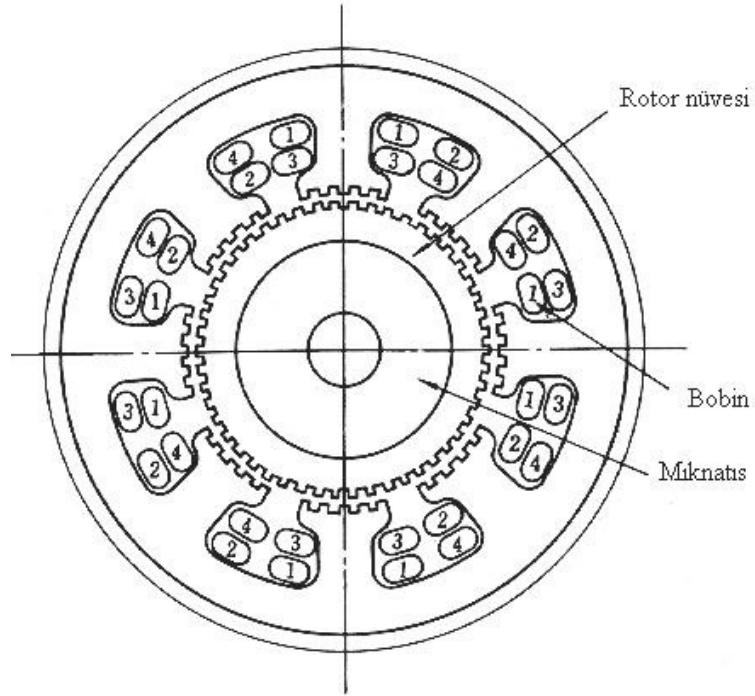
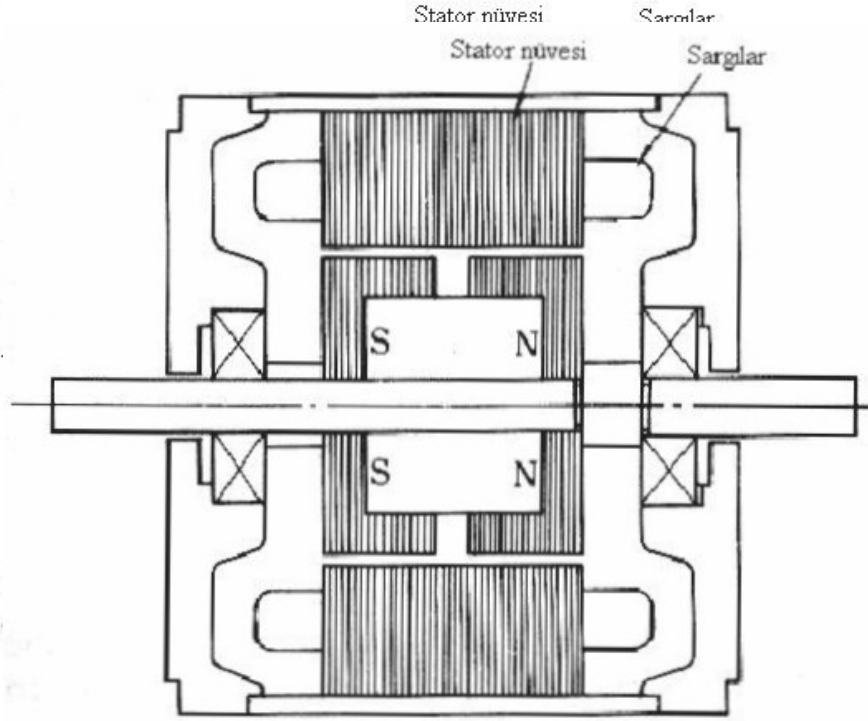
Rotorunda sabit mıknatıs kullanılan adım motoruna sürekli mıknatıslı adım motoru adı verilir. 4-fazlı bir SM adım motorunun bir örneği Şekil 2.3'de gösterilmiştir. Silindirik sabit mıknatıs rotor gibi çalışır, etrafında ise her biri üzerine sargılar sarılı olan 4 adet kutbun bulunduğu stator vardır.



Şekil 2.3. 4-fazlı bir SM adım motoru

Burada C ile adlandırılan terminal, her bir fazın birer uçlarının birleştirilerek güç kaynağının pozitif ucuna bağlandığı ortak uçtur. Eğer fazlar Faz1, Faz2, Faz3, Faz4 sırasıyla uyarılırsa; rotor saat ibresi yönünde (CW) hareket edecektir. Bu motorda, adım açısının 90° olduğu açıkça görülmektedir. SM adım motorunda adım açısını azaltmak için, manyetik kutup sayısı ile birlikte stator kutup sayısı arttırılmalıdır. Fakat her ikisinin de bir sınırı vardır. Buna alternatif olarak küçük adım açılına sahip karışık yapıdaki SM adım motorları kullanılmaktadır.

Rotorunda sabit mıknatıs bulunan bir diğer adım motoru da karışık yapılı adım motorudur. Karışık kelimesi motorun sabit mıknatıslı ve değişken relüktanslı motorların prensiplerinin birleşmesinden dolayı verilmiştir. Günümüzde çok geniş bir kullanım alanına sahip olan karışık adım motorunun yapısı Şekil 2.3'te verilmiştir. Statorun nüve yapısı değişken relüktanslı adım motorunun aynısı veya çok benzeridir. Fakat sargıların bağlantısı değişken relüktanslı motorunkinden farklıdır. Değişken relüktanslı adım motorunda bir kutupta bir fazın iki sargısından sadece bir tanesi sarılmış iken, 4 fazlı karışık yapılı adım motorunda iki farklı fazın sargıları aynı kutupta sarılmıştır. Bundan dolayı bir kutup sadece bir fazın altında değildir. Karışık yapılı adım motorlarında moment, diş yapılarındaki hava aralıklarının manyetik alanlarının etkileşimi ile oluşturulur. Bu tip motorlarda sürekli mıknatıs, sürücü kuvveti oluşturmak için önemli rol oynamaktadır. Fakat karışık yapılı adım motorundaki rotor ve stator dişlerinin küçük adım açıları elde etmek için tasarlanmıştır. Projede karışık yapılı adım motoru kullanılmıştır.



Şekil 2.4. Karışık yapılı adım motorunun yapısı

2.4.3 Adım Motorlarına Ait Önemli Parametreler

Adım açısı: Motora bir pals uygulandığında, rotorun hareket edebileceği açı miktarına adım açısı denir. Motor devri iki parametreye bağlıdır. Bunlar; adım açısı ve adımlama oranıdır. Rotorun ortalama devri $n(d/dk)$, adım açısı Y mekan iki derece olsun. Bu iki parametre arasındaki ilişki $n=Y*2/60$ dir.

Doğruluk: Bir adım motorunun adım konumu, tasarım ve üretim sırasında bir araya getirilen birçok parçanın boyutları ile belirlenir. Bu parçaların boyutlarındaki toleranslar ve dahili sürtünmeler adımların nominal denge konumlarında da toleranslara neden olurlar. Bu durum adım motorunun doğruluğu olarak isimlendirilir ve belli bir konumdaki maksimum açısal hatanın nominal tek adım değerinin yüzdesi olarak ifade edilmiş halidir. Klasik adım motorlarında bu hata % 0,1 ile % 0,5 arasında değişmektedir. Sürtünme momenti veya kuvveti nedeniyle oluşan konum hataları bu doğrulukla ilgisi olmayan, daha az veya çok olabilen rasgele hatalardır. Ancak her iki tip hata toplanarak sistemin toplam hatası elde edilir.

Tutma momenti: Tutma momenti, bir adım motorunun en temel moment karakteristiğidir. Tutma momenti eğrisi, motorun ürettiği tutma momentinin rotor konumuna bağlı olarak değişimini veren eğridir. Eğrinin merkezi motorun bir fazının uyarılmış olduğu durumda rotorun kararlı adım konumuna karşılık düşer. Bu eğri, rotor adım pozisyonundan uzaklaştırılırsa, motorda indüklenerek olan ve rotoru sıfır momentli adım pozisyonuna geri getirmeye çalışan momentin (tutma momenti) yönünü ve miktarını verir. Tutma momenti eğrisi, motorun tüm rotor konumları ve statik uyarma

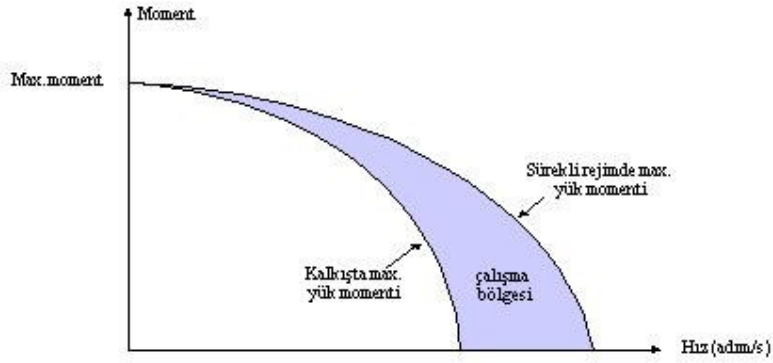
koşullarındaki ani momentini tam olarak tanımlamak için gereklidir. Diğer moment karakteristikleri (statik ve dinamik) bu eğri temel alınarak elde edilebilir.

Tek adım tepkisi: Motor fazlarından biri uyarılmış durumdaysa motor kararlı bir adım konumundadır. Bu fazın uyarılması kesilip yeni bir faz uyarılırsa motor bir adım atacaktır. Rotor konumunun zamana göre bu değişimi tek adım tepkisi olarak tanımlanır. Tek adım tepkisi, motorun adım hareketinin hızını, tepkinin aşım ve salınım miktarını, adım açısının hassaslığını veren önemli bir karakteristiktir. Adım motorlarından maksimum performans elde edebilmek için tek adım tepkisindeki aşım ve salınımların azaltılması ve yerleşme zamanının kısaltılması gerekmektedir. Bu nedenle tek adım tepkisinin iyileştirilmesi adım motorlarının kontrolünde çok büyük öneme sahiptir.

Sürekli rejimde maksimum yük momenti eğrisi: Sürekli rejimde maksimum yük momenti/ hız eğrisi herhangi bir sabit dönüş hızında, rotor hareketinin giriş darbe dizisiyle olan senkronizasyonunu bozmadan ve rotorun durmasına neden olmadan sürekli halde motor miline uygulanabilecek maksimum yük momentini verir. Bu moment aynı zamanda, söz konusu hızda motorda meydana gelecek maksimum moment anlamına da gelmektedir. Klasik motorlarda bu eğriye karşılık gelebilecek bir karakteristik yoktur. Maksimum yük momenti eğrisi çalışma noktalarını göstermediği gibi bir transfer fonksiyonu eğrisi de değildir. Sadece, çalışma bölgesini sınırlar. Bu eğrinin sınırladığı bölge içinde herhangi bir noktada motor giriş darbe dizilerini

kaybetmeden ve durma tehlikesi olmadan ilgili hız ve yük momenti ile çalışır. Sınırların dışına çıktığında bu durum değişebilir.

Kalkışta maksimum yük momenti eğrisi Özellikle açık döngülü sistemlerde duran bir sistemi istenen pozisyona getirebilmek için motora uygulanan uyarım darbelerinin motor tarafından hiç kaçırılmadan takip edilmesini sağlamak çok önemlidir. Fakat uygulanan uyarım sinyallerin sıklığı, motorun miline bağlı yükü sıfır hızından itibaren kaldırıp hızlandırmasına izin vermeyebilir. Bu yüzden adım motorları için, kalkışta maksimum yük momenti eğrileri tanımlanır. Şekil 2.5' te sürekli rejimde maksimum yük momenti ve kalkışta maksimum yük momenti eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Sürekli rejimde ve kalkışta max. yük momenti/hız eğrileri

2.4.4 Adım Motorlarının Uyarımı

Tek-faz uyarımı: Motor sargılarının sadece birinin uyarıldığı uyarım cinsine tek-faz uyarımı adı verilir. Çizelge1'de 4-fazlı adım motoru için tek-faz uyarım sırasındaki fazların durumu görülmektedir. Bu uyarım metodunda

rotor her bir uyarım sinyali için tam adımlık bir hareket yapmaktadır. Uyarım dönüş yönüne bağlı olarak sıra ile yapılır. Burada fazların uyarım sırası saat ibresi yönündeki (CW) dönüş için F1, F2, F3, F4, saat ibresinin tersi yönü (CCW) için F4, F3, F2, F1 şeklindedir.

İki-faz uyarım: Motor sargılarının ikisinin sıra ile aynı anda uyarıldığı uyarım cinsine iki-faz uyarımı adı verilir. Çizelge 2' de 4-fazlı adım motoru için iki-faz uyarım sırasındaki fazların durumu görülmektedir. İki faz uyarımlıda rotorun geçici durum tepkisi tek-faz uyarımlıya göre daha hızlıdır. Fakat burada güç kaynağından çekilen güç iki katına çıkmaktadır.

Adım	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Faz 1	X				X				X
Faz 2		X				X			
Faz 3			X				X		
Faz 4				X				X	

Çizelge 2.1. Tek-faz uyarımın faz uyarım sıralaması

Adım	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Faz 1	X	X			X	X			X
Faz 2		X	X			X	X		
Faz 3			X	X			X	X	
Faz 4	X			X	X			X	X

Çizelge 2.2. İki-faz uyarımın faz uyarım sıralaması

Karma uyarım: Bu uyarım yönteminde tek-faz uyarımı ile iki-faz uyarımı artarda uygulanır. Burada rotor her bir uyarım sinyali için yarım adımlık bir hareket yapmaktadır. Çizelge 2,3' te fazların uyarım sırası

görülmektedir. Bu uyarım metodunda adım açısı yarıya düştüğünden adım sayısı iki katına çıkmaktadır.

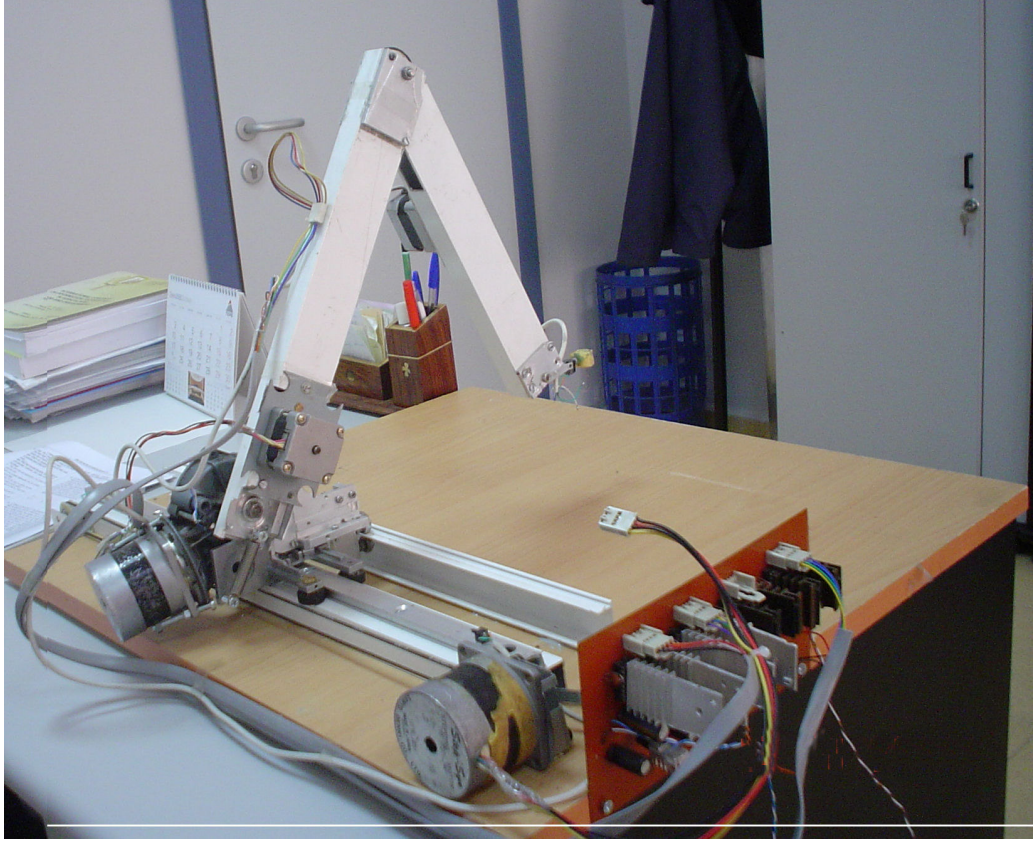
	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Faz 1	X	X						X	X
Faz 2		X	X	X					
Faz 3				X	X	X			
Faz 4						X	X	X	

Çizelge 2.3. Yarım adım (karma) uyarımın faz uyarım sıralaması

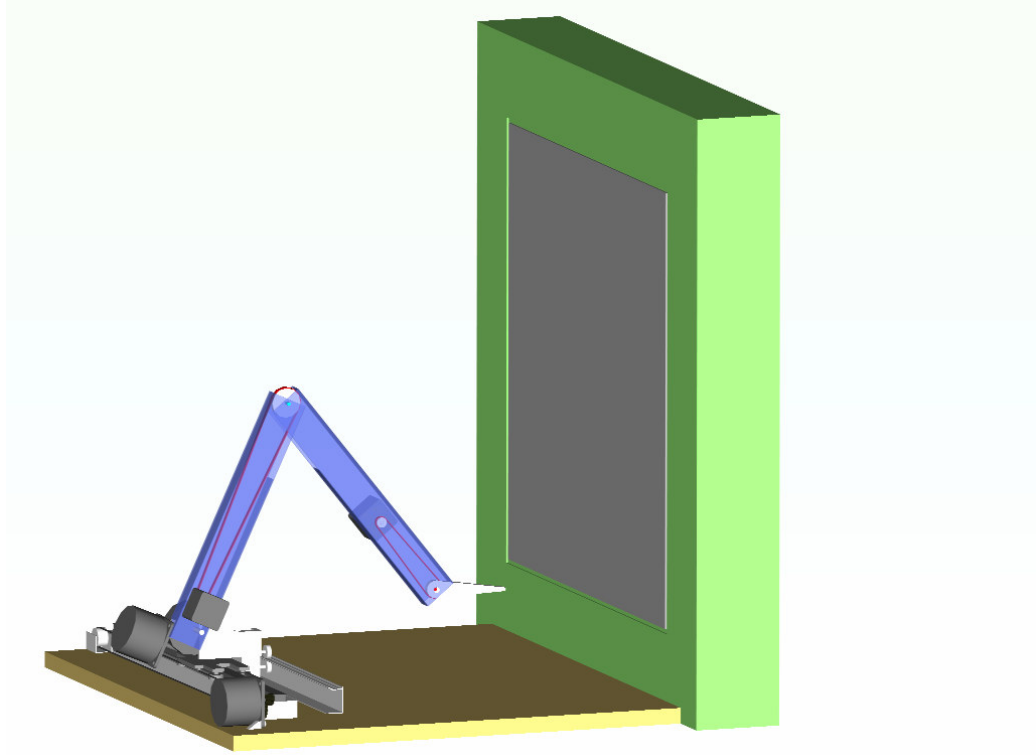
2.5 Deney Robotun genel özellikleri

İmal edilen robot kol dört serbestlik derecesine sahiptir. Adım motorlarından biri robot kolun x yönündeki hareketini bir ray üzerinde hareket ettirerek sağlar. Diğer üç adım motoru robot kolu y-z eksenlerinde hareket ettirir. Robot kolun bütün kol parçaları alüminyum profilden yapılmıştır. Bunun amacı robot kolun hafif olması motorlara binen yükün azaltılmasıdır. Robot kolun omuz kolunu tahrik eden dişli sistemi sonsuz vida tipindedir. Omuz motorunun dişli oranı 1/25 dir. Omuz 90 derecelik bir dönme hareketini en fazla üç saniye içinde yapmaktadır. Dirsek kolunu tahrik eden dişli sistemi düz dişli tipindedir. Dirsek motorunun dişli oranı 1/15 dir. Dirsek 90 derecelik dönme hareketini 1,5 saniye içerisinde gerçekleştirebilir. Omuz ve dirsek arasındaki hız farkının sebebi dişli oranı ve motorlara düşen yükten dolayı motor devir hızlarının farklı olmasındandır. Adım motorunun özelliğinden düşük hızlarda motorun torku fazladır. Hız arttıkça motorun torku da azalır.(şekil 2.5) Omuza düşen yük fazla olduğundan omuzu tahrik eden adım motoru daha yavaş sürülmektedir. Dirsek tahrik motoru omuz kolun hemen altına dönme ekseninden 30mm yukarısına yerleştirilmiştir. Bu sayede omuz

motoruna binen yük azaltılmıştır. Dirsek koluna tahrik, dişli sistemden sonra bir kayış ile sağlanmıştır. Robot kolun bilek kısmını tahrik ettiren motorda dişli sistem kullanılmamıştır. Bunun sebebi ise bilek kısmında yükün az olmasıdır. Bilekte sadece sıcaklık algılayıcısı vardır. Bilek hareketi çok hızlıdır. 90 derecelik bir dönmeyi 1/5 saniyenin altında alabilir. Bileği tahrik ettiren motor dirsek eksenine yakın 50mm ilerisine yerleştirilmiştir. Bunun sebebi ise omuz ve dirsek motorlarına düşen yükü azaltmaktır. X ekseninde hareketi sağlayan ray sistemi ise 1/2 dişli oranına sahip motor ile tahrik edilmektedir. Burada hareketi dişli sistemden sonra ray boyunca bulunan kayış sağlamaktadır. Deney robotu 700x700mm boyutlarında suntalın üzerine yerleştirilmiştir. Deney robotunun el kısmındaki sıcaklık algılayıcısı bir sınır algılayıcısı üzerine yerleştirilmiştir. Bu sayede levhaya temas ettiği nokta tam olarak hesaplanabilmektedir. Robotun son eklem ucuna sıcaklık algılayıcısı yerleştirilmiştir. Robot sıcaklık algılayıcısını dikey levha üzerinde istenilen koordinatlara taşıyarak o bölgedeki ısıyı bilgisayar ortamına aktarabilmektedir. Robotun gövde kısmı 330 mm lik bir ray üzerinde levhaya paralel hareket etmektedir. Omuz dirsek arası 300 mm, dirsek el arası 250 mm ve el sıcaklık algılayıcısı arası 80 mm dir. Robot kolun eklem sınırlarına sınır algılayıcıları yerleştirilmiştir. Bunun amacı robot kolun başlangıç noktasını belirlemek ve eklemlerde sınırların aşılması sayesinde dişli sisteme herhangi bir zararın gelmesinin önlenmesidir.



Şekil 2.6. Robot kolun genel görünüşü



Şekil 2.7 Robot kolun üç boyutlu çizimi

2.6 Sıcaklık Algılayıcısı

1969 yılında ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society) algılayıcısı "ölçülen fiziksel özellik, miktar ve koşulları kullanılabilir elektriksel miktara dönüştüren bir araç" olarak tanımlamıştır. Kontrol sistemlerinin çalışmasındaki ilk aşama; kontrole taban oluşturacak temel verilerin elde edilebilmesidir ve algılayıcı fiziksel ortam ile endüstriyel amaçlı elektrik/elektronik cihazları birbirine bağlayan bir köprü görevi görerek bu işlemi gerçekleştirirler. Sıcaklık ölçme sistemlerinde ise sıcaklığın ölçülmesi sistem tarafından algılanmasını sağlayan düzeneklere sıcaklık algılayıcıları denir. Sıcaklık ölçümü ve kontrolü için birçok çeşit algılayıcı vardır. Endüstride

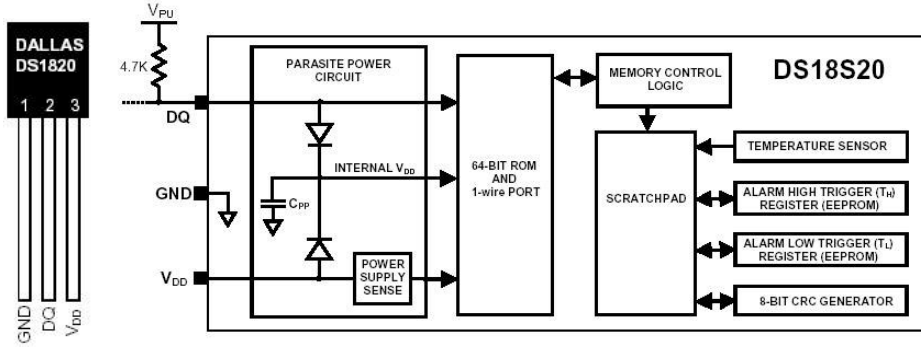
gerekli kullanım alanına göre termokupl, termistör, RTD ve entegre devre sıcaklık algılayıcıları kullanılmaktadır.

Entegre devre sıcaklık algılayıcıları ve özellikle yarı iletken tipi entegre devre sıcaklık algılayıcıları yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Yarı iletken sıcaklık algılayıcıları, yarı iletkenlerdeki temas direncinin sıcaklıkla değişmesi prensibinden yararlanılarak geliştirilen sıcaklık algılayıcılarıdır. Bu tip algılayıcılar ile basit, lineer, doğru ve ucuz sistemler tasarlanabilir. Yarı iletken sıcaklık algılayıcılarını bilgi çıkış özelliğine göre iki grupta inceleyebiliriz; analog çıkışlı yarı iletken algılayıcılar ve sayısal çıkışlı yarı iletken algılayıcılar. Analog çıkışlı yarı iletken algılayıcılar, analog çıkış verdiklerinden dolayı kontrol devrelerinde analog/sayısal dönüştürücü kullanılır. Bu tip algılayıcılar +, - ve besleme olmak üzere üç uçludurlar. Yaygın olarak kullanılan ve Teksas firması tarafından üretilen LM35 sıcaklık algılayıcı analog çıkışlı yarıiletken algılayıcılar grubuna girer.

Sayısal çıkışlı yarıiletken algılayıcılarda sıcaklık algılama olarak analog çıkışlılarla aynı prensibe sahiptirler fakat tüm devre algılayıcı içerisinde ayrıca analog/sayısal dönüştürücü bulunmakta ve algılayıcı çıkışına sıcaklık bilgisi seri veri şeklinde aktarılmaktadır. Bu şekildeki algılayıcılar uygun yazılım ve/veya program kodları ile direk mikroişlemci veri yoluna veya seri port girişine bağlanılabilecek yapıdadırlar.

Geliştirilen robot kol sisteminde kullandığımız sıcaklık algılayıcı, Dallas tarafından geliştirilip 2002 yılında piyasaya sunulan 12-bit (0,05 °C) hassasiyetli seri veri çıkışlı ve DS1820 sayısal termometre olarak isimlendirilen sayısal sıcaklık algılayıcıdır (Şekil 2.8). Entegre devre DS1820

sayısal sıcaklık algılayıcı, sistemde dış ortamdaki aldığı analog sıcaklık değerlerini sayısal veriye çevirerek kontrol kartına gönderir. Şekil 2.8 de DS1820 ve blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.8. Sıcaklık algılayıcı ve blok diyagramı

Celsius (Centigrade) olarak kalibre edilmiş olan DS1820'nin çalışma sıcaklık aralığı ise $(-55^{\circ}\text{C}) - (+125^{\circ}\text{C})$ 'dir. Bu sıcaklık aralığı levha yüzey sıcaklığı 100°C yi geçmediği için bizim çalışmamıza uygundur ve DS1820, doğru ölçüm özelliği, yüksek hassasiyeti ve sayısal çıkış vermesi dolayısıyla tercih edilmiştir.

2.7 Motor sürücü devresi

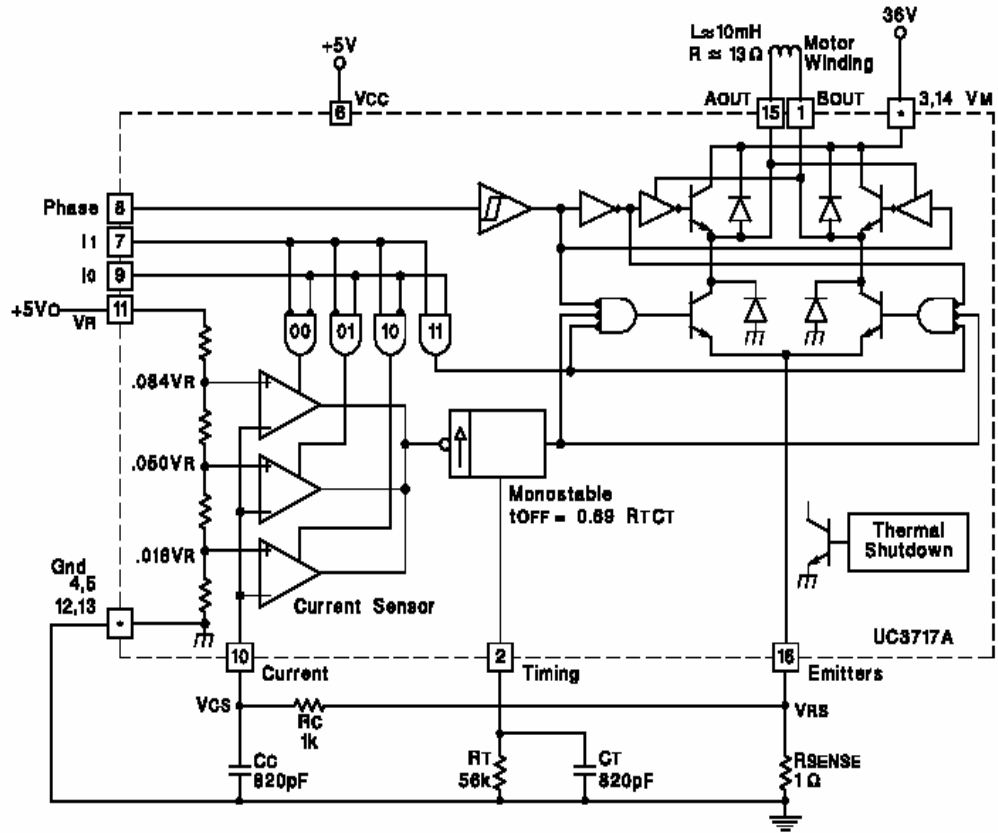
Dört adet adım motorunu sürmek için Texas Instruments in bir ürünü olan uc3717^[36] sürücü entegresi kullanılmıştır. Bu entegre az sayıda pasif eleman ile birlikte az yer kaplar ve oldukça verimlidir. Motorlar dört uçlu olduğundan bir motoru sürmek için iki adet uc3717 entegresi kullanılmıştır.

Uc3717 de dört adet darlington güç transistorü H-bridge biçiminde yerleştirilmiştir. Bu güç transistorları 1 ampere kadar akımı kontrol edebilmektedir. Bu akımı iki bitlik(L0,L1) kontrol bacakları sayesinde dört farklı değerde motora verilebilmektedir. (Tablo 1)

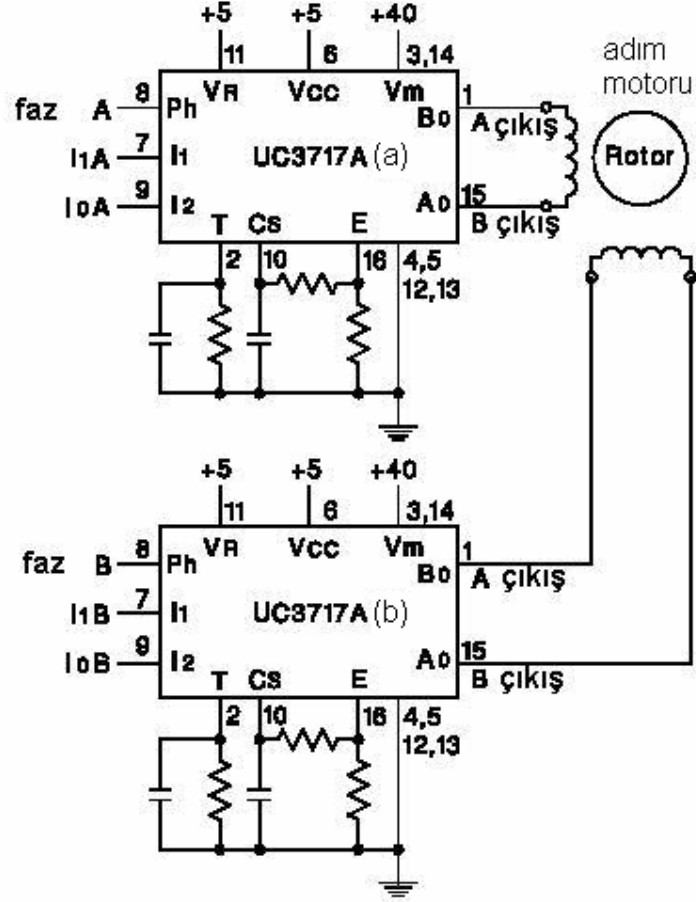
L1	L0	Akım seviyesi
0	0	%100
1	0	%69
0	1	%19
1	1	0

Tablo 1 sürücü entegrenin çektiği akım seviyeleri

Bu sayede motora istenilen akımın verilmesi ve motorun gereksiz güç tüketimini engellemiş ve motorun bekleme durumunda ısınması azaltılmıştır. Şekil 2.9 da uc3717 nin içyapısı ve bir faz için bağlantısı görülmektedir.

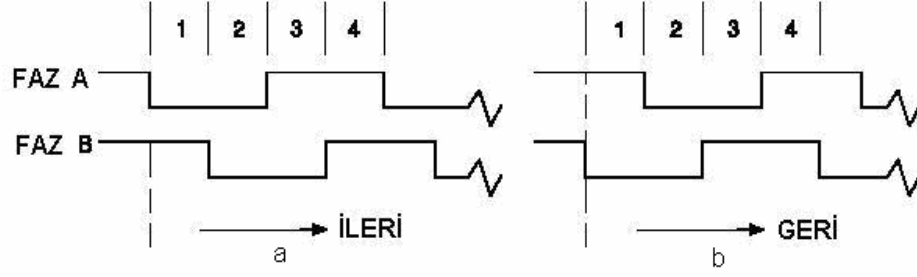


Şekil 2.9. Deney düzeneğinde kullanılan adım motoru sürücü devresi



Şekil 2.10. Deney düzeneğinde kullanılan adım motoru sürücü devre bağlantısı

Şekil 2.10 de bir adım motorunun sürücü devresi görülmektedir. a entegresi birinci fazı b entegresi ise ikinci fazı sürmektedir. Bu devre ile dört uçlu bir adım motoru rahatlıkla kontrol edilebilmektedir. Bir motoru kontrol etmek için mikrodenetleyici den 4 bitlik bağlantı yeterli olmaktadır. L1 ve L0 motora verilen akımı kontrol eder, fazlar ise motor yönünü ve hızını kontrol eder.



Şekil 2.11 Deney düzeneği adım motorunun yön kontrolü a) ileri b) geri

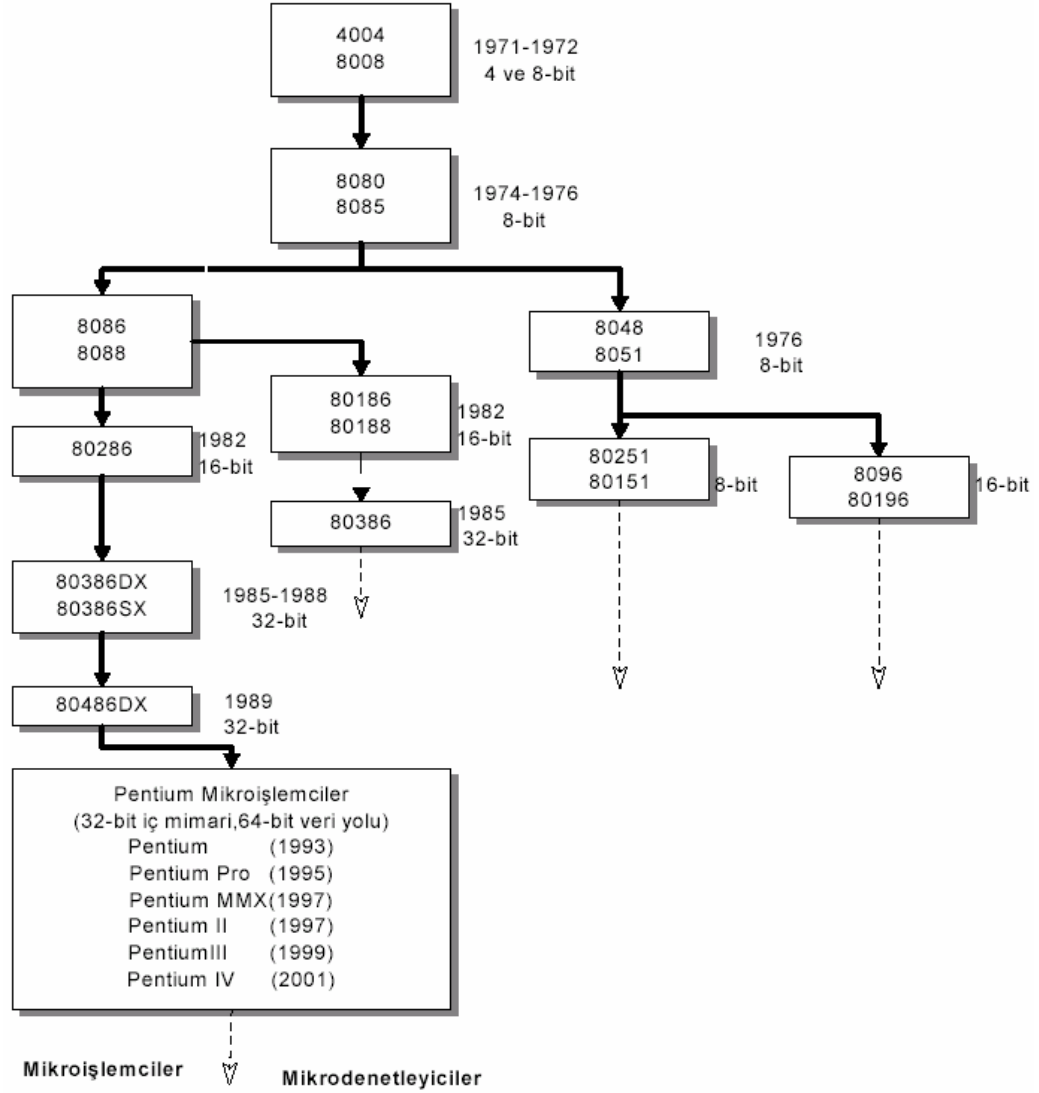
2.7.1 Mikrodenetleyici özellikleri

Mikrodenetleyici, mikroişlemci ve mikroişlemciye bağlı bütün birimlerin üzerinde bulunduğu tek yongaya denir^[37]. Bir mikrodenetleyici yongasında bulunan hafıza, giriş/çıkış ve diğer donanım alt sistemleri bu işlemcinin birçok uygulama içinde gömülü olarak ve tek başına, bir mikroişlemciye göre çok daha basit ve ucuz ara birim teknikleriyle, kontrol amaçlı olarak kullanımını sağlar. Bir mikrodenetleyici kullanıldığı sistemin birçok özelliğini aynı anda izleme (monitoring) ihtiyaç anında gerçek zamanda cevap verme (real time responding), ki bu mikrodenetleyicinin işaretleri hazır olduğu anda alıp ortamı bekletmeden işleyebilmesi demektir. Ayrıca sistemi denetlemekten sorumludur.

Mikrodenetleyicilerin kullanım alanları çok çeşitlidir. Örneğin otomobillerde, motor kontrol, elektrik ve iç panel kontrol, kameralarda, ışık ve odaklama kontrol, bilgisayarlar, telefon ve modem gibi haberleşme cihazları, CD teknolojisi, fotokopi ve faks cihazları, radyo, TV, teyp, oyuncaklar, özel amaçlı elektronik kartlar ve daha birçok benzeri alanda mikrodenetleyiciler

yoğun bir biçimde kullanılmaktadır. Bu kadar geniş kullanım alanı olan mikrodenetleyiciler için 1980'lerden sonra gelişmiş özelliklere ve desteklere sahip 8-bit, 16-bit ve 32-bit mikrodenetleyiciler üretilmiştir. 8051 ailesinde temel 8051 çekirdeği ile ikili kod düzeyi ile uyumlu pek çok 8-bit ve 16-bit ürünleri piyasaya sürülmüştür. Mikrodenetleyicilerin gelişimini yönlendiren talepler ise şunlardır: Karmaşık cihazlar için daha yüksek performans, daha geniş adres alanı, C gibi yüksek seviyede programlama desteği, Windows altında çalışan gelişmiş hata takibi (debugging) özelliklerine sahip program geliştirme ortamları, daha az güç tüketimi ve gürültü, büyük geliştirme programları ve yazılım güvenliği açısından var olan programların kullanılması, sistem fiyatında indirim.

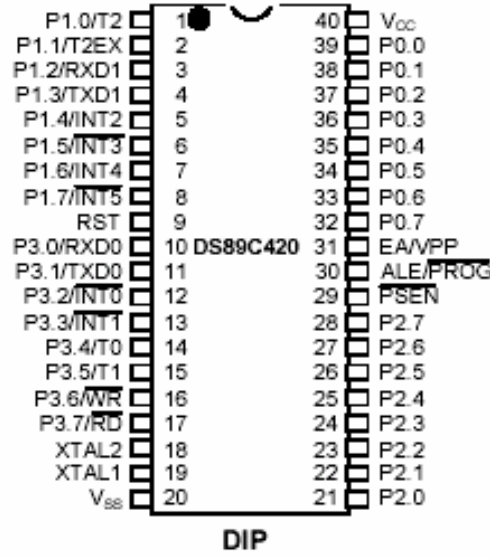
Mikrodenetleyici olarak Dallas Semiconductor'ün ds89c420 entegresi kullanılmıştır. 8051 tabanlı olan mikrodenetleyicinin en önemli özelliği komutlar kristal hızında tek darbeye çalışır. 33 MHz e kadar saat frekansında çalışabilir. 16 kB entegre üzerinde tekrar yazılabilen hafıza vardır. 1 kB RAM, 4 adet 8 bitlik giriş çıkış portu, 2 adet seri port, 3 adet sayıcı mevcuttur.



Şekil 2.12 Mikroişlemcinin tarihsel gelişiminin şematik gösterimi

Şekil 2.13 de gösterilen mikrodenetleyici deney düzeneğinde kullanılmaktadır. Mikrodenetleyici adım motorlarını, sıcaklık algılayıcısını ve bilgisayar ile haberleşmeyi kontrol etmektedir. Sıcaklık algılayıcısı one wire haberleşme protokolü ile çalışmaktadır. Bu protokol mikrodenetleyicide yüküdür. Bilgisayardan mikrodenetleyiciye sadece sıcaklık oku komutu gelmekte, sıcaklık algılayıcısıyla haberleşme mikrodenetleyici ile

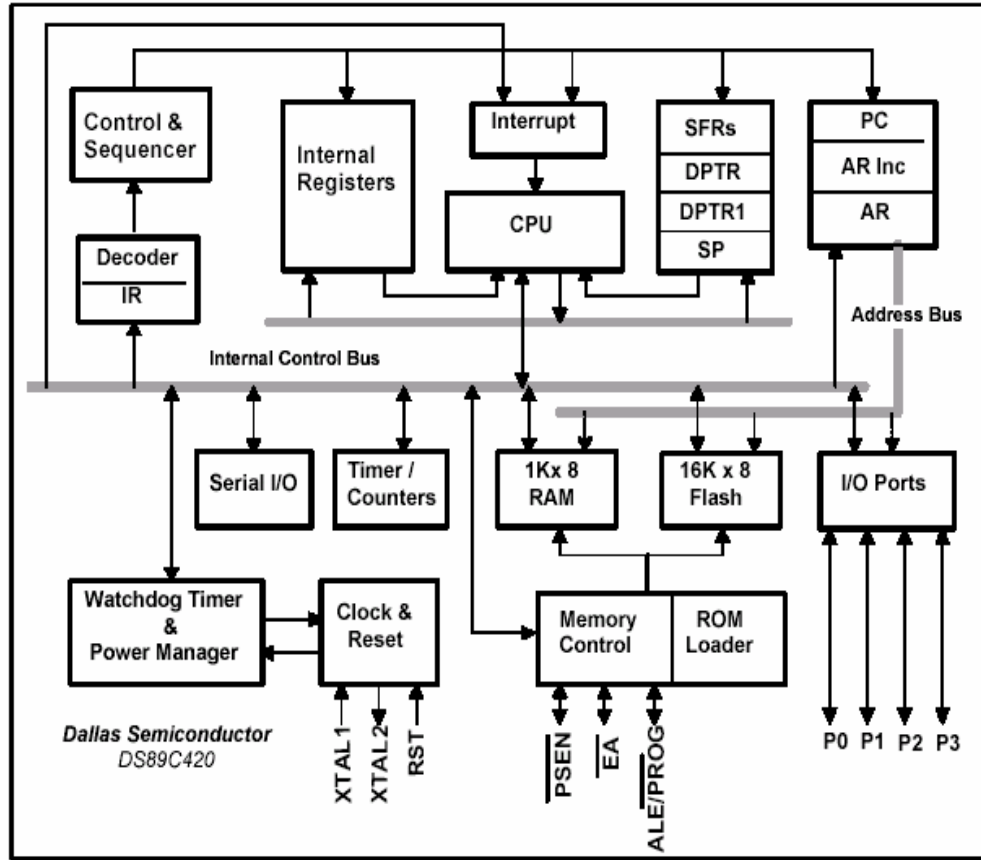
yapılmaktadır. Bilgisayar programından mikro denetleyiciye adım motorlarının kaç adım döneceği yönü ve hız bilgisi gelmektedir. Mikro denetleyiciye bu bilgi geldikten sonra adım motorlarını mikro denetleyici sürer.



Şekil 2.13. Mikrodenetleyici bacak bağlantıları

Temel mimari yapısı Şekil 2.14' de görülmekte olan DS89C420 mikro denetleyicinin başlıca özellikleri aşağıda verilmiştir^[38].

- Kontrol uygulamaları için optimize edilmiş 8 bitlik CPU
- Genişletilmiş Boolean işleme komutları (tek bitlik lojik komutlar)
- On-chip program hafızası (Program ROM)
- On-chip veri hafızası (Data RAM)
- 4 adet 8 bitlik I/O portu
- Çift yönlü kullanılabilen ve tek tek adreslenebilen I/O pinleri
- 2 kanal 16 bitlik Timer/Counter (8052 de 3 kanal)
- Full Duplex UART (Seri haberleşme kanalı)
- Çok kaynaklı / vektörlü / öncelik seviyeli kesme yapısı (Interrupts)



Şekil 2.14. DS89C420 blok diyagram

2.7.2 Kontrol kartı

Kontrol kartı robotun hareketini, motorları, sınır anahtarlarını ve sıcaklık algılayıcıyı kontrol eder. Robottan aldığı bilgileri bilgisayara iletir, bilgisayardan aldığı bilgilerle motorları ve sıcaklık algılayıcısını kontrol eder. Kontrol kartı motorları istenilen hızda ve akımda sürebilmektedir. Üzerinde 4 adet step motor sürücü devresi mevcuttur. DC 12 volt ile çalışmakta ve güç kaynağından en fazla 4,5 amper akım çekmektedir. Kontrol kartının

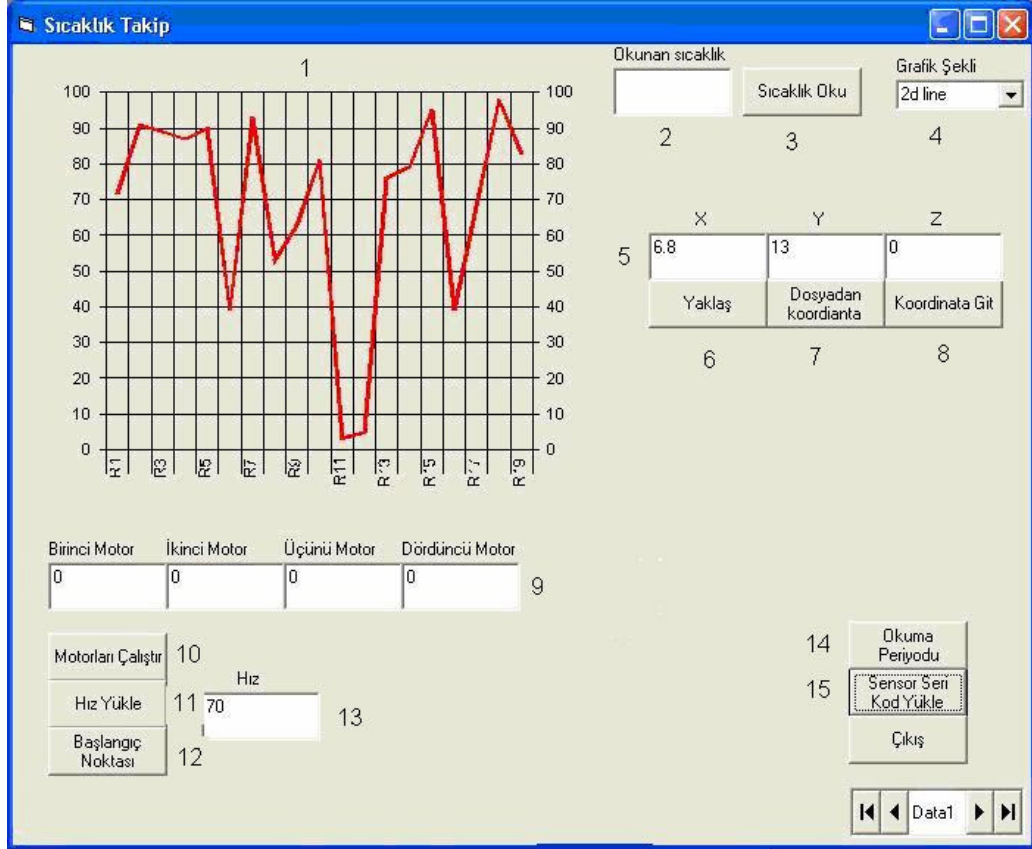
bilgisayarla bağlantısı RS232 portu ile sağlanmakta; bu bağlantı hızı 9600 bps dir bu hız isteğe bağlı olarak 115200 bps e kadar çıkartılabilir.

2.8 Bilgisayar Yazılımının Özellikleri

Deney robotunun kontrolü bir bilgisayar ile yapılmaktadır. Bilgisayar ile robot arasındaki veri alışverişi bilgisayarın seri portundan yapılmaktadır. Robot kontrolü ve ara yüzün tasarımında visual basic programlama dili kullanılmıştır. Bilgisayar programı deney robotunu bütünüyle kontrol edebilmekte istenilen koordinata yönlendirebilmekte ve bilek kısmındaki algılayıcı sayesinde sıcaklık ölçümlerini kaydedebilmektedir. Program ilk çalıştığında robotu kontrol eder ve referans noktasına yönlendirir. Referans noktasının bulunmasında sınır algılayıcıları kullanılmıştır her hareketli parçada bir adet sınır algılayıcısı vardır. Deney robotuna referans komutu gönderildiğinde sırayla bütün hareketli parçalar sınır algılayıcılarına doğru hareket eder. Sınır algılayıcısına temas eden hareketli parçalar durur. Böylece deney robotu referans noktasına gitmiş olur. Deney robotunun el ile yani koordinat girilerek kontrolünde; program ara yüzüne robotun gitmesi istenilen koordinatı girilir. Program girilen koordinat bilgileriyle her bir motor için motorun dönme açısını hesaplar. Hesaplanan motor açıları robot devresine iletilir. Daha sonra istenilen koordinattaki sıcaklık değeri yine programdaki sıcaklık_ölç butonuna basılarak ölçülür. Aynı noktadan zamana bağlı sıcaklık ölçümü yapılabilmektedir. Ölçülen sıcaklık sonuç değerleri bilgisayar ortamında bir dosyaya kaydedilmektedir. Levha yüzeyinin sıcaklığı ölçülmek istenildiğinde, robot levha yüzeyine yakın bir noktaya yaklaşık

koordinat girilerek getirilir. Bilgisayar programında yaklaş butonuna basılır. Bundan sonra robot levhaya 0,2 mm aralıklarla yaklaşarak levhaya temas eder. Sınır algılayıcısı sayesinde robot temas anında durur ve o noktanın koordinatlarını kaydeder. Bir dizi koordinat yüklendiğinde ise robot sırayla o koordinatlara gider. Her gittiği noktadaki sıcaklıkları ölçer ve kaydeder. Sıcaklık algılayıcısının bulunduğu ortamın sıcaklığına ulaşması için gereken süre programda belirtilebilir. Ya da sıcaklık değişiminin durduğu an beklenebilir. Deney robotunun dört motoruna programla ayrı ayrı ya da aynı anda adım sayısı ve hızı girilerek sürülebilir. Bu sayede herhangi bir adım kayması veya konum kaybında motorlar tek tek çalıştırılarak robot istenilen konuma getirilebilir.

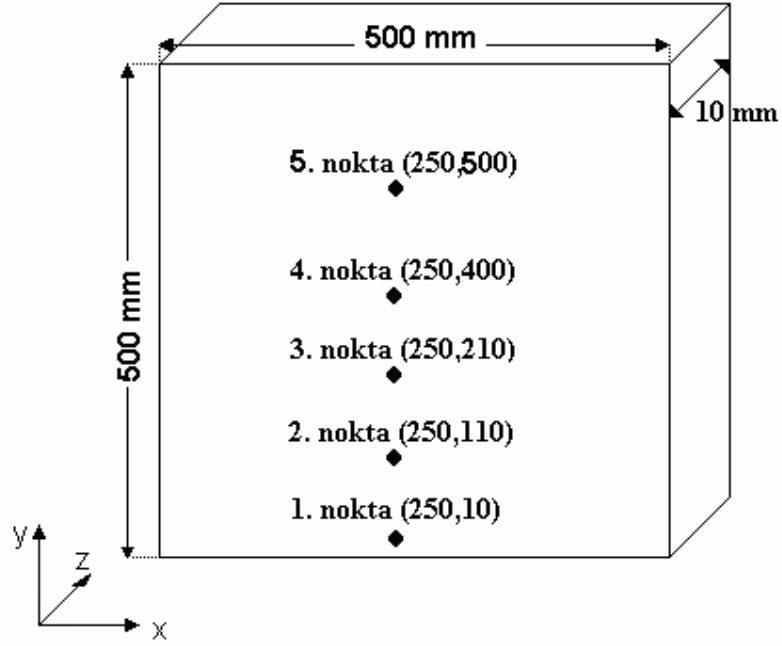
Robot ile bilgisayar arasındaki bağlantı rs232 kablo ile sağlanmıştır. Deney robotu ile bilgisayar arasındaki veri iletişimi az olduğundan bu iletişim yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 15 Yazılım ara yüzünün görünüşü ve bilgisayar programının temel girdi ve çıktıları.

- 1) Ölçülen sıcaklığın son 20 değerinin grafiksel gösterimi.
- 2) En son ölçülen sıcaklık değeri.
- 3) Butona basıldığı andaki sıcaklık değeri.
- 4) Grafiğin görünümünü değiştirir; iki boyutlu, üç boyutlu, çubuk gibi.
- 5) Manüel kontrolde deney robotunun uç noktasının gitmesi istenilen koordinat girişleri.
- 6) Butona basıldığında deney robotu 0,2 mm aralıklarla levhaya yaklaşır, levhaya dokunduğu anda durur ve o noktanın referansı alınmış olur.
- 7) Dosyaya yazılan koordinat dizisini çalıştırır.
- 8) x, y, z girişlerine yazılan koordinat bilgilerini çalıştırır.

- 9) Motorları ayrı ayrı çalıştırır, bu bölüme motorların adım sayısı girilir.
- 10) 9 daki girişlere girilen motor adım bilgilerini çalıştırır.
- 11) Motorların çalışma hızı belirlenir.
- 12) Deney robotu üzerinde bulunan sınır anahtarlarına yaklaşarak başlangıç noktasına gider.
- 13) Motorların hızlarının girileceği bölüm.
- 14) İki ölçüm arasındaki süreyi belirler.
- 15) Birden fazla sıcaklık sensörü kullanılacaksa yeni sensörler bu buton ile yazılıma eklenir.



Şekil 2.16. Deney levha Boyutları ve ölçüm yapılan noktalar

Depo 4mm lik alüminyum sacdan imal edilmiştir. Deponun iç alt kısmına uzunlamasına 1 Kwatt lık kapalı tip rezistans yerleştirilmiştir. Depo tamamen suyla doldurulup ısıtılmak suretiyle sıcak yüzey elde edilmektedir.

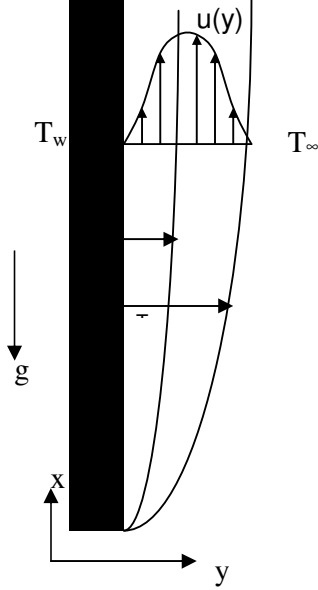
2.9 Doğal Isı Taşınımı

Bir akışkan farklı sıcaklıkta bir yüzeyle temasa geçtiğinde akışkan içinde sıcaklık farkları meydana gelir. Sıcaklığı fazla olan akışkan zerrelerinin yoğunluğu azaldığından yukarı doğru hareket etmeye başlar. Akışkan içindeki sıcaklık farklarının sonucu olarak akışkan yoğunluğundaki değişimin meydana hareket doğal taşınımıdır.

Doğal ısı taşınımının etkili olduğu birçok uygulama vardır. Doğal taşınım, çeşitli elektronik cihazlardan olan ısı geçişini etkilediği kadar, borulardan ve dağıtım hatlarından olan ısı geçişini de etkiler. Elektrikli ısıtıcılardan veya radyatörlerden oda havasına aktarılan ısı veya bir soğutma ünitesinin yoğuşturucu serpantinden çevreye verilen ısı, hep doğal taşınımın etkisiyle olur.

Bir levha sıcaklığı kendi sıcaklığından farklı olan bir akışkan içinde bulunuyorsa ısı geçişinden dolayı levhaya dik doğrultuda sıcaklık basamağı oluşur. Bu sıcaklık basamağı yoğunluk farkına, yoğunluk farklılığı da doğal ısı taşınımına sebep olur. Doğal taşınımında zorlanmış taşınımında olduğu gibi yüzeyle akışkan arasında sınır tabaka oluşur. Sınır tabaka denklemlerinin çözümü sonucunda sıcaklık ve hız dağılımı elde edilir. Sınır tabaka çözümlerinde Prandtl sınır tabaka teorimi kullanılmaktadır. Bu teoreme göre

belirli koşullar altında levha yüzeyinin hemen yakınlarında hız gardyeni büyük olduğu için o bölgede viskoz kuvvetlerin önemi vardır.



Şekil 2.17. Dikey sıcak levhada hız ve sıcaklık dağılımı

2.10 Isı İletimi

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:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Burada $\frac{dT}{dx}$ terimi x yönündeki sıcaklık gradyeni göstermektedir. Isı geçişi tek boyutlu varsayılarak (2.1) eşitliğinin integrali alınırsa aşağıdaki eşitlik elde edilebilir.

$$q = kA \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad (2.2)$$

Burada;

- q : İletimle geçen ısı miktarı, (W)
- A : Isı iletiminin gerçekleştiği alan, (m²)
- L : Isının iletiminin gerçekleştiği malzemenin kalınlığı, (m)
- T₁, T₂ : Isı iletiminin gerçekleştiği malzemenin duvar sıcaklıkları, (K)
- k : Malzemenin ısı iletim katsayısı, (W/m.K)

1.1.1. Isı Taşınımı (Konveksiyon)

Bir yüzey üzerinden veya bir boru içerisinde akan akışkanın sıcaklığı yüzey sıcaklığından farklı ise akışkan hareketi sonucu akışkan ile yüzey arasındaki ısı transferi olayı ısı taşınımı olarak adlandırılır. Newton'un soğutma kanunu olarak da bilinen ısı taşınımı aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilmektedir.

$$q = hA(T_w - T_\infty) \quad (2.3)$$

Burada;

- h : Isı taşınım katsayısı, (W/m² K)
- T_∞ : Yüzey sıcaklığı, (K)
- T_w : Akışkan sıcaklığı, (K)

2.11 Isı Işınımı (Radyasyon)

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

$$q = F \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (2.4)$$

Burada;

σ :Stefan-Boltzman sabiti ($\sigma=5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

ϵ :Isı Yayınım katsayısı

F :Geometrik biçim katsayısı

Şekil 2.17'deki düz levhanın sıcaklığı levhayı çevreleyen havanın sıcaklığından daha yüksekse levhanın alt ucundan başlayarak levha üzerinde hız ve sınır tabakaları oluşur. Bunun sonucunda levhaya yakın olan akışkanın yoğunluğu uzakta olana göre daha azdır. Böylece kaldırma kuvvetleri bir doğal taşınım sınır tabakası oluşturur ve akışkan yukarıya doğru yükselirken onun yerinede durgun bölgedeki akışkan sınır tabaka içine girer. Burada ortaya çıkan hız dağılımı zorlanmış taşınım hız dağılımından çok farklıdır. Hız $y=0$ 'da olduğu gibi $y = \infty$ 'da da sıfır olur.

Akışkan sıcaklığı Levha üzerinde levha sıcaklığı T_w 'a Isıl sınır tabaka kenarında ortam sıcaklığı T_∞ ' a eşit olur. Hız sınır tabakası içerisinde hız dağılımı hem levha üzerinde hem de sınır tabaka kenarında sıfır olacak şekildedir. Dikey bir levha için aşağıdaki sınır şartları yazılabilir. ^[39]

$$y = 0 \quad u = v = 0 \quad T = T_w$$

$$y \rightarrow \infty \quad u \rightarrow 0 \quad T = T_\infty$$

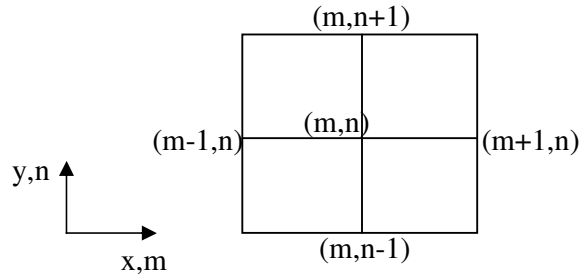
Sınır tabaka denklemlerinin yukarıdaki sınır şartlarıyla çözümlü üç değişik metotla yapılabilir. İntegral metodu, benzerlik yaklaşımı ve sonlu farklar kullanılarak dikey bir levha için sınır tabaka denklemleri çözülebilir.

3 ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1 Sayısal çözüm

Isı transferi problemlerinde genellikle analitik çözümlere ulaşmak zordur. Analitik çözümleri bulmak için genelde basit geometri ve sınır koşulları kullanmak gerekmektedir. Bununla birlikte genelde kullanılan geometriler karmaşıktır. Bu gibi durumlarda en iyi çözüm sonlu-fark gibi sayısal yöntemleri kullanmaktır.^[40]

Çözüm bölgesinin her noktasında sıcaklığın belirlenmesine olanak sağlayan analitik çözüme karşı, sayısal çözüm sıcaklığın sadece ayrık noktalarda belirlenmesini öngörür. Bundan dolayı herhangi bir sayısal çözümde ilk adım bu noktaları seçmektir. Referans noktası genelde düğüm noktası olarak adlandırılır.



Şekil 3.1 Sonlu fark yaklaşımında düğüm noktalarının gösterimi

Sayısal olarak sıcaklık ve hız dağılımının bulunması, sıcaklıkları ve hızları belli olmayan her düğüm noktasında uygun denge eşitliğinin

yazılmasını gerektirir. Bulunan denklem takımı, her noktadaki sıcaklık ve hız için birbirlerine bağlı olarak çözülür.

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{m,n} \approx \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (3.1)$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right]_{m,n} \approx \frac{u_{m+1,n} - u_{m,n}}{\Delta x} \quad (3.2)$$

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right]_{m,n} \approx \frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} \quad (3.3)$$

$$\left. \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right]_{m,n} \approx \frac{u_{m+1,n} + u_{m-1,n} - 2u_{m,n}}{(\Delta x)^2} \quad (3.4)$$

Böylece m,n noktası için gerçekte bir diferansiyel denklem olan eşitlikler yaklaşık olarak cebirsel eşitliğe indirgenir. Sonlu fark eşitlikleri kullanılarak çözümlerin elde edilmesi için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \theta + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \quad (3.7)$$

Bu denklemlerin çözümü için kullanılan sınır şartları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$x = 0 \quad u = v = \theta = 0$$

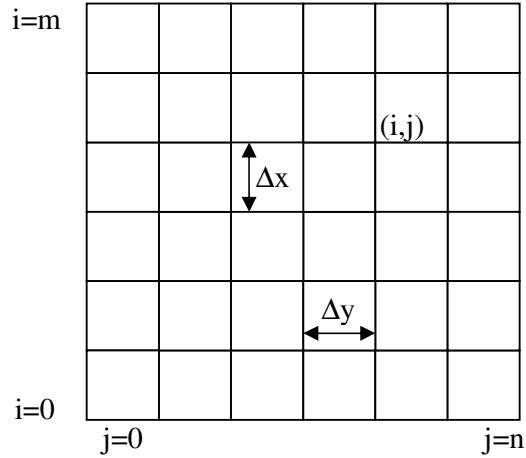
$$y = 0 \quad u = v = 0, \theta = 1$$

$$y = \infty \quad u = v = \theta = 0$$

$$\tau = 0 \quad u = v = \theta = 0$$

Burada θ boyutsuz sıcaklık, y yönündeki hız bileşeni v , x yönündeki hız bileşeni u ve τ boyutsuz zaman olarak gösterilmektedir. Belli zaman aralıkları sonucunda elde edilen sıcaklık ve hız değerleri sonlu farklar kullanılarak hesap edilebilir.

İşlemler sırasında süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin çözülmesi gerekmektedir. Bu denklemlerin çözülmesiyle hız ve sıcaklık değerleri elde edilmektedir.



Şekil 3.2. Dikey bir levha için grid sistemi

Grid sisteminde her düğüm noktası için denklemler yazılıp, bu denklemler çözülürse bu düğüm noktalarına ait sıcaklık ve hız değerleri bulunur. Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri sonlu farklar için aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

Eşitlik (3.5),(3.6) ve (3.7) 'de verilen süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin sonlu farklardaki karşılığı aşağıdaki gibidir.

$$\frac{u'_{i,j} - u'_{i-1,j}}{\Delta x} + \frac{v'_{i,j} - v'_{i,j-1}}{\Delta y} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{u'_{i,j} - u_{i,j}}{\Delta \tau} + u_{i,j} \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x} + v \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{\Delta y} = \theta' + \frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} \quad (3.9)$$

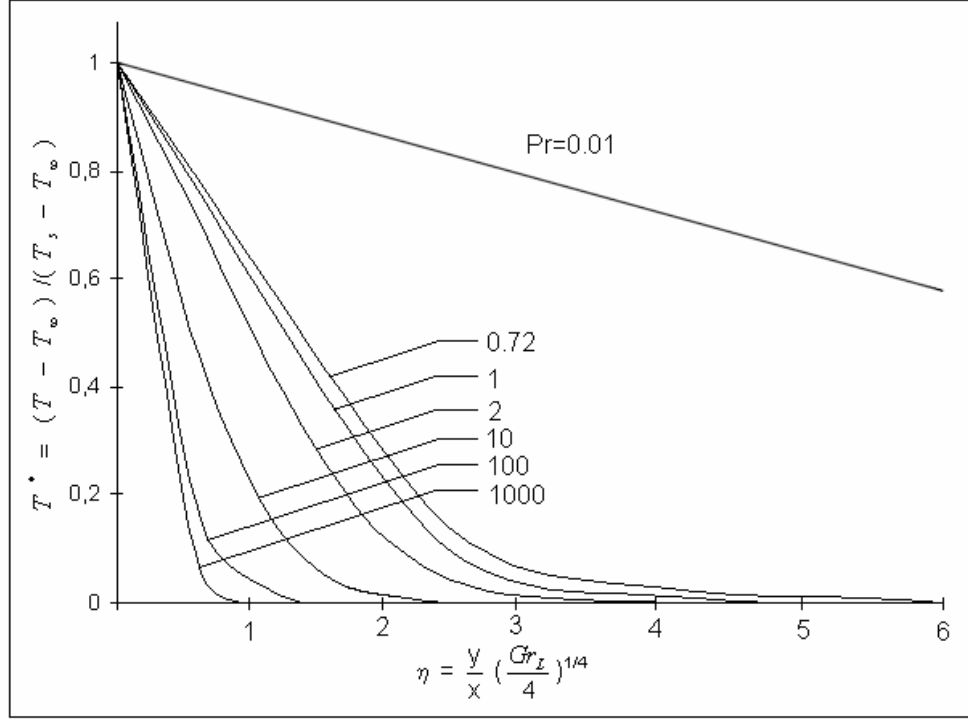
$$\frac{\theta'_{i,j} - \theta_{i,j}}{\Delta \tau} + u_{i,j} \frac{\theta_{i,j} - \theta_{i-1,j}}{\Delta x} + v_{i,j} \frac{\theta_{i,j+1} - \theta_{i,j}}{\Delta y} = \frac{1}{Pr} \frac{\theta_{i,j+1} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} \quad (3.10)$$

Yukarıdaki denklemler zamana bağlı olduğundan uygun bir zaman artımı için çözülebilir. Bu zamana bağlı sonuçların uzun bir zaman sonraki değerleri kararlı durum için kullanılabilir.

Her bir düğüm noktası için bu ifadeler yazılıp denklem takımları oluşturulduktan sonra bu denklemlerin çözümü yapılabilir. Böylece ele alınan geometri için hız ve sıcaklık değerleri bulunmuş olur. Bu Bilgisayar programıyla elde edilen u,v ve T değerleri zaman adımları için düzenlenmiştir.

3.2 Analitik Hesap

Benzerlik metodu:



Şekil 3.3 Sabit sıcaklıkta dikey bir yüzey üzerinde laminar doğal taşınım sınır tabaka sıcaklık profili.

Y ölçüm yapılan mesafe

X levha boyu

Gr_L Grashof sayısı

$$Gr_L = [g\beta(T_w - T_\infty)L^3] / \nu^2 \quad (3.11)$$

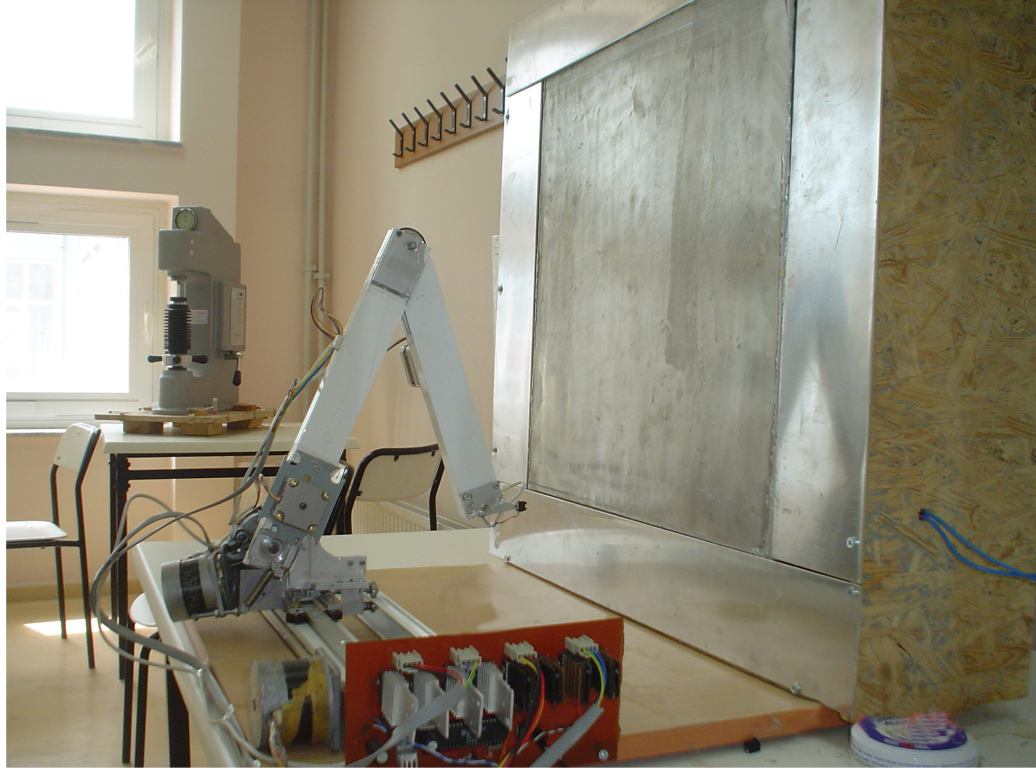
$$\eta = \frac{y}{x} \left(\frac{Gr_L}{4} \right)^{1/4} \quad (3.12)$$

Burada eşitlik (3.11) kullanılarak hava için Gr. değeri hesaplanır. Gr. sayısı kullanılarak herhangi bir yatay uzaklık için sıcaklık değeri ise (3.12) eşitliği kullanılarak aşağıdaki değerler bulunur.

Çizelge 3.1 Analitik hesap sonuçları

Y(m)	Sıcaklık
0	98
0,001	83,5
0,002	74
0,003	65,3
0,004	57,9
0,005	52,1
0,006	46,9
0,007	43,3
0,008	39,6
0,009	36,7
0,01	33,7
0,011	31,5
0,012	30,2

3.3 Deneysel Ölçümler

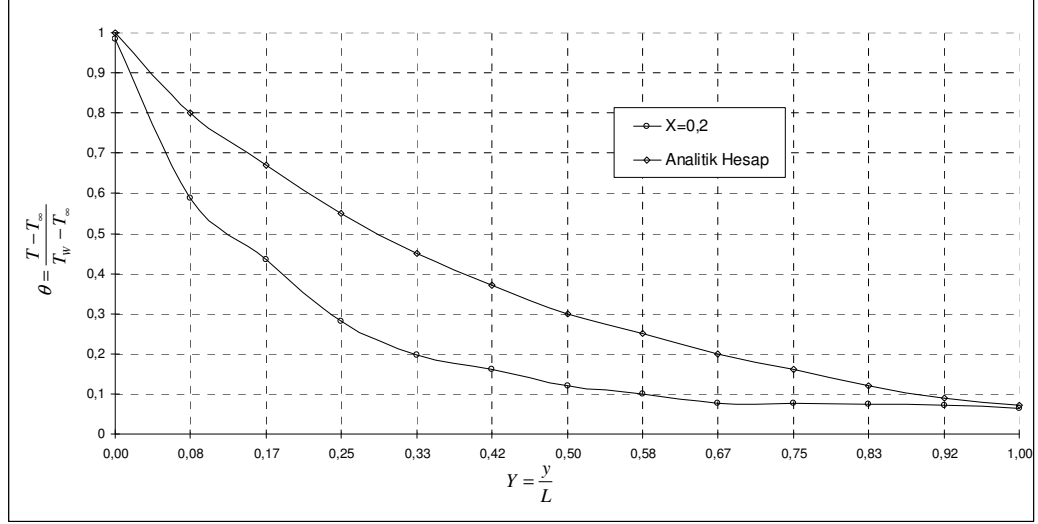


Şekil 3.4 Deney düzeneğinde ölçüm yapılırken çekilmiş fotoğrafı

Çizelge 3.2 Ölçüm sonuçları

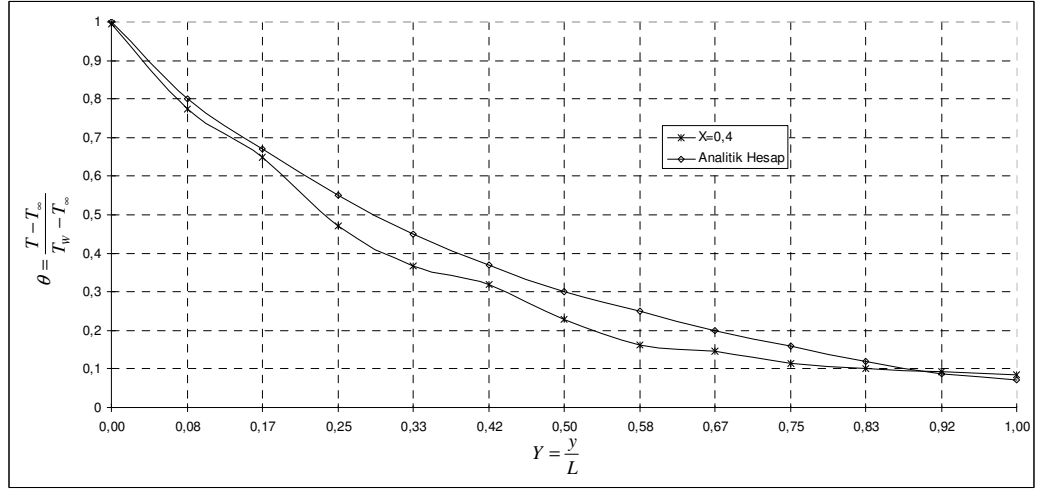
Levhadan uzaklık X	1. nokta	2. nokta	3.nokta	4. nokta	5.nokta	Analitik sonuç
0	90,00	90,75	91,06	90,50	90,00	98
0,083	63,88	76,13	75,69	78,44	75,00	83,5
0,167	53,75	67,88	66,63	71,50	65,50	74
0,25	43,63	56,13	57,38	62,38	60,69	65,3
0,333	38,00	49,31	51,75	56,00	55,88	57,9
0,417	35,63	46,06	46,69	52,38	49,19	52,1
0,5	32,94	40,13	43,00	49,31	44,75	46,9
0,583	31,63	35,75	40,69	45,81	39,85	43,3
0,667	30,13	34,75	37,31	41,06	37,25	39,6
0,75	30,06	32,56	35,31	38,81	35,38	36,7
0,833	29,88	31,75	33,56	37,06	34,31	33,7
0,9917	29,69	31,06	32,50	35,25	33,00	31,5
1	29,25	30,69	31,50	33,75	31,75	30,2

Karşılaştırmalar:



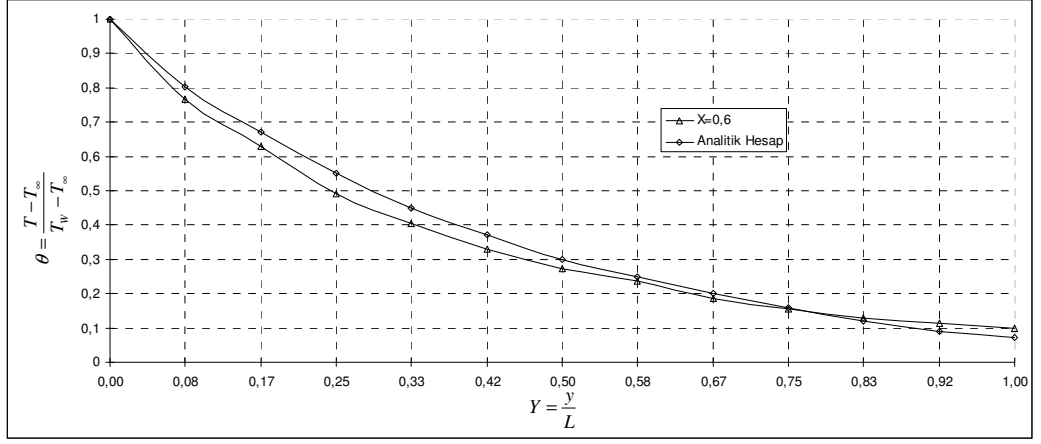
Şekil 3.5 Analitik sonuç ile deneyde ölçülen 1. noktanın (şekil 2.16)

sonuçlarının karşılaştırılması



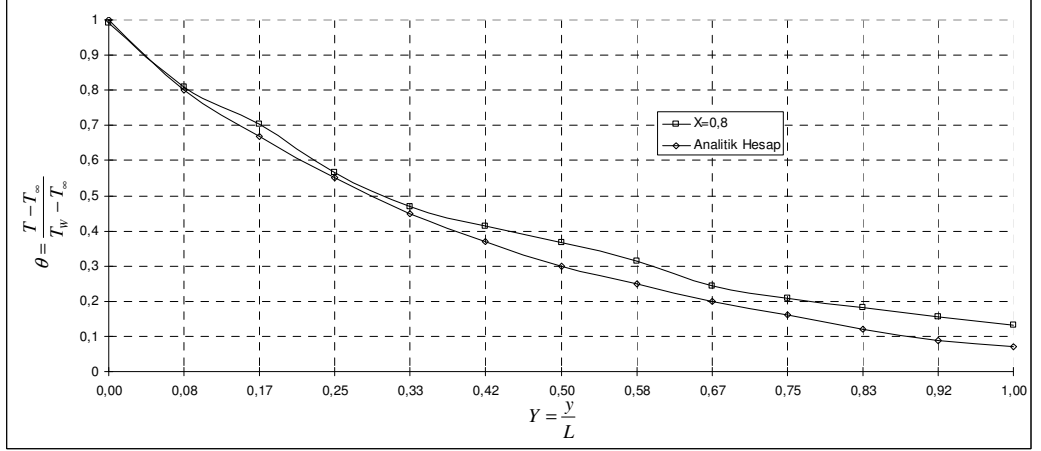
Şekil 3.6 Analitik sonuç ile deneyde ölçülen 2. noktanın (şekil 2.16)

sonuçlarının karşılaştırılması



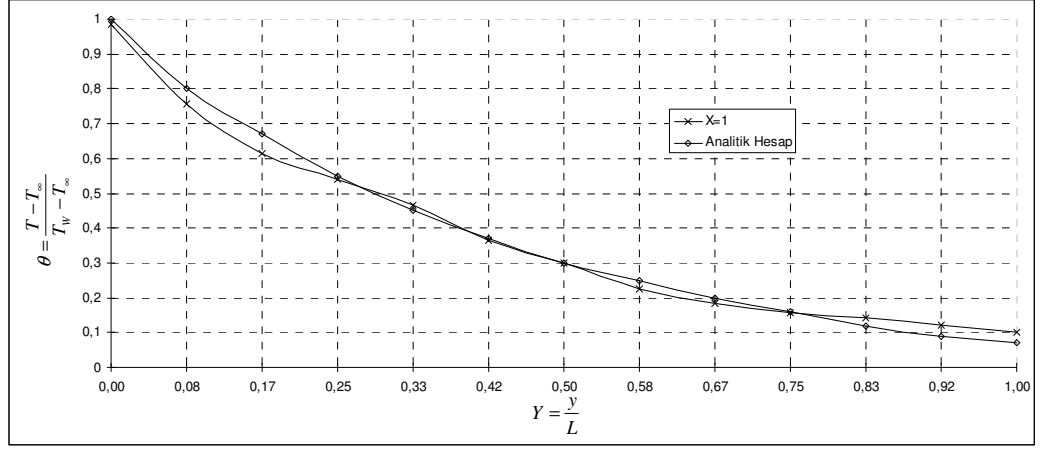
Şekil 3.7 Analitik sonuç ile deneyde ölçülen 3. noktanın (şekil 2.16)

sonuçlarının karşılaştırılması



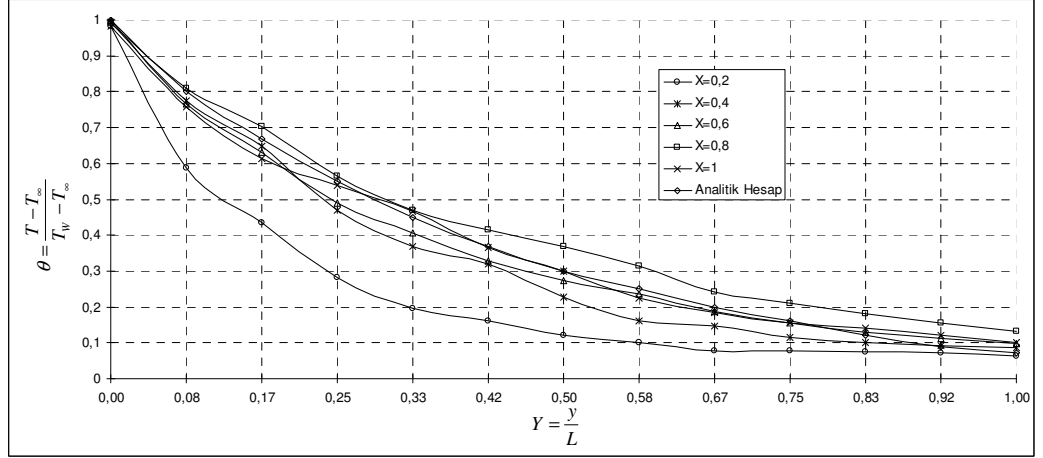
Şekil 3.8 Analitik sonuç ile deneyde ölçülen 4. noktanın (şekil 2.16)

sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 3.9 Analitik sonuç ile deneyde ölçülen 5. noktanın (şekil 2.16)

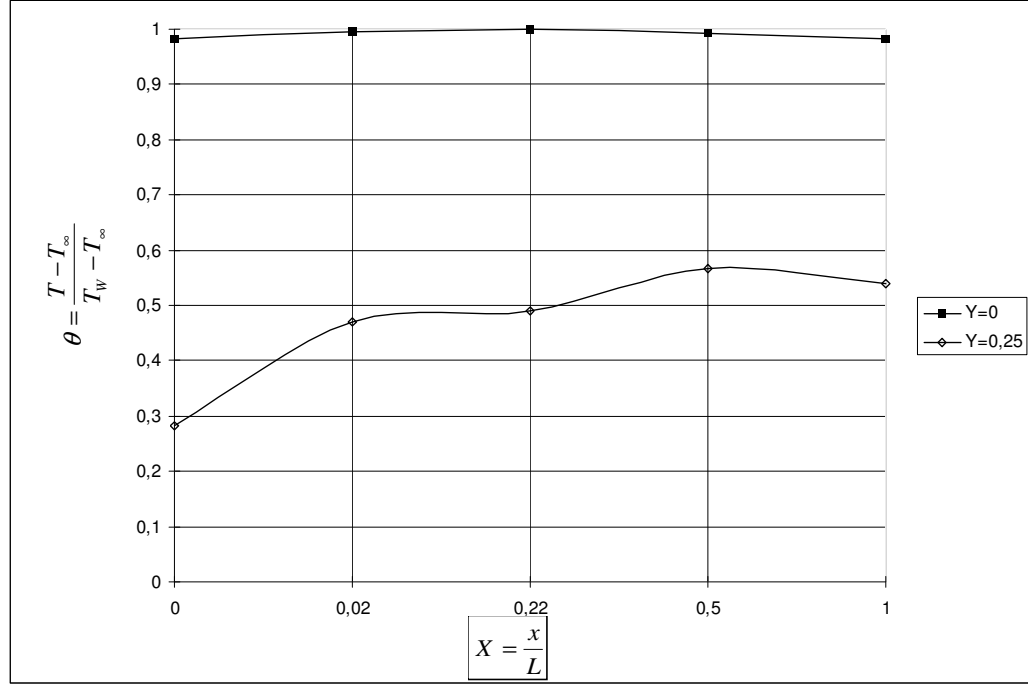
sonuçlarının karşılaştırılması



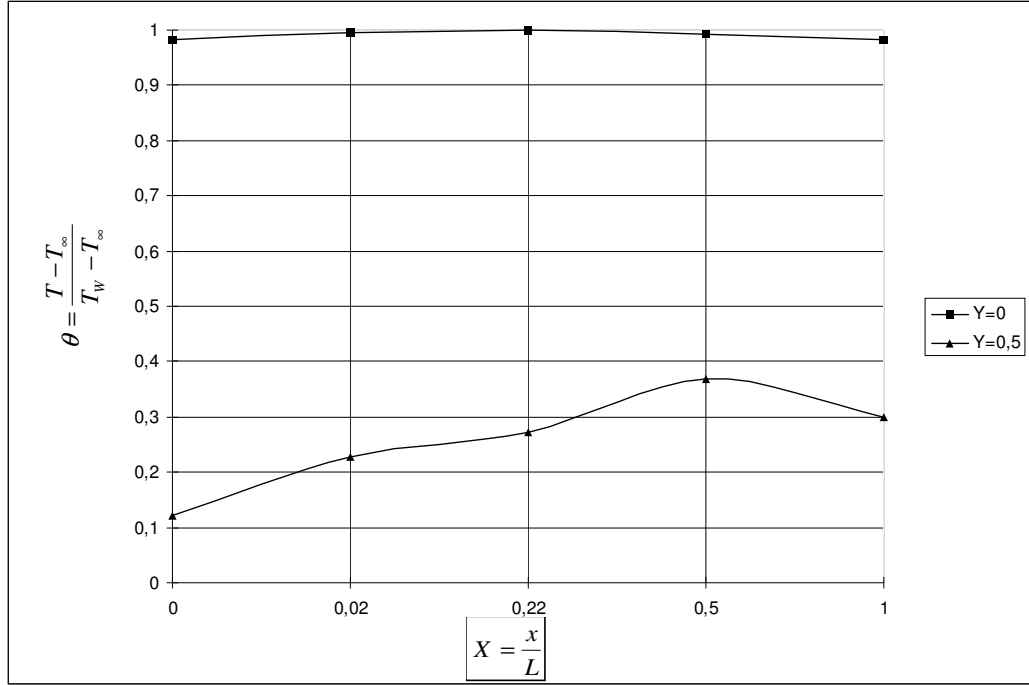
Şekil 3.10 Analitik sonuç ile deneyde ölçülen bütün noktaların (şekil 2.16)

sonuçlarının karşılaştırılması

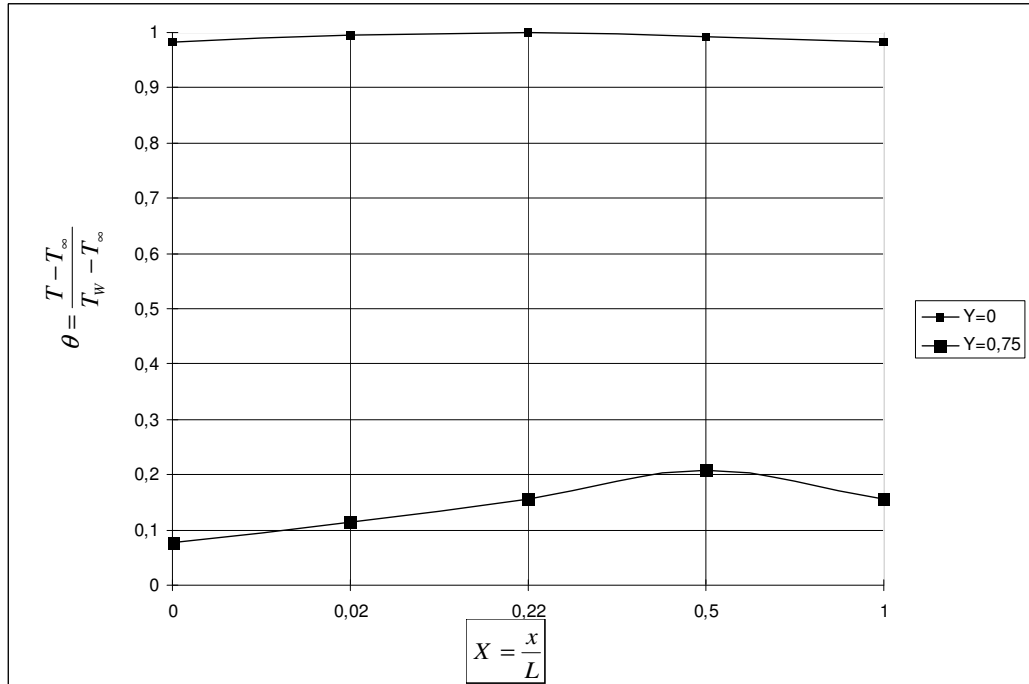
Yüzey grafikleri



Şekil 3.11 Levha yüzeyi sıcaklığı ile levhadan $Y=.25$ uzaklıktaki (çizelge 3,2)beş noktanın sıcaklık karşılaştırmaları

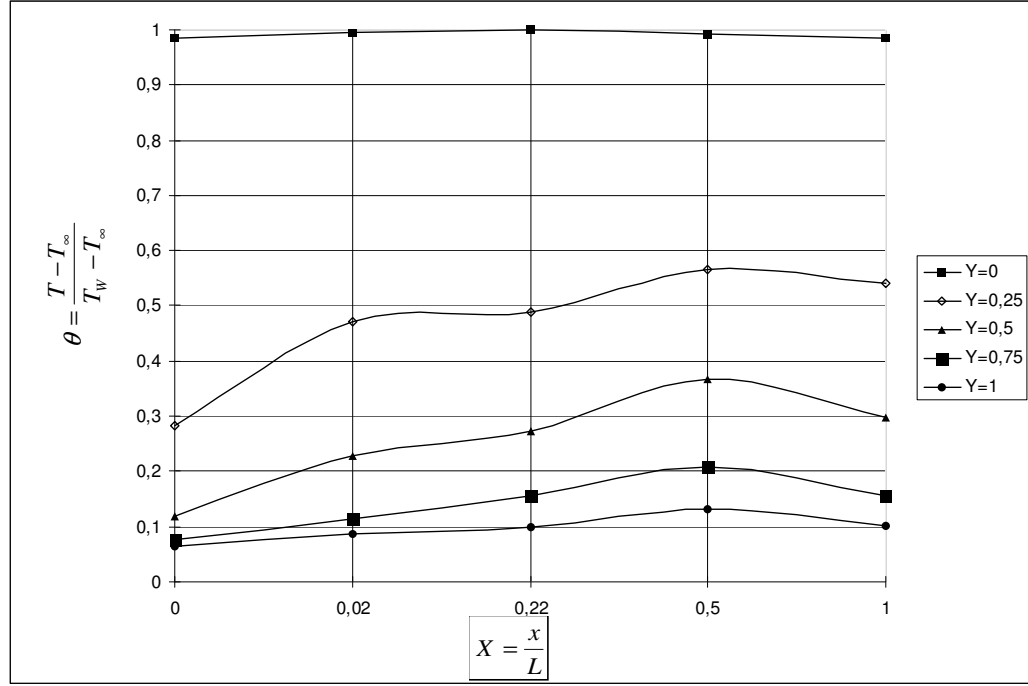


Şekil 3.12 Levha yüzeyi sıcaklığı ile levhadan $Y=0,5$ uzaklıktaki (çizelge 3,2) beş noktanın sıcaklık karşılaştırmaları



Şekil 3.13 Levha yüzeyi sıcaklığı ile levhadan $Y=0,75$ uzaklıktaki (çizelge 3,2) beş noktanın sıcaklık karşılaştırmaları

Şekil 3.14 Levha yüzeyi sıcaklığı ile levhadan Y=1 uzaklıktaki (çizelge 3,2) beş noktanın sıcaklık karşılaştırmaları



Şekil 3.15 Levha yüzeyi sıcaklığı ile levhadan Y=0,25, Y= 0,5, Y=0,75 ve Y=1 uzaklıktaki noktaların sıcaklık karşılaştırmaları

4 TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Doğal ısı taşınımı gibi iki veya üç boyutlu ısı transfer ve akışkan akışı problemlerinin çözümünde süreklilik, momentum ve enerji denklemleri beraber çözülmelidir. Bu denklemlerin tam çözümleri çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle bazı basitleştirmeler yapılarak analitik çözümler elde edilebilmektedir. Ancak sayısal çözümleri çoğu zaman mümkün olabilmektedir. İster sayısal ister analitik çözüm olsun birçok varsayım ile kesin sonuçlara ulaşılabilmektedir. Bu çalışma ise deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmanın çok önemli bir bölümünü ölçümde kullanılacak robot kolu oluşturmaktadır. Robot kol temelde istenen koordinatlara konumlanmakta ve ölçüm yapılan noktayı belirlemektedir. Robot kola monte edilmiş algılayıcılar aracılığı ile ısı büyüklüklere esas değerler okunmaktadır. Bu çalışmada bu büyüklük sıcaklık değerleri şeklinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın diğer önemli ayağı sabit sıcaklık sınır şartına sahip dikey plakayı sağlamak olmuştur. Dikey plaka yüzeyinin diğer tarafında herhangi bir ısı olayının deneysel ölçümleri etkilememesi için akışkan kaynama sıcaklığında ölçümler tekrarlanmıştır. Ayrıca ısı kayıpları aza indirmek için ısı yalıtım ölçüm yapılan yüzey dışındaki bütün yüzeylere uygulanmıştır. Ekler bölümünde deney düzeneği ve sıcaklığı sabitlenmiş dikey plaka Şekil 1 d1 gösterilmiştir. Burada deneysel ölçümlerin zorluğu birkaç noktada yaşanmıştır. Yüzey sıcaklığının plaka köşe noktalarında fazla sapmaması, akışkan dolu depo içerisinde akışkan hareketinin fazla olmaması için akışkan dolu kabın ölçüm yapılan düzleme dik doğrultudaki kalınlığı üzerinde birkaç

kez değişiklik yapılmak durumunda kalınmıştır. Bu problem yalıtımın biraz daha iyileştirilmesi ve depo kalınlığının azaltılmasıyla büyük ölçüde aşılmıştır. Ancak çalışmanın temel fonksiyonu ölçüm noktalarının robot kol kullanarak belirlenmesi ve bilgisayar ara yüzü olduğundan üzerine fazla yoğunlaşılmamıştır. Şekil 3.7. -3.9 dan görüleceği gibi, yüzey sıcaklığı sıfır noktasında oldukça birbirine yakın ölçülmüş ve bu değer ($\alpha=0.98$) ile ($\alpha=1.0$) arasında ölçülmüştür. Bu aralıkta sapmanın az olması duvar sıcaklığının sabit olarak kabul edilebileceği sonucunu doğurmuştur.

Analitik sonuçla deneysel ölçümlerin beraber gösterildiği Şekil 3.6 da deneysel ölçümleri bir miktar yüksek ölçüldüğü görülmektedir. Ancak bu sapma plaka üst yüzeyine doğru azaldığı ve aynı değerlere ulaştığı görülmektedir. Plakanın yüzeyinden uzaklaştıkça sıcaklık değerlerinin nasıl değiştirdiği ise Şekil 3.7 - 3.10 ile gösterilmiştir. Beklenildiği gibi yüzeyden uzaklaştıkça sıcaklık değerlerinin düştüğü görülmektedir. Ancak bu düşmenin farklı (x) noktaları için ölçüm sonuçları Şekil 3.11 de görüleceği gibi tamamen paralel eğriler olmadığı görülebilir. Bütün bunların ışığında bu çalışmada ortaya çıkan bazı sonuçlar aşığıdaki şekilde özetlenebilir.

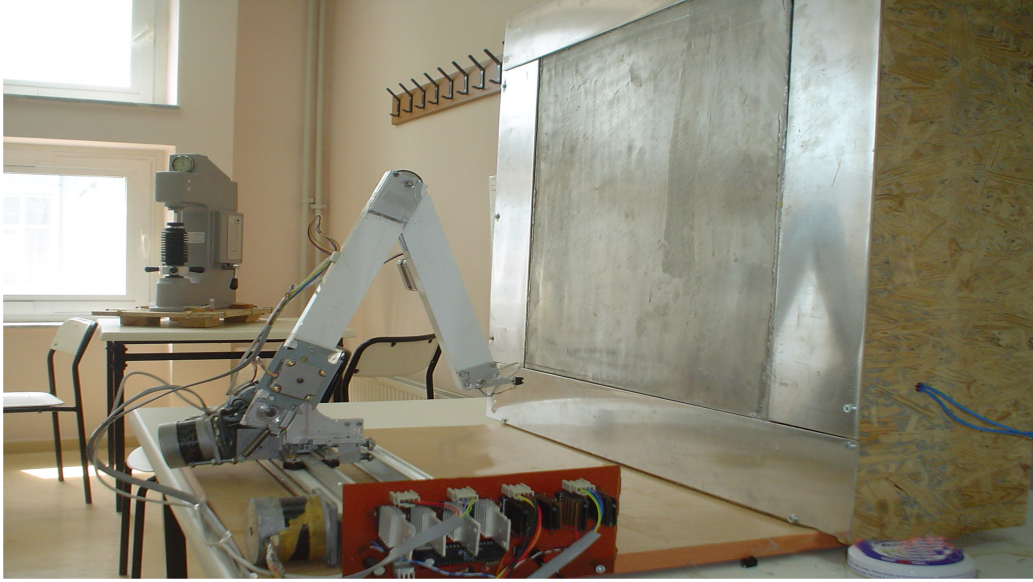
- Çalışma için tasarlanan robot kol çalıştırılabilmiş ve istenilen aralıkta deneysel amaçlı kullanılabılmıştır.
- Sabit yüzey sıcaklığı iyi bir yalıtım ile birlikte kaynama veya yoğuşma gibi sabit sıcaklıklarda gerçekleşen dönüşümlerden kaynama sıcaklığı ele alınarak basınç problemlerinden uzak kalınmıştır. Daha iyi sonuçlar için basınçlı bir ortamda sabit sıcaklıklı buhar ısı kaynağı olarak kullanılması daha iyi sonuçlar verebilirdi.

- Bu çalışmada robot kola sadece sıcaklık algılayıcı takılmış ve sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Ancak hız ve basınç algılayıcılar robot kola takılarak bu büyüklüklerin ölçümü de yapılabilirdi.
- Problem zamana bağlı bir doğal taşınım problemi olarak ele alınmadığından kararlı durumun sağlanması için bir süre düzeneğin hazır olması beklenilmiştir. Bunun yerine problem zamana bağlı doğal taşınım problemi olarak ele alınabilirdi.
- Bu çalışmada esas amaç doğal taşınım probleminden ziyade bir robot kol tasarlanarak, istenilen noktalardaki istenen büyüklüklerin ölçümü olduğundan robot kol tasarımına ağırlık verilmiştir. Doğal taşınım problemi ise bu robot kolun bir uygulaması olarak seçilmiştir.
- Robot kolların istenilen noktalara konumlanmasında esnemelerin fazla olduğu görülmüştür. Daha iyi bir zaman aralığında konumlanması için kol bağlantı elemanlarının az esnek malzemedan yapılmasının yerinde olacağı görülmüştür. Ancak akışı engelleyecek bir geometrik yapıda olmaması göz önünde bulundurulmalıdır.
- Okunan verilerin bilgisayara otomatik olarak aktarılması ve bu verilerin işlenebilirliğinin geliştirilen bir programla yapılabilmesi uygulamaya büyük bir esneklik getirmiştir.
- Kanal içi akışlar için ölçümler ve ulaşılması zor noktalara robot kolun konumlandırılmasının mümkün olması iyi bir sonuç olarak ortaya çıkmıştır.
- Ölçümlerin bilgisayar ortamında ve bilgisayar ağlarıyla kullanılabilir olması uzaktan kontrollü bir uygulama örneği oluşturmuştur. Laboratuar

ortamındaki robot kolun uzaktan kontrollü hale getirilmesiyle laboratuardan uzakta iken bile çalıştırılabilirliği sağlanmıştır.

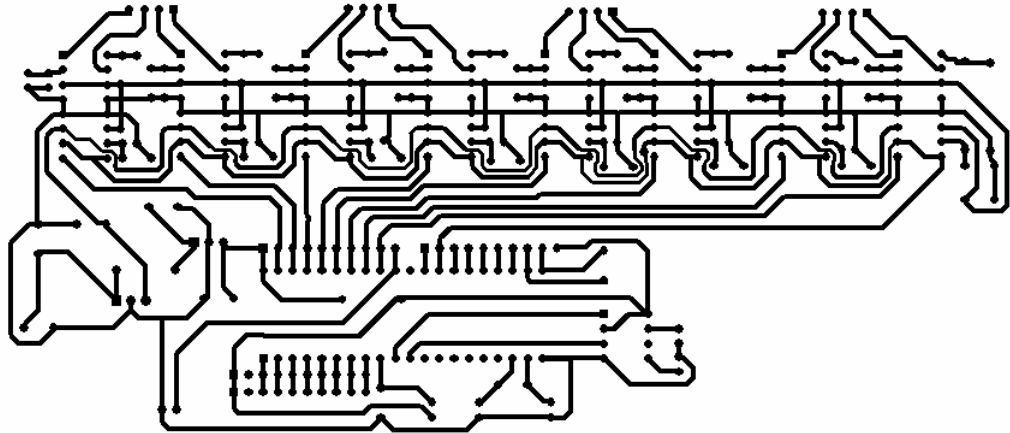
EKLER

i) Robot Resmi



Şekil 1. Deney düzeneğinin Fotoğrafından bir görünüş. Robot kol ve Dikey plaka.

ii) Baskı Devre



Şekil 2. kontrol kartı baskı devre şeması

iii) Program Kaynak Kodları

```
Dim s, s1, s2, s3, time1(100) As String
Dim sid(200), reg, i, senx(30), seny(30), sen(20), i1, sonuc As Integer
Dim x, y, a1, a2, pi, omuz, dir, al, beta, temp1, t6, t7, t8 As Double
Dim xmot, ymot, esx, esy, zmot, z1mot, xmot1, ymot1, z1mot1, esz1, esz,
zmot1 As Double
Dim tex1, tex2 As String
```

```
Private Sub Combo1_Click()
MSChart1.chartType = Combo1.ListIndex
End Sub
```

```
Private Sub Command1_Click()
Open "c:\id.txt" For Input As #1
i = 0
Do While Not EOF(1)
Input #1, reg
sid(i) = reg
i = i + 1
Loop

Close #1
k = 1
Command1.Enabled = False
For t = 1 To sid(0)
com2.Output = Str(7) + Chr(13)
delay
For m = 1 To 9
com2.Output = Str(sid(k)) + Chr(13)
delay
k = k + 1
Next
delay
Next
cevapk
Command1.Enabled = True
End Sub
```

```
Private Sub Command10_Click()
sonuc = 0
Do While sonuc <> 1
com2.Output = Str(10) + Chr(13)
delay
cevapk
k = 0
For i = 1 To Len(s)
s2 = Mid(s, i, 1)
s3 = ""
```

```

Do While s2 <> Chr(13)
s2 = Mid(s, i, 1)
If Not s2 = Chr(13) Then s3 = s3 + s2
i = i + 1
Loop
k = k + 1
If k = 2 Then sonuc = s3
Next
If sonuc = 257 Then
x = x + 0.01
run
End If
Loop
sonuc = 0
Do While sonuc <> 257
com2.Output = Str(10) + Chr(13)
delay
cevapk
k = 0
For i = 1 To Len(s)
s2 = Mid(s, i, 1)
s3 = ""
Do While s2 <> Chr(13)
s2 = Mid(s, i, 1)
If Not s2 = Chr(13) Then s3 = s3 + s2
i = i + 1
Loop
k = k + 1
If k = 2 Then sonuc = s3
Next
If sonuc = 1 Then
x = x - 0.01
run
End If
Loop
End Sub

Private Sub Command11_Click()
x = x - 0.1
run
End Sub

Private Sub Command12_Click()
Data1.Recordset.MoveFirst
End Sub

Private Sub Command2_Click()
p = InputBox("Okuma Periyodunu giriniz sn")
Timer1.Interval = p * 1000

```

End Sub

```
Private Sub Command3_Click()  
com2.Output = Str(1) + Chr(13)  
delay  
com2.Output = Str(Val(Text1)) + Chr(13)  
delay  
com2.Output = Str(Val(Text2)) + Chr(13)  
delay  
com2.Output = Str(Val(Text3)) + Chr(13)  
delay  
com2.Output = Str(Val(Text4)) + Chr(13)  
delay  
cevapk  
End Sub
```

```
Private Sub Command4_Click()  
If Command4.Caption = "Run" Then  
Timer1.Enabled = True  
Command4.Caption = "stop"  
Else  
Timer1.Enabled = False  
Command4.Caption = "Run"  
End If  
End Sub
```

```
Private Sub Command5_Click()  
com2.Output = Str(Val(3)) + Chr(13)  
delay  
com2.Output = Str(Val(Text5)) + Chr(13)  
delay  
cevapk  
End Sub  
Public Sub run()  
Cls  
'x = Val(kx)  
'y = Val(ky)  
'y = y + 0.1  
omuz = 30.1  
dir = 25.6  
temp1 = (omuz ^ 2 + x ^ 2 + y ^ 2 - dir ^ 2) / (2 * omuz * (x ^ 2 + y ^ 2) ^ (1 /  
2))  
If temp1 < -1 Then temp1 = -1  
If temp1 > 1 Then temp1 = 1  
al = ACos(temp1)  
temp1 = (omuz ^ 2 + dir ^ 2 - x ^ 2 - y ^ 2) / (2 * omuz * dir)  
If temp1 < -1 Then temp1 = -1  
If temp1 > 1 Then temp1 = 1
```



```

beta = ACos(temp1)
t7 = al * 57.2957795130822 + Atn(y / x) * 57.2957795130822
t8 = beta * 57.2957795130822
t6 = t7 + t8 - 180

y11 = 300 - omuz * 5 * Sin(al + Atn(y / x))
x11 = 10 + omuz * 5 * Cos(al + Atn(y / x))
y22 = -dir * 5 * Sin(beta + al + Atn(y / x) - pi) + y11
x22 = dir * 5 * Cos(beta - pi + al + Atn(y / x)) + x11
xmot = beta * 57.2957795130822 * 7.588888888888889

xmot = Int(xmot)
ymot = (90 - (al + Atn(y / x)) * 57.2957795130822) * 27.52222222222222
ymot = Int(ymot)
zmot = Int(Val(Text9) * 85)
z1mot = Int(t6 * (72 / 90))
xmot1 = esx - xmot
ymot1 = ymot - esy
z1mot1 = z1mot - esz1
zmot1 = esz - zmot
com2.Output = Str(1) + Chr(13)
delay
com2.Output = Str(xmot1) + Chr(13)
delay
com2.Output = Str(ymot1) + Chr(13)
delay
com2.Output = Str(zmot1) + Chr(13)
delay
com2.Output = Str(z1mot1) + Chr(13)
delay
esx = xmot
esy = ymot
esz1 = z1mot
esz = zmot
cevapk
Text6 = x
Text7 = y
End Sub

Private Sub Command6_Click()
bekle
End Sub

Private Sub Command7_Click()
Timer1.Enabled = False
y = Val(ky)
x = Val(kx)
run
com2.Output = Str(10) + Chr(13)

```

```
delay
cevapk
Print s
End Sub
```

```
Private Sub Command8_Click()
baslan
x = 26
y = 3.5
Text9 = 18
run
yaklas
x = x + 0.2
run
bekle
rec
yaklas
For it = 1 To 5
x = 0 - 0.1
run
bekle
rec
Next
End Sub
```

```
Private Sub Command9_Click()
Data1.Recordset.MoveFirst
k = Text10
k = k + 1
Data1.Recordset.MoveNext
Text11 = k + 2
Text10 = k
Data1.Recordset.AddNew
```

```
End Sub
```

```
Private Sub exit_Click()
Close #2
End
End Sub
```

```
Function ACos(ByVal number As Double) As Double
If Abs(number) <> 1 Then
ACos = 1.5707963267949 - Atn(number / Sqr(1 - number * number))
```

```

    Elself number = -1 Then
        ACos = 3.14159265358979
    End If
    'elseif number=1 --> Acos=0 (implicit)
End Function
Private Sub Form_Load()
    y = 8
    x = 12
    esx = 221 '1366 - 1155
    esy = -840
    esz1 = -48
    pi = 3.1415926535898
    If Command4.Caption = "Run" Then Timer1.Enabled = False
    If com2.PortOpen = False Then com2.PortOpen = True
    i1 = 1
    Combo1.AddItem "3d bar"
    Combo1.AddItem "2d bar"
    Combo1.AddItem "3d line"
    Combo1.AddItem "2d line"
    Combo1.AddItem "3d area"
    Combo1.AddItem "2d area"
    Combo1.AddItem "3d step"
    Combo1.AddItem "2d step"
    Combo1.AddItem "3d combination"

    End Sub
    Public Sub delay()
    For delsay = 1 To 1000000
    Next
    End Sub
    Public Sub cevapk()
    s = ""
    Do While m <> "k"
    s1 = com2.Input
    s = s + s1
    For i = 1 To Len(s)
    m = Mid(s, i, 1)
    If m = "k" Then i = Len(s)
    DoEvents
    Next
    Loop
    End Sub

    Private Sub MSChart1_OLEStartDrag(Data As MSChart20Lib.DataObject,
    AllowedEffects As Long)
    Data = 1
    End Sub

    Private Sub ref_Click()

```

```

baslan
End Sub

Private Sub Timer1_Timer()
sicak
End Sub

Public Sub chart(m As Integer)
For i = 1 To 19
MSChart1.Row = i
MSChart1.Column = m
MSChart1.Data = sen(i)
Next

End Sub

Public Sub sicak()
com2.Output = Str(2) + Chr(13)
delay
cevapk
k = 0
For i = 1 To Len(s)
s2 = Mid(s, i, 1)
s3 = ""
Do While s2 <> Chr(13)
s2 = Mid(s, i, 1)
If Not s2 = Chr(13) Then s3 = s3 + s2
i = i + 1
Loop
k = k + 1
If k = 2 Then
Text8 = Val(s3) / 8
sen(20) = Text8
End If
Next
time1(20) = Time
For i = 1 To 19
sen(i) = sen(i + 1)
time1(i) = time1(i + 1)
Next
MSChart1.ColumnCount = 16
For m = 1 To 16
chart (m)
Next
For i = 1 To 19
MSChart1.Row = i
MSChart1.RowLabel = time1(i)
Next
End Sub

```

```

Public Sub baslan()
com2.Output = Str(1) + Chr(13)
delay
com2.Output = Str(0) + Chr(13)
delay
com2.Output = Str(0) + Chr(13)
delay
com2.Output = Str(0) + Chr(13)
delay
com2.Output = Str(-100) + Chr(13)
delay
cevapk
esx = 221 '1366 - 1155
esy = -840
esz1 = -48
esz = 0
com2.Output = Str(9) + Chr(13)
delay
cevapk
End Sub

```

```

Public Sub yaklas()
sonuc = 0
Do While sonuc <> 1
com2.Output = Str(10) + Chr(13)
delay
cevapk
k = 0
For i = 1 To Len(s)
s2 = Mid(s, i, 1)
s3 = ""
Do While s2 <> Chr(13)
s2 = Mid(s, i, 1)
If Not s2 = Chr(13) Then s3 = s3 + s2
i = i + 1
Loop
k = k + 1
If k = 2 Then sonuc = s3
Next
If sonuc = 257 Then
x = x + 0.01
run
End If
Loop
sonuc = 0
Do While sonuc <> 257
com2.Output = Str(10) + Chr(13)
delay

```

```

cevapk
k = 0
For i = 1 To Len(s)
s2 = Mid(s, i, 1)
s3 = ""
Do While s2 <> Chr(13)
s2 = Mid(s, i, 1)
If Not s2 = Chr(13) Then s3 = s3 + s2
i = i + 1
Loop
k = k + 1
If k = 2 Then sonuc = s3
Next
If sonuc = 1 Then
x = x - 0.01
run
End If
Loop
End Sub

```

```

Private Sub Timer2_Timer()
Timer1 = False
End Sub

```

```

Public Sub rec()
'Text11.Text = Val(x)
'Text12.Text = Val(y)
'Text13.Text = Val(Z)
'Text14.Text = Val(sen(20))
Text15.Text = Time
'Data1.Recordset.FindLast
Data1.Recordset.AddNew
Data1.Recordset.Update
End Sub

```

```

Public Sub bekle()
Timer2 = True
Do While Timer2 = False
Loop
sicak
Do While Not sen(20) = sen(2)
sicak
Loop
End Sub

```

Kaynaklar

-
- ¹ Industrial Robotics Gordon M.MAIR
- ² Bilgisayar Kontrollü Robot Kol Mutlu Yağlıoğlu Yüksek Lisans Tezi
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
- ³ 2.H.I. Abu-Mulaweh, B.F.Armaly,Trans.Asme Ser.C.J.Heat Transfer,vol 117,
1995, pp.895-901,
- ⁴ Park,K.A., and Berlegs, A.E., Asme Journal of Heat Transfer, vol 109,
Viena, 1987, pp. 90-96
- ⁵ İ. Kayman, Eğitim Amaçlı Üç Serbestlik Dereceli Bir Robotun Yapımı ve
Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 1995
- ⁶ R. Güneş Endüstriyel Taşıma Amaçlı Magnetik Tutucu ve Robot Kol
Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri 1998
- ⁷ H. Sarıkaya İki Serbestlikli Düzlemsel Manipölatörlerin Ortak
Manipölasyonu, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Kayseri, 1995
- ⁸ Ö.R. Ergen Design, Construction and Implamentation of an Industrial
Robot, MSc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara 1995
- ⁹ S. Akmermer, Esnek İmalat Sistemlerinde Üç Serbestlik Dereceli
Manipölatör Tasarımı ve Kontrolü, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri,
1997
- ¹⁰ K. Şener, Path Control of a Robot Manipulator with Various Strategies.
MSc. Thesis, Dokuz Eylül University, İzmir, 1998
- ¹¹ G. Frank, Design and Real-Time Control of A Flexible Arm, MSc. Thesis,
Maryland University, Maryland. 1986

-
- ¹². S. Chang, Redundant-Drive Backlash-Free Robotic Mechanisms: Mechanism Creation, Analysis, and Control. Ph.D. Thesis, Maryland University. Maryland. 1991
- ¹³. K. Şener, Path Control of a Robot Manipulator with Various Strategies. MSc. Thesis, Dokuz Eylül University, İzmir, 1998
- ¹⁴. S.Sagiroglu, Artificial Neural Networks in Robotic Applications, Int Journal of Mathematical and Computational Applications. Vol 3. No.2. 67-81. (1998).
- ¹⁵. Z Qu, J. Dorsey. D. Dawson and R Johnson, A New Learning Control Scheme for Robots, pp. 1463-1468, Proceedings of the 1991 IEEE Int. Conf on Robotics and Automation, April 1991. Sacramento, California, USA
- ¹⁶. G. Michel. Programmable Logic Controllers and Architecture and Application. John Wiley and Sons, New York, 1990
- ¹⁷. Simatic S7-200 Programmable Controller, System Manual, Siemens A.G., Nuernberg, 1998
- ¹⁸. B.A. Brandin, The Real-Time Supervisory Control of an Experimental Manufacturing Cell, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, No.1,-14(1996)
- ¹⁹. N. Hurma, PID Kontrolör ve PID Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul 1998
- ²⁰. S. Kurtulan, "Simatic S7-200 ile Endüstriyel Otomasyon" s.1-9, İTÜ Elek.Elektronik Fak. Ofset Baskı Atölyesi, 1998
- ²¹. A Dalla and M. Ho, A Modified Model Reference Adaptive Control Scheme for Rigid Robots. IEEE Transactions on Robotics and Automation. Vol. 12. No 3. 466-469, (1996)

-
- ²². A. Kaelin and D. Von Grünigen. On the Use of A Priori Knowledge in Adaptive Inverse Control, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol.47, No.1, 54-62, (2000)
- ²³. A. Zomaya. M Suddaby and A Morris, Direct Neuro-Adaptive Control of Robot Manipulators, pp. 1902-1907. Proceedings of the 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, May. 1992, Nice, France
- ²⁴. S. Khemaisia and A. Morris. Neuro-adaptive Control of Robotic Manipulators, Robotica, Vol. 11, 465-473, (1993)
- ²⁵. B. Horne, M. Jamshidi and N. Vadiiee, Neural Networks in Robotics, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol.3, No.1,51-65, (1990)
- ²⁶. S. Jung and T.C. Hsia, Robust Neural Force Control Scheme Under Uncertainties in Robot Dynamics and Unknown Environment, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.47, No.2, 403-4S2, (2000)
- ²⁷. D. Özkök, PID, Fuzzy PID and Variable Structure Control of Two Link Manipulators, Ph.D. Thesis, Bosphorus University, İstanbul, 1998
- ²⁸. B.K, Yoo and W. Ham, Adaptive Control of Robot Manipulator Using Fuzzy Compensator. IEP.E Transactions on Fuzzy Systems, Vol.8, No.2. 186-199, (2000)
- ²⁹. N. Erakın, A Comparison of Conventional and Fuzzy PID Control, MSc. Thesis, Bosphorus University, İstanbul, 1992
- ³⁰. L. Behara and N. Kirubanandan, A. Hybrid Neural Control Scheme for Visual-Motor Coordination, IEEE Transactions on Control Systems, Vol.19,No.4,34-41,(1999)

-
- ³¹. P. Smagt, Visual Robot Arm Guidance Using Neural Networks, Ph.D. Thesis, University of Amsterdam, Amsterdam, 1995
- ³². R. D. Klafler, T. A. Chmielewski and M. Negin, Robotic Engineering. Prentice-Hall Inc, New Jersey. 1989
- ³³. S. Sagioglu, Modelling A Robot Sensor Using Artificial Neural Networks, Ph D. Thesis, Wales University, Cardiff, 1994
- ³⁴ CRAIG, J. (1986) Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Addison-Wasley: Reading, Mass.
- ³⁵ CRAIG, J. (1986) Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Addison-Wasley: Reading, Mass.
- ³⁶ www.ti.com
- ³⁷ <http://www.elektro.com.tr>
- ³⁸ www.dalsemi.com
- ³⁹ Frank P. Incropera ,”Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri” Literatür Yayıncılık, İstanbul, 2001
- ⁴⁰ By Valod Noshadi, Wilhelm Schneider, Institute of Fluid Dynamics and Heat Transfer, Viena, 1999