

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**6 SERBESTLİK DERECELİ ROTASYONEL STEWART PLATFORMU
TASARIMI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMLERİNDE EĞİM SENSÖRÜ
İLE KONUM KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Enes UĞUROĞLU

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**6 SERBESTLİK DERECELİ ROTASYONEL STEWART PLATFORMU
TASARIMI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMLERİNDE EĞİM SENSÖRÜ
İLE KONUM KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Enes UĞUROĞLU
518111048**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. S. Murat YEŞİLOĞLU

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 518111048 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Enes UĞUROĞLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**6 SERBESTLİK DERECELİ ROTASYONEL STEWART PLATFORMU TASARIMI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMLERİNDE EĞİM SENSÖRÜ İLE KONUM KONTROLÜ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd.Doç.Dr.S.Murat YEŞİLOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Akın DELİBAŞI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **27 Nisan 2015**
Savunma Tarihi : **29 Mayıs 2015**

Anneme ve babama,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasıyla birlikte şahsım adına çok önemli bir hedef olan sanayideki mühendislik çalışmalarına akademik odaklı çözümler sunabilme amacına adım atarak yüksek lisans eğitimimin sonuna gelmiş bulunmaktayım. İlk olarak bu tez çalışması sürecinde bana yol gösteren ve danışmanlığımı üstlenen değerli hocam sayın Yrd. Doç. Dr. S. Murat YEŞİLOĞLU'na sabrı ve hoşgörüsü için teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimim süresince her konuda bilgi ve fikirlerinden yararlanabildiğim İstanbul Teknik Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nün değerli öğretim üye ve görevlilerine teşekkür ederim.

Tezimde gerçekleştirdiğim çalışma konusunun ilk olarak ortaya çıkışında araştırdığım konuda yaşadığı tecrübeleri anlatan CPS Pressform firması kalite ekip lideri sayın Ahmet BAYÇELEBİ'ye ve araştırmamda yaptığım deneylerde ekipmanlarından faydalanmamı sağlayarak kalite laboratuvarını çalışmalarına açan Çelikel A.Ş. firması ve firma çalışanı Mak. Müh. Zafer KAYA'ya teşekkür ederim.

Mayıs 2015

Enes Uğuroğlu
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xviii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Literatür Araştırması	3
1.2.1 Paralel Manipulatörler	3
1.2.1.1 Üç Serbestlik Dereceli Manipulatörler	5
1.2.1.2 Dört Serbestlik Dereceli Manipulatörler	5
1.2.1.3 Beş Serbestlik Dereceli Manipulatörler	6
1.2.1.4 Altı Serbestlik Dereceli Manipulatörler	6
1.2.2 Seri Manipulatörler	7
1.2.3 Paralel ve Seri Manipulatörlerin Karşılaştırılması	7
1.2.4 Eğim sensörleri	9
1.2.4.1 Kuvvet denge sensörleri	9
1.2.4.2 Katı Hal Mikro-Elektromekanik Sensörler	10
1.2.4.3 Akışkan Dolgulu Sensörler	11
1.2.4.4 İvme Sensörleri	12
1.3 Amaç ve Kapsam	12
2. YÜZEY ÖLÇÜM SİSTEMLERİ VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ	15
2.1 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sistemleri	15
2.1.1 Mekanik Profilometre	15
2.1.1.1 Mekanik Profilometrenin Avantajları ve Dezavantajları	17
2.1.2 Optik Profilometre	18
2.1.2.1 Optik Profilometrenin Avantajları ve Dezavantajları	19
2.1.3 Atomik Kuvvet Mikroskobu.....	19
2.1.4 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sistemlerinde Karşılaşılan Hatalar.....	21
2.2 Yüzey Pürüzlülüğü	21
3. İSTATİSTİKSEL PROSES KONTROL	25
3.1 İstatistiksel Proses Kontrolde Kullanılan Yöntemler	26
3.1.1 Gruplandırma	27
3.1.2 Çetele	27
3.1.3 Histogram	28
3.1.4 Pareto Analizi	29
3.1.5 Neden-Sonuç Analizi.....	30
3.1.6 Serpilme Analizi	32

3.1.7 Ishikawa Kontrol Hesaplamaları	33
3.1.7.1 Altı Sigma	33
3.1.7.2 Kontrol Limitleri ve Grafikleri.....	35
3.1.7.2.1 Niceliksel değerler için istatistiksel yöntemler.....	33
3.1.7.2.2 Niteliksel değerler için istatistiksel yöntemler.....	35
3.1.7.2.3 Kontrol yönteminin seçimi.....	37
3.1.7.3 Proses Yeterlilik İndisleri.....	40
4. STEWART PLATFORMU	43
4.1 Stewart Platformunun Kullanım Alanları.....	46
4.2 Tekillik	49
4.3 Stewart Platformu Tasarımı.....	51
4.3.1 Tasarım Gereklilikleri.....	52
4.3.2 Bilgisayar Destekli Model	55
4.4 Kinematik	57
4.4.1 Stewart Platformunun Serbestlik Derecesi	58
4.4.2 Ters Kinematik	60
4.5 Modelleme	68
4.5.1 Reference Trajectory Generator Blok Şeması	69
4.5.2 Inverse Kinematic Module Blok Şeması	70
4.5.3 Plant Blok Şeması.....	72
4.5.4 Simulasyon Sonuçları	74
5. SİSTEM YAPISI VE DEVRE ELEMANLARI	79
5.1 İnklinometre Sensörü.....	80
5.2 Eyleyiciler ve Rumba Mikrodenetleyici.....	83
5.2.1 Adım Motorları	84
5.2.1.1 Adım Motor Çeşitleri	84
5.2.1.2 Mikroadımlama Teorisi.....	87
5.2.2 Eyleyicinin Özellikleri.....	88
5.2.3 Step Motor Sürücüsü	89
5.2.4 Mikrodenetleyici	90
6. DENEYLER VE İSTATİSTİKSEL HESAPLAMALAR	93
6.1 Ölçümler ve İstatistiksel Hesaplamalar	94
6.1.1 Durum 1: Manuel Konumlandırma.....	95
6.1.2 Durum 2: SPM ile Konumlandırma.....	97
6.2 Deney Sonuçları ve Karşılaştırma	99
6.2.1 Durum 1: Manuel Konumlandırma Sonuçları	99
6.2.2 Durum 2: SPM ile Konumlandırma Sonuçları	102
6.2.3 Durum 1 ve Durum 2'nin Karşılaştırılması ve Sonuçlar	104
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	107
KAYNAKLAR.....	109
EKLER.....	113
ÖZGEÇMİŞ.....	125

KISALTMALAR

SPM	: Stewart Platformu Mekanizması
IATF	: Uluslararası Otomotiv Faaliyet Grubu
IPK	: İstatistiksel Proses Kontrol
RSS	: Rotasyonel Küresel Küresel
CMM	: Koordinat Ölçüm Cihazı
DOF	: Serbestlik Derecesi
SSMEMS	: Katı Hal Mikro Elektromekanik Sensör
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
ÜKL	: Üst Kontrol Limiti
AKL	: Alt Kontrol Limiti
ÜT	: Üst Tolerans
AT	: Alt Tolerans
APQP	: İleri Ürün Kalite Planlaması
ESO	: Avrupa Uzay Rasathanesi
SPS	: Küresel Prizmatik Küresel
UPS	: Universal Prizmatik Küresel
UARTS	: Evrensel Eşzamansız Alıcı Ve Verici

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1:Paralel ve seri robotların kıyaslanması.....	8
Çizelge 3.1:Kontrol ölçümü için yapılan gruplandırma tablosu.....	27
Çizelge 3.2:Üretim prosesinde kullanılan bir çetele örneği.....	28
Çizelge 3.3:Pareto analizi için yapılan kusur kayıtları	30
Çizelge 3.4:Sigma Seviyeleri.....	35
Çizelge 4.1:SPM mekanizmalarında kullanılan eyleyicilerin karşılaştırılması.....	55
Çizelge 4.2:X5CrNi18-10 malzemesinin yüzde alaşım değerler.....	57
Çizelge 5.1:SCA100T inklinometre sensörleri.....	81
Çizelge 5.2:A4988 sürücüsü mikroadım modları	88
Çizelge 5.3:LDO-42STH33-0304 Step motorun özellikleri.....	89
Çizelge 6.1:Manuel konumlandırma ile elde edilen ölçüm sonuçları.....	93
Çizelge 6.2:SPM konumlandırması ile elde edilen ölçüm sonuçları	97
Çizelge 6.3:Manuel konumlandırılan ölçümlerdeki dağılım	100
Çizelge 6.4:SPM ile konumlandırılan ölçümlerdeki dağılım	102

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Koordinat Ölçüm Cihazı(CMM)	2
Şekil 1.2: Delta paralel manipülatörü	4
Şekil 1.3: Paralel manipulatörlerin sınıflandırılması	4
Şekil 1.4:Kovermans'ın geliştirdiği 4 dof uçuş simülatörü ve pasif kısıtlı sistem	5
Şekil 1.5: 5 dof mekanizmalar	6
Şekil 1.6: Endüstride sıklıkla kullanılan seri robotlar.....	7
Şekil 1.7 : Seri ve paralel robotlar	8
Şekil 1.8: Kuvvet denge sistemli inklinometre sensörünün iç yapısı	9
Şekil 1.9: Katı hal MEMS.....	10
Şekil 1.10:Elektrolitik eğim sensörü.....	11
Şekil 1.11: Kapasitif ivme sensörünün yapısı.....	12
Şekil 2.1: Mekanik Profilometre	16
Şekil 2.2: Mekanik profilometre ölçümü	17
Şekil 2.3: Optik profilometrenin iç yapısı	18
Şekil 2.4: Kontak mod atomik kuvvet mikroskobu	19
Şekil 2.5: Yüzey pürüzlülük parametreleri	22
Şekil 2.6: Yüzey dokusu gereklilikleri.....	23
Şekil 3.1: Gün içerisindeki üretim performansını değerlendiren histogram.....	29
Şekil 3.2: Çizelge 3.3'deki verilerin pareto analizi.....	30
Şekil 3.3: Neden-Sonuç analizinin akışı	31
Şekil 3.4:CPS Pressform'da yapılan hatalı yüzey pürüzlülük ölçümü analizi.....	32
Şekil 3.5: Pozitif ve negatif serpilme diyagramları	32
Şekil 3.6: Altı sigma normal dağılım grafiği	34
Şekil 3.7: x, S ve R grafikleri genel kurulum akışı.....	37
Şekil 3.8: İstatistiksel kontrol yöntemi seçimi.....	39
Şekil 4.1: Dr. Eric Gough tarafından geliştirilen ilk model ve günümüzdeki örneği	44
Şekil 4.2: 6-6,6-3,3-3 SPM yapıları	45
Şekil 4.3: Lineer ve dönel stewart platformları	45
Şekil 4.4: Swissair firmasının uçuş simülatörü	46
Şekil 4.5: Stewart platformlu artroskopi düzeneği	47
Şekil 4.6: Talaşlı imalat makinası olarak SPM	48
Şekil 4.7: Kuvvet-tork sensörü olarak SPM	48
Şekil 4.8:Tasarım akış şeması.....	52
Şekil 4.9: Pürüzlülük ölçümü yapılacak iş parçası(Soğutucu).....	53
Şekil 4.10: Soğutucu parçasının boyutları	54
Şekil 4.11: Stewart platformu CAD modeli.....	55
Şekil 4.12:Stewart platformu destek ve bağlantı elemanları	56
Şekil 4.13: İleri ve ters kinematik dönüşüm diyagramı	57
Şekil 4.14: Tasarlanın SPM mekanizmasının hareketleri	59
Şekil 4.15: Sapma(ψ) açısında platformun referan eksenine göre dönme hareketi ...	61
Şekil 4.16: SPM mekanizmasının vektörel gösterimi.....	62

Şekil 4.17: li vektörünün vektörel gösterimi.....	64
Şekil 4.18: Tek ve çift sayılı rotasyonel eklemler için A noktaları	65
Şekil 4.19 :Denklem 4.24’ün benzetildiği formun geometrik gösterii	67
Şekil 4.20: Modelin ana blok şeması	68
Şekil 4.21: Referans Trajectory Generator blok şeması	69
Şekil 4.22:Rotasyon matrisinin hesaplanması	70
Şekil 4.23: Inverse Kinematic Module blok şeması	71
Şekil 4.24: Tasarlanan SPM’in simulink mechanic explorer görüntüsü.....	72
Şekil 4.25: Stewart platformu simmechanics katı modeli.....	73
Şekil 4.26: z eksenini boyunca hareketi gösteren simulasyon	74
Şekil 4.27: Platformun z ekseninde hareketi.....	75
Şekil 4.28: Hareketli platformun z ekseninde hareketi esnasında oluşan eyleyici konumları	76
Şekil 4.29: Platformun yuvarlanma hareketi.....	77
Şekil 5.1: Sistemin genel yapısı	79
Şekil 5.2: SCA100T-D01 inklinometre	80
Şekil 5.3: Fonksiyonel blok diyagramı	81
Şekil 5.4: SCA100T-D01 sensörünün sıcaklık değişimine duyarlılığı	82
Şekil 5.5: SCA100T inklinometre sensörünün devre şeması.....	83
Şekil 5.6: Hibrid step motor kesitleri	85
Şekil 5.7: Hibrit adım motorlarda akım devresi.....	86
Şekil 5.8: Tam adım ve mikro adım faz(sol) ve zaman(sağ) diyagramları.....	88
Şekil 5.9: A4988 Polulu step motor sürücüsü.....	90
Şekil 5.10: Rumba mikrodenetleyici.....	91
Şekil 5.11: Rumba ve Arduino mikrodenetleyicileri seri haberleşme devresi.....	92
Şekil 6.1: Deney parçasının yüzey pürüzlülük tolerans değeri	93
Şekil 6.2: Mitutoyo 178-601 mekanik profilometre ve üretilen SPM.....	94
Şekil 6.3: SPM hareketinden sonra elde edilen ölçüm ucu-ölçüm yüzeyi dikliği	97
Şekil 6.4: Manuel olarak konumlandırılarak yapılan ölçümlerin kontrol grafiği	100
Şekil 6.5: Manuel konumlandırma ile yapılan ölçümlerin sigma grafiği	101
Şekil 6.6: SPM ile konumlandırılarak yapılan ölçümlerin kontrol grafiği	102
Şekil 6.7: SPM ile konumlandırılarak yapılan ölçümlerin sigma grafiği	103
Şekil 6.8:Manuel ve SPM konumlandırılmalı kontrol grafiklerinin karşılaştırılması	104
Şekil 6.9:SPM ve manuel konumlandırılarak ölçülen ürünlerin sigma grafikleri. .	105

SEMBOL LİSTESİ

l_i	: i. hayali uzvun uzunluğu
${}^P R_B$	: Evrensel dönüşüm matrisi
F_e	: Kuvvet denge sensörü manyetik kuvveti
W	: Ölçüm ucu ağırlığı
R	: Ölçüm ucu yarıçapı
E'	: Efektif young modülü
F_n	: Ölçüm ucuna etki eden normal kuvvet
a_0	: İntermoleküler mesafe
H	: Hamaker sabiti
z_y	: Geçici ölçüm ucu mesafesi
R_a	: Yüzey hatalarının aritmetik ortalaması
R_z	: Yüzeyin sahip olduğu en büyük 5 tümsek ve 5 çukurun aritmetik ortalaması
R_p	: Yüzeyin en büyük tümsek ve çukurunun toplam uzunluğu
C_p	: Prosesin yeterlilik değeri
C_{pk}	: Prosesin uzun dönem yeterlilik değeri
σ	: Ölçüm hatası(sigma) değeri
θ_{end}	: Mafsal değişkenlerinin konumu
W_h	: Uç işlevcisinin hızı
N	: Mekanizmanın efektif serbestlik derecesi
λ	: İş yapılan ortamdaki serbestlik derecesi
i	: Mekanizmanın eklem sayısı
j	: Mekanizmanın mafsal sayısı
I_d	: Pasif serbestlik derecesi sayısı
φ	: Yuvarlanma açısı
θ	: Yunuslama açısı
ψ	: Sapma açısı
T	: Lineer yer değiştirme vektörü
p_i	: i. mekanizma uzvunun hareketli platform bağlantı koordinatları
b_i	: i. mekanizma uzvunun sabit platform bağlantı koordinatları
a	: Rotasyonel eklem uzunluğu
s	: Hareketli platforma bağlı eklemlerin uzunluğu

6 SERBESTLİK DERECELİ ROTASYONEL STEWART PLATFORMU TASARIMI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMLERİNDE EĞİM SENSÖRÜ İLE KONUM KONTROLÜ

ÖZET

Kontrol ve otomasyon sistemleri 1700’lü yıllarda başlayan sanayide makineleşme sürecinin günümüzdeki zirvesidir. Üretiminde zaman ve emek gereken, risk taşıyan aynı zamanda hataya açık olan ürünlerin üretimi, kontrolü ve taşınması işlemlerinin bir otomasyon sistemiyle yapılması en verimli çözümdür. Özellikle seri olarak yapılan ve kullanımında insan hayatı için risk taşıyan ürünlerin hatasız üretiminin ve hatalı üretilen ürünlerin kullanımını engellemek adına yapılan kontrollerin insan dikkatinden bağımsız olarak yapılması son derece önemlidir. Günümüzde paralel ve seri robotlar insan dikkatinden bağımsız, güvenli, hızlı ve stabil çalışmaların istendiği süreçlerde sanayide kendilerine yer bulmuşlardır.

Seri olarak üretilen ürünlerde kısa zamanda çok sayıda ürünün üretilmesi daha düşük maliyette üretim yapılabilmesine olanak sağlamasına rağmen hataların kontrolü zorlaşmakta ve hatta bazen imkansız hale gelebilmektedir. Bu sebeple üretim proseslerinin güvenilirliği prosesin çok dikkatli bir şekilde izlenerek yapılan detaylı istatistiksel analizlerin sonuçlarının iyi bir şekilde yorumlanmasıyla sağlanmaktadır. İstatistiksel proses kontrol bu amaçla bir üretim prosesinin istenilen yeterliliği mevcut durumda ne oranda sağlayabildiğini matematiksel veriler yoluyla sunan bir hesaplama yöntemidir. İstatistiksel proses kontrol, aynı zamanda kontrol edilen ölçü değerinin her bir üretimde tolerans limitleri dahilinde dağılımını incelediğinden yalnızca mevcut yeterliliği değil, gelecek üretimlerdeki yeterliliği de hesaba katmaktadır. Dolayısıyla istatistiksel proses kontrolü hesaplamaları sonucunda yeterli bir proses değerinin bulunabilmesi için ürünlerin ölçülerinin tolerans limitleri dahilinde olması değil aynı zamanda her zaman düzgün bir hata dağılımı göstermesi gerekmektedir. Analiz sonucunda istenilen yeterliliğe sahip olmayan bir sonucun çıkması bu ürünün ilgili ölçüsünün sürekli olarak kontrol edilmesini gerektirerek üretim maliyetini çok önemli boyutlarda arttırdığından yapılan analizin en iyi şartlarda ve hatasız yapılabilmesi çok önemlidir.

Yüzey pürüzlülük ölçüleri özellikle talaş kaldırmadan elde edilen yüzeylerde değişiklik gösterme eğilimindedir. Bir profilometre cihazı ile yüzey pürüzlülük değeri ölçülürken ölçüm ucunun ölçüm yüzeyine tam 90° olarak konumlandırılmaması yüzey pürüzlülük ölçümlerinde elde edilen hatalı ölçü değerlerinin en büyük sebebidir. İstatistiksel proses kontrolü sürecinde veriler toplanırken bir ürünün aynı ölçüsü birçok parça üzerinde ölçüldüğünden konumlandırmanın her seferinde farklı açılarda yapılması hem hatalı ölçü değerlerinin alınmasına hem de alınan hata değerlerinin düzgün bir dağılım gösterememesine sebep olmaktadır. Bu durum üretilen ürünün, istenilen proses yeterliliğine sahip olmasına rağmen sürekli olarak kontrol altında tutulmasına sebep olmakta, maliyetini yükseltmekte ve hatta bazen doğru olarak üretilen ürünün hurdaya ayrılmasına sebep olmaktadır.

Bu çalışmanın amacı otomotiv sanayinde yüzey pürüzlülüğü değeri üzerine yapılan İPK çalışmaları sonucunda bulunan prosesin yeterlilik değerini önemli ölçüde arttırmak ve bu çalışmalar esnasında ölçüm parçasının hazırlanmasında kaybedilen

zamanı önemli ölçüde azaltarak daha düşük maliyetli ve yüksek kalitede ürünlerin üretilmesine katkı sağlamaktır.

Bu amaca ulaşmada kullanılması planlanan en önemli sistem seri çalışan ve oldukça hassas pozisyonlama özelliği bulunan bir paralel robot olan stewart platformudur. Ölçümü yapılacak parçaların geometrileri ve fiziksel özellikleri hesaba katıldığında bu çalışmada stewart platformu literatürde sıklıkla kullanılan pistonlar yardımıyla değil daha düşük maliyetli ve hassas konumlama gereken yerlerde sıklıkla kullanılan step motorlar yardımıyla yapılacaktır. Paralel robotun konumlandırılmasında eğim sensörü olarak kuvvet-denge sensörlü inklinometreden yararlanılacak ve ölçülen değer paralel robotun mikrodeneleyecisine seri olarak bağlanan inklinometrenin mikrodeneleyicisinden gönderilecektir.

Bu çalışmada mevcut yüzey ölçüm teknolojileri ve çalışmada kullanılan mekanik profilometre yapısı detaylı olarak anlatılmış, deneylerde prosesin yeterliliğinin hesaplanmasında kullanılan istatistiksel proses kontrol yöntemlerinden bahsedilmiştir. Ölçümü yapılacak ürünü en iyi şekilde konumlandırmak için tasarım akış şeması oluşturulmuş ve bu şemaya göre tasarım gereklilikleri belirlenmiştir. Belirlenen tasarım gereklilikleri doğrultusunda çalışmada kullanılacak stewart platformu 3 boyutlu tasarım programı yardımıyla tasarlanmıştır.

Stewart platformunun pozisyon kontrolü ters kinematik hesaplamalardan yararlanılarak geliştirilen algoritma ile gerçekleştirilmiştir. 3 boyutlu olarak gerçekleştirilen tasarım simulink programında mekanik olarak modellenmiş ve gerekli hareket kısıtları tanımlanarak ters kinematik simulasyonu ile, tasarlanan modelin hareketi gözlemlenmiş ve geometrik yöntemle hesaplanan ters kinematik analiz doğrulanmıştır.

Konumlandırılması yapılacak ölçüm yüzeyinin eğimini ölçmede kullanılabilecek eğim sensörünün seçilebilmesi için mevcut teknolojiler teorik olarak incelenmiş ve uygun sensörün seçimi yapılmıştır. Stewart platformunun mekanik yapısı ve sahip olduğu eyleyicilerin kontrolünde kullanılan mikrodeneleyiciler ile inklinometre sensörünün kontrolünde kullanılan mikrodeneleyici ve aralarında oluşturulan seri iletişim devre elemanlarını kapsayan sistem yapısı incelenmiş ve detaylı olarak anlatılmıştır.

Çalışmanın sonunda paralel platformların hassas konumlandırma kabiliyetlerinden yararlanılarak yüzey pürüzlülük ölçümü yapılacak ürünlerin ölçüm yüzeylerinin profilometrenin ölçüm ucuyla tam 90°'lik açıya sahip olacak şekilde konumlandırılması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada örneklenen yüzey pürüzlülük ölçüsü gibi krtitik karakteristiğe sahip ölçülerin tolerans limiteri dahilinde üretilebileceğini kanıtlayan ve zorunlu olarak yapılan istatistiki yöntemler ve hesaplamalar anlatılmış ve sunulan sistemin istatistiksel olarak proses yeterliliğine katkısı araştırılmıştır. Sunulan çözüm sayesinde yüzey pürüzlülük ölçüm prosesinin istatistiksel olarak yeterliliğinin artırılması sağlanmış ve kontrol sıklığı önemli ölçüde azaltılarak üretim maliyetleri düşürülmüştür.

Oluşturulan sistem ile birlikte yüzey pürüzlülük ölçümlerinde ölçüm numunelerinin rotasyonel bir RSS-SPM ile konumlandırılması ilk kez yapılmış ve bu proses operatör dikkatinden bağımsız hale getirilerek yeni sistemin katkısı incelenmiştir.

DESIGNING 6 DEGREES OF FREEDOM ROTARY STEWART PLATFORM AND POSITIONING USING TILT SENSOR DURING THE SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENT

SUMMARY

Today control and automation systems are the latest technology of the mechanization process which starting in the year 1700. Automation systems are the easiest and most safest solution especially for the manufacturing a product which requires a lot of production time, highly labor power and contain risks for humanity. During the serial production, control process is as important as production of the products especially when the products are safety parts which have dimensionally critical characteristics. Therefore it is one of the most important issue to making the process independent of human attention. Today parallel and serial manipulators found themselves in the industrial applications where the process requires safety, stabilization, pace and independence of human attention.

Although the serial production providing short time manufacturing process with lower cost, control process to detection of the defective products becomes very difficult even sometimes impossible. Therefore to ensure the reliability of the production, process parameters must be monitored interpreting the results of the statistical analysis. For this purpose statistical process control is a calculation which provides mathematical data to measure required capability of a manufacturing process. But also, statistical process control analyzing distribution of the measured data within the tolerance limits for each production process, it is not only provides existing capability, qualification of the future production is also taken into account. Therefore, in order to find an adequate process value as a result of statistical process control calculations, it is not only requirement to ensure dimensions within tolerance limits but also deviation of the dimensions always must be demonstrate uniform distribution. Because of the inadequate process capability values of the statistical analysis requires constantly detection of the related dimensions of the products which causes significant increase of the production cost, it is very important to ensure precise conditions during the measurement for the statistical process control.

Statistical Process Control (SPC) is an industry-standard methodology for measuring and controlling quality during the manufacturing process. Quality data in the form of product or process measurements are obtained in real-time during manufacturing. This data is then plotted on a graph with pre-determined control limits. Control limits are determined by the capability of the process, whereas specification limits are determined by the client's needs. Data that falls within the control limits indicates that everything is operating as expected. Any variation within the control limits is likely due to a common cause the natural variation that is expected as part of the process. If data falls outside of the control limits, this indicates that an assignable cause is likely the source of the product variation, and something within the process should be changed to fix the issue before defects occur.

Surface roughness measurement tend to change especially for the surfaces which produces without machining operation. Most important cause of faulty measurement values during the measurement of the surface with the profilometer is location failure between measurement tip of the profilometer and the related measurement surface which requires exactly 90 degree to achieve best result. While collecting data for

statistical process control, same dimension of the parts measuring in many times, with every times different part and measurement tip location causes measurement failure and non-uniform distribution of the deviations. In this case, the produced product, although having the required process capability, leads to continuously kept under control which causes increase of the cost and sometimes even leads to scrapping of the correct products.

This study aims to significantly increase process capability values as a result of the statistical process control analysis of the surface measurement and reduce time lost in the preparation of the measurement products during this studies which allows to production of the high quality products with lower cost requirement.

A parallel robot stewart platform that works rapidly and precisely is the most important system which planned to achieve this purpose. Stewart platform is a parallel manipulator device that is used for positioning and motion control. The device consists of two plates joined by six adjustable legs that allow it to be precisely adjusted and controlled. Due to the six-leg design, the stewart platform is sometimes called a hexapod. The term can be used to describe any six-legged device. The stewart platform is also classified as a parallel manipulator, meaning that the legs of the platform are attached to only the base and upper plate but not to each other. By contrast, a serial manipulator uses a series of rigid structures connected by joints. The manipulation of one of these rigid sections directly affects the positioning of the sections after it. Although originally used to test tires, the stewart platform soon found applications in the aerospace, automotive, and machining industries. It is perhaps best known for its use in providing the precise movement required of flight simulators. In this study the stewart platform will be created by stepper motor due to lower cost and accurate positioning instead of pistons unlike literatures. Force-balance inclinometer sensor will be utilized for positioning of parallel robot as tilt sensor and measured value will be send from microprocessor of inclinometer to microprocessor of the stewart platform via serial communication between them.

In this study current surface measurement technologies and structure of mechanical profilometer were described in detail, SPC methods which uses for calculation to capabilities of the process in experiments are mentioned. Design flow chart was created for positoning measurement sample to proper location and design requirements were determined according to the chart. In this context the Stewart platform was designed by 3D programme.

Stewart platform's position control was carried out by an algorithm that developed by inverse kinematics calculations. 3D actualized design was modelled mechanically in Simulink programme and movement was observed via inverse kinematics simulation after necessary motion limit assigned and geometrically calculated inverse kinematic analysis verified.

Available technologies of the tilt sensor investigated theoretically for the selection of appropriate sensor to measure inclination values of the surface which will be positioned to perfect measurement tip and the measurement surface location. Mechanical structure of the stewart platform, system structure and circuit structure of microprocessor of the stewart platform's actuators and the microprocessors of the inclinometer sensor and their serial communication systems are described.

In conclusion, utilizing the precise positioning capability of the parallel manipulators we ensure that surface which will be measured by profilometer postioned 90 degree with the measurement tip of the profilometer for each measurent during statistical

analysis. Statistical methods and calculations which required necessarily for the parts having critical characteristics such as given in this study are described and contribution of given automation system to statistical process control was investigated. Through the proposed solution statistical capability of the surface measurement process increased and control frequency of the products reduced significantly which leads to production cost reduction. Provided increase of the process capability ensured that frequency of the statistical process control analysis which requires for critical characteristic measurement reduced from every production to every two weeks.

Samples which are going to be positioned through a rotational RSS-SPM in surface roughness measurement is applied for the first time with the generated system and while surface roughness measurement process becomes independent from attention of operator, contribution of generated system was investigated.

1. GİRİŞ

İPK çalışmaları günümüzde seri olarak yapılan üretimlerde kalitesizlik maliyetlerinin önüne geçmede vazgeçilmez bir yöntemdir. Prosesi gözlemlemeye ve kontrol altında tutmaya yarayan bu yöntemin temel amacı prosesin verimliliğini günden güne arttırarak sahip olduğu potansiyele erişmesini sağlamaktır.

Uluslararası Otomotiv Faaliyet Grubu(IATF) tarafından hazırlanan ve otomotiv sanayinde kullanılan TS-16949 kalite standartlarına göre çok hassas ve dar toleranslara sahip ürünlerin kontrol altında tutulması için İPK çalışmaları uygulanması gereken bir zorunluluktur. Özellikle otomotiv sanayinde fren aksamları, koltuk parçaları, emniyet ürünleri gibi insan hayatı üzerinde risk taşıyan ürünlerin seri üretimi sırasında prosesin güvenilirliği son derece önem kazandığından İPK çalışmaları tıpkı bir seri üretim çalışması gibi zaman ve maliyet gerektiren bir çalışma haline gelmiştir.

18.yüzyılda başlayan sanayide makineleşme sürecinin zirvesi günümüzde otomasyon sistemleridir. Üretilmesinde zaman ve emek gereken aynı zamanda hataya da açık olan ürünlerin bir otomasyon sistemi ile üretilmesi en verimli çözümdür. İPK süreci özellikle dar toleransa sahip emniyet parçalarında prosesin milyonlarca üretimde her an güvenli sonucu verebilmesi için sahip olduğu mevcut toleranstan daha hassas değerleri ölçmekte olduğundan hataya çok açık emek gerektiren ve zaman alan bir süreçtir. Bu sebeple günümüzde İPK çalışmaları yürütülürken de otomasyon sistemlerinden yararlanmak kaçınılmaz hale gelmiştir.

Otomotiv sanayinde ölçüm sistemleri çeşitli robotik otomasyonlar yardımıyla kurulmaktadır. Bunlardan en sık kullanılanı Şekil 1.1 de gösterilen koordinat ölçüm cihazı(CMM) dır.

CMM uç işlevcisi optik, mekanik veya lazer sistemli ölçüm ucu olan ve objelerin geometrik karakteristiklerini ölçen bir kartezyen robottur. Otomotivde sıklıkla kullanılan bir diğer ölçüm cihazı da nesnelerin yüzey pürüzlülüklerini ölçen profilometre cihazlarıdır. Tüm bu cihazlar hassas ölçümlerin düşük hatalarla

yapılabilmesini mümkün kıldıysa da ölçüm parçasını konumlama veya hazırlama aşamaları hala birçok hataya neden olan ve uzun zamanlar kaybettiren aşamalardır. Bu çalışmada bir paralel robot olan stewart platformu bir konumlandırıcı robot olarak üretilerek profilometre ile yapılan İPK çalışmaları sırasında gerçekleştirilen seri ölçümlerde manuel hazırlama ve konumlamadan kaynaklanan hatalar ve kaybedilen zaman minimuma indirilmeye çalışacaktır.



Şekil 1.1: Koordinat Ölçüm Cihazı(CMM).

Stewart platformu pozisyonlama ve hareket kontrolünde kullanılan bir paralel manipulatördür.6 eklem tarafından birbirine bağlı 2 tabladan oluşur.Yüksek hızlı hareket ve hassas konumlama özelliğine sahip olan stewart platformu hassas ve seri olarak yapılacak üretim, ölçüm gibi işler için oldukça uygun bir yapıya sahiptir.

Bu bölümde bu çalışmanın amacı ana başlıklarıyla anlatılacak,çalışmada kullanılacak sistemlerin günümüzdeki işlevleriyle ilgili örnekler verilecek ve ulaşılması beklenen sonuç özetlenecektir.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı otomotiv sanayinde yüzey pürüzlülüğü değeri üzerine yapılan İPK çalışmaları sonucunda bulunan prosesin yeterliliği değerini önemli ölçüde arttırmak ve bu çalışmalar esnasında ölçüm parçasının hazırlanmasında kaybedilen zamanı önemli ölçüde azaltarak daha düşük maliyetli ve yüksek kalitede ürünlerin üretilmesine katkı sağlamaktır.

Bu amaca ulaşmada kullanılması planlanan en önemli sistem seri çalışan ve oldukça hassas pozisyonlama özelliği bulunan bir paralel robot olan stewart platformudur. Ölçümü yapılacak parçaların geometrileri ve fiziksel özellikleri hesaba katıldığında bu çalışmada stewart platformu literatürde sıklıkla kullanılan pistonlar yardımıyla değil daha düşük maliyetli ve hassas konumlama gereken yerlerde sıklıkla kullanılan step motorlar yardımıyla yapılacaktır.

1.2 Literatür Araştırması

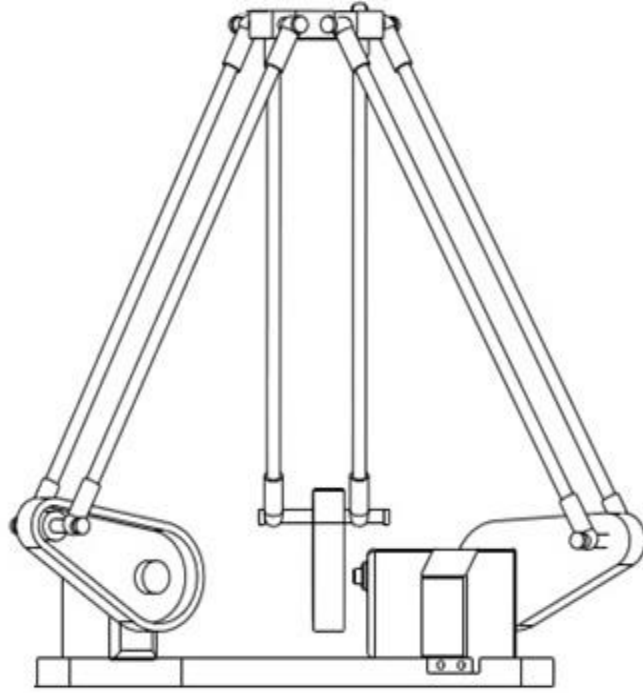
1.2.1 Paralel Manipulatörler

Paralel manipulatörler iki ya da daha fazla seri mekanizmanın ortak bir uç işlevcisine bağlanması ile meydana gelen sistemlerdir. Şekil 1.2’de gösterilen delta robotu üç ayrı seri mekanizmanın aynı uç işlevcisine bağlanması ile oluşturulmuştur. Paralel manipulatörler rijitlik ve eyleyicilerin yerleşimi açısından açık zincirli manipulatörlere oranla daha üstündürler. Örnek olarak şekil 1.2’ de görülen sistem tabanından uzak eklemlerde herhangi bir eyleyici kullanmaya gerek kalmaksızın her bir eklemler zincirinde sadece tabanda bulunan bağlantı elemanlarının hareketlendirilmesiyle rahatlıkla kontrol edilebilir. Paralel manipulatörler bir veya daha fazla kinematik zincire sahip olduklarından aynı zamanda kapalı zincir manipulatörler olarak da adlandırılırlar.

Gelişmekte olan paralel mekanizmaların kökeni 1800’lü yılların sonunda Maxwell(1890) tarafından yayınlanan ilk teorik makaleye dayanmaktadır. İlk paralel mekanizmalardan bir tanesi 1942 yılında Pollard tarafından patenti alınan ve araba boyamak için kullanılan paralel mekanizmadır. Gough da 1962 yılında lastik testi için bir paralel manipulator tasarlamıştır 1965 yılında D. Stewart başka bir alanda, uçuş simülasyonu olarak paralel manipulatörü kullanmıştır. Bu mekanizma, doğrusal

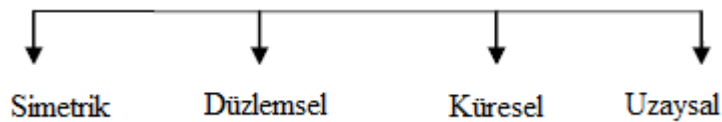
hareket eden altı adet paralel bacağın üst ve alt kısmına plakaların eklenmesiyle , üç doğrusal ve üç açısıl olmak üzere 6 serbestlik derecesine sahiptir.

Paralel manipulatörler günümüzde otomotiv sanayinde kuvvet test cihazları olarak, havacılık sanayinde pilotların eğitiminde uçuş simülatörü olarak ve hassas konumlandırılabilme ve seri hareket kabiliyetlerinden ötürü son zamanlarda medikal sektörde cerrahi operasyonlarda sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 1.2: Delta paralel manipulatörü.

Paralel manipulatörleri şekil 1.3'deki gibi simetrik, düzlemsel, küresel ve uzaysal olmak üzere 4 gruba ayırmak mümkündür. Simetrik manipulatörler uzuv sayıları serbestlik derecelerine ve aynı zamanda çevrim sayılarına eşit olan manipulatörlerdir.



Şekil 1.3: Paralel manipulatörlerin sınıflandırılması

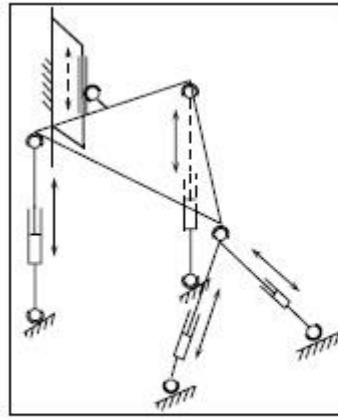
Düzlemsel manipulatörler iki ya da daha fazla düzlemsel kinematik zincirin ortak rijit platform üzerinde hareket etmesi ile meydana gelen sistemlerdir. Küresel manipulatörler yalnızca uç işlevcisinin küresel hareketler gerçekleştirecek şekilde kontrol edilmesiyle oluşan yapılardır. Uzaysal manipulatörler ise altıdan az ve üçten daha fazla serbestlik derecesi bulunan bazı özel paralel mekanizmalar sınıfına girer.[3]

1.2.1.1 Üç Serbestlik Dereceli Manipulatörler

Üç serbestlik dereceli manipulatörler genellikle topla-bırak operasyonları için kullanılan mekanizmalardır. Bu robotlar arasında en çok kullanılanı şekil 1.2’de görülen Ecole Polytechnique’te Clavel tarafından bulunan delta robotlardır.[5] Delta robot uç işlevcisi x,y,z eksenlerinde doğrusal hareket ederek işlevleri yerine getirir.

1.2.1.2 Dört Serbestlik Dereceli Manipulatörler

Dört serbestlik dereceli manipulatörler ilk olarak 1975 yılında Kovermans tarafından şekil 1.4.a’da görülen pasif kısıtlı sistemler baz alınarak bir uçuş simülatörü olarak geliştirildi. Pasif kısıtlı sistem burada platformun ϕ, θ, ψ açılarında dönel, doğrusal olarak yalnızca z ekseninde hareketlerini yapmasına izin veren sisteme verilen addır.



a) Pasif kısıtlı sistem



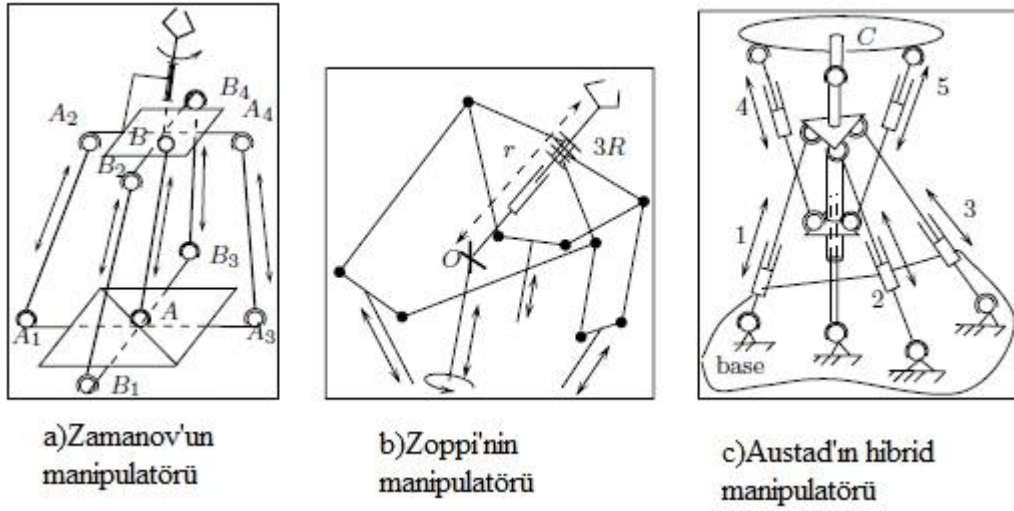
b) 4 dof uçuş simülatörü

Şekil 1.4: Kovermans’ın geliştirdiği 4 dof uçuş simülatörü ve pasif kısıtlı sistem.

Bölüm 1.2.1.1’de anlatılan delta robotun uç işlevcisine bir tutucu bağlanarak serbestlik derecesini dörde çıkarmak mümkündür.

1.2.1.3 Beş Serbestlik Dereceli Manipulatörler

Beş serbestlik dereceli manipulatörlerde pasif kısıtlı sistemler sınıfına girer. Beş serbestlik dereceli mekanizmalar özellikle üretim endüstrisinde beş eksen işleme yapan sistemlerde sıklıkla görülür. Bir ürün işleme sırasında dikey ekseninde rotasyonel hareket kesinlikle gerekli bir serbestlik derecesi olmadığından bu kullanım alanlarında beş serbestlik dereceli mekanizmalar daha kullanışlıdır. Bir diğer beş serbestlik dereceli mekanizma ise Austad tarafından bulunan seri ve paralel mekanizmaların hibrid birleşimi ile elde edilen mekanizmadır.[4]



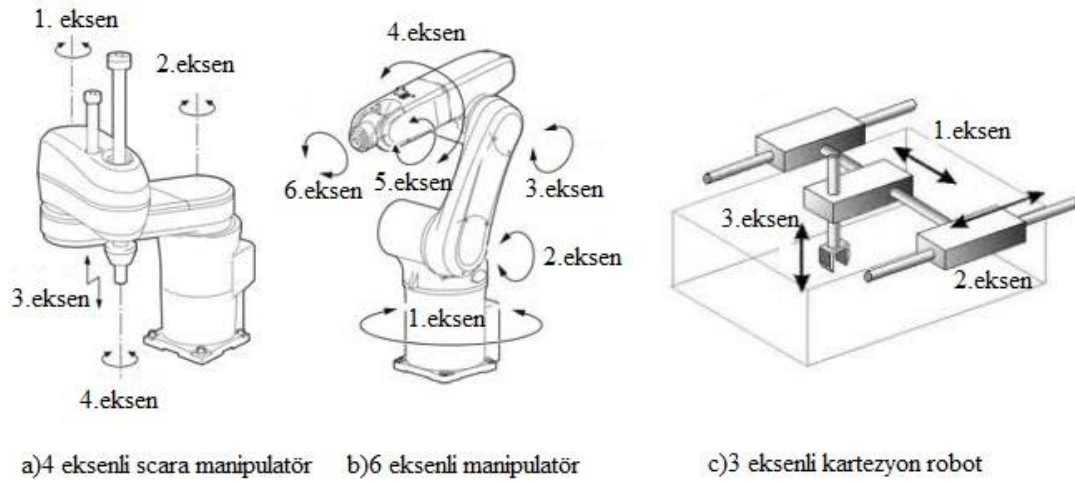
Şekil 1.5: 5 dof mekanizmalar.

1.2.1.4 Altı Serbestlik Dereceli Manipulatörler

6 dof paralel manipulatörler en popüler paralel robot mekanizmasıdır. Serbestlik dereceleri genellikle uç işlevcisinin ya da hareketli platformun x, y, z doğrusal ve ϕ, θ, ψ açısal yönlerinde yaptıkları hareketi ifade eder. Bu yapılardan en temeli bölüm 1.2.1'de bahsedilen Stewart platformudur. Son yıllarda meydana getirilen 6 dof paralel mekanizmaları genellikle temel Stewart platformunun mevcut kinematik konfigürasyonunu farklı bağlantı elemanları kullanarak veya bağlantı uzuvlarının pozisyonlarını değiştirilerek elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılacak olan model de 1983 yılında Hunt'ın açıkladığı aynı hareketin sadece prizmatik eyleyicilerle değil sabit platforma bağlanan dönel eyleyicilerle de yapılabildiğini gösteren mekanizmadır.

1.2.2 Seri Manipulatörler

Seri manipulatörlerde uç işlevcisi birbiri ardına bağlanan ve herbiri bağımsız olarakta kontrol edilebilen mekanizmalardır. Seri mekanizmaların en büyük avantajı çalışma uzaylarının çok fazla kısıtlı olmamasıdır. Seri manipulatörler günümüzde hemen hemen tüm sektörlerde kendilerine yer edinmişlerdir. İlk olarak seri robotlar insan vücudunun işlevlerini kopya ederek bazı zor görevlerde kullanılmak üzere tasarlandı. Daha sonra bu karmaşık yapı sadece belirli görevi yerine getirmek üzere basitleştirilerek insanın özellikle en çok iş yapan kol-dirsek-el-omuz yapısına indirildi. Böylece oluşturulan matematiksel modeller basitleştirilerek görevlerin çok daha hızlı ve doğru bir şekilde yapılması sağlandı. Seri robotların günümüzde en büyük sorunları her uzuvda bulunan eyleyicilerin ağırlıklarından ve tasarımdan kaynaklı rijitlik ve genel mukavemet problemleriyle meydana çıkan hataların sürekli olarak değerlendirilmesi zorunluluğudur.

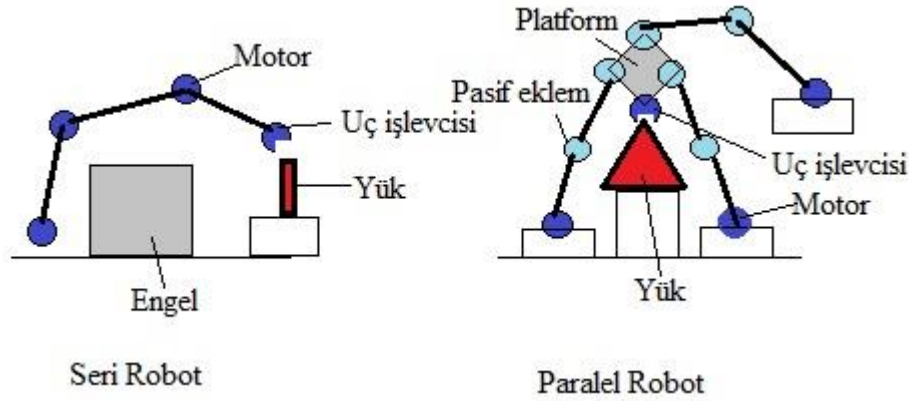


Şekil 1.6: Endüstride sıklıkla kullanılan seri robotlar.

1.2.3 Paralel ve Seri Manipulatörlerin Karşılaştırılması

Seri mekanizmaların en büyük avantajı çalışma alanında sahip oldukları üstünlüklerdir. Seri mekanizmalar yapıları gereği çalışma alanlarında geniş çevrelere önlerindeki engellerden kurtularak ulaşabilme avantajlarına sahiptir. Seri manipulatörlerin en büyük dezavantajları ise seri halde birbirine bağlı olan her eksenin kendisinden sonra gelen bütün eksen takımlarının sahip oldukları yükleri taşımak zorunda olmasıdır. Bu durum özellikle ağır yükler altında sistemin yüksek

titreşim altında çalışmasına ve pozisyonel olarak hatalar oluşturmaya sebep olur. Bunun yanında seri manipulatörlerde düz kinematik yapılar kolayca çözülebilmeye karşın ters kinematik yapılarda nonlinear denklem sistemleriyle karşılaşılır. Paralel mekanizmalarda çalışma alanında birçok kısıtla karşılaşılmasına rağmen yapı çok daha rijit ve mukavim bir yapıdır. Paralel manipulatörlerde her eksen takımı direk olarak iş yapması istenen objeyi taşıyacak uç işlevcisine bağlı olduğundan eksenler eğilme yüküyle seri manipulatörlerdeki kadar karşılaşmaz ve sistem minimum titreşimde ağır yükler altında bile hassas pozisyonlama kabiliyetini yitirmeden çalışabilir. Ters kinematik kinematik çözülebilirdir ve bu sebepten ötürü pozisyonlamada büyük üstünlükleri vardır. Düz kinematik çözümler ise seri mekanizmaların aksine nonlinear denklem sistemlerini çözmeyi gerektirir. Bunu için Newton-Raphson, yapay sinir ağı algoritmaları gibi sayısal çözümler kullanılır.



Şekil 1.7 : Seri ve paralel robotlar.

Çizelge 1.1 paralel ve seri robotları birçok yönden genel anlamda kıyaslamaktadır.

Çizelge 1.1: Paralel ve seri robotların kıyaslanması

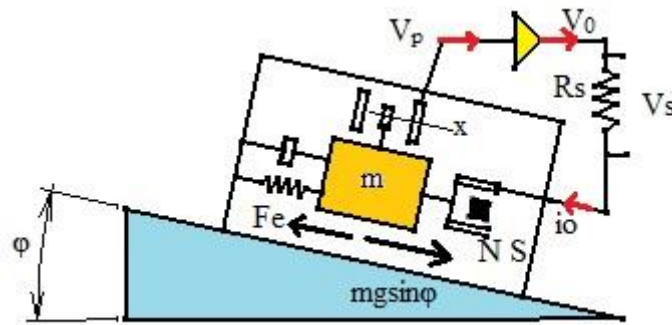
	Paralel	Seri
Yük kapasitesi	Yüksek	Düşük
Rijitlik	Yüksek	Düşük
Çalışma alanı	Düşük	Yüksek
Tekillik	Karmaşık	Az
Kinematik dinamik analiz	Daha zor	Daha kolay
Atalet	Yüksek	Düşük
Yeniden tasarlama	Zor	Kolay

1.2.4 Eğim sensörleri

Sensörler çevrenin ve çevrede bulunan varlıkların fiziksel ve kimyasal özelliklerini ve bu özelliklerdeki değişimleri algılayan sistemlere verilen addır. Bu özelliklerinden dolayı sensörler robotikte ve otomasyonda çok önemli bir yere sahiptir. Günümüzde varlıkların hızlarını, akışlarını, nemlerini, radyasyonlarını, pozisyonlarını, akımlarını, voltajlarını, basınçlarını, kuvvetlerini, sıcaklıklarını ve bunlar gibi daha birçok değişkeni ölçmek üzere tasarlanmış sensörler vardır. Aynı özellikleri ölçen birçok sensör farklı teknolojilerden yararlanarak üretilir. Çoğu zaman ortam şartları üretilen bu sensörler arasında hangisinin kullanılacağı konusunda karar vermede en büyük etkindir. Bu çalışmada üretilecek olan 6 dof paralel robot üzerine yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için sabitlenecek iş parçasını ölçüm ucuyla 90 derece açı yapacak pozisyona getirebilmek için ölçüm yüzeyinin robotun hareketli platformuyla yaptığı açı bir eğim sensörü yardımıyla belirlenecek ve belirlenen bu bilgi mikrodenetleyiciye gönderilecektir.

1.2.4.1 Kuvvet denge sensörleri

Kuvvet denge sensörleri yer çekimini referans alan ve genellikle inklinometre ve tiltmetre cihazlarında kullanılan sensörlerdir. Kuvvet denge sensörleri iki pozisyon sensörü arasında yer alan eğim destekli tork denge sistemi içeren kütleli bir sarkaçtan oluşur. Sensör bir açı meydana getirecek şekilde hareket ettiğinde sarkaç kütlelerinin pozisyonu, pozisyon sensörü ile tespit ederek bir akım meydana getirir.(Şekil 1.8)



Şekil 1.8: Kuvvet denge sistemli inklinometre sensörünün iç yapısı.

Şekil 1.8’de görülen sistemde m kütleli sarkaç bir yay yardımıyla sensörün duvarına bağlanır. Burada yay kuvvetinin tek amacı kütleyi askıda tutmak olduğundan mümkün olduğunca sisteme etkisi az olan bir yay seçimi yapılır. Sensör φ açısı yapacak şekilde

döndürüldüğünde kütleye $F = mg \sin \phi$ değeri kadar bir yerçekimi kuvveti bileşeni etkir. Bu kuvvet karşısında x yerdeğişiminin negatif geri beslemesiyle oluşan V_0 değeriyle orantılı olarak bir F_e manyetik kuvveti oluşur ve kütle dengeye gelene kadar hareketine devam eder.

Kuvvet denge sensörlerinin avantajları:

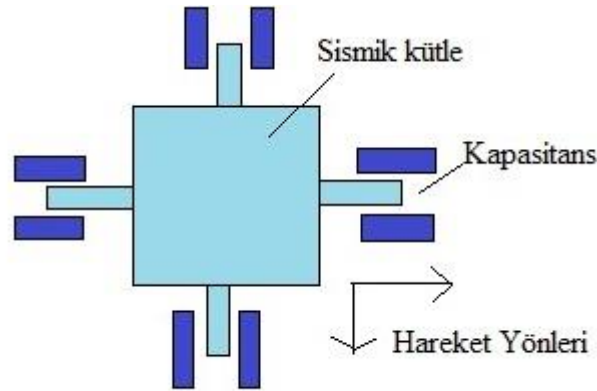
- Yüksek hassasiyet
- Yüksek performans
- Sıcaklık değışimine karşı etkisizlik
- Geniş ölçüm alanı

Kuvvet denge sensörlerinin dezavantajları:

- Yüksek maliyet

1.2.4.2 Katı Hal Mikro-Elektromekanik Sensörler

Katı hal mikroeletromekanik sensörler(SSMEMS) yatay x ve y eksenlerinde hareket edebilecek şekilde bir yaylı süspansiyon sistemi ile şekil 1.9’da görüldüğü gibi sabitlenen bir sismik kütleden oluşan minyatür sensörlerdir.

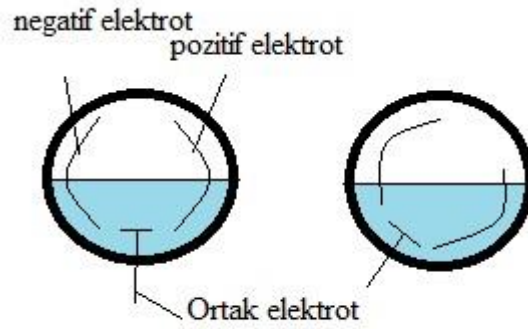


Şekil 1.9: Katı hal MEMS.

Şekil 1.9’da görülen sismik kütle yerçekimi ivmesi ile x ve y yatay doğrultusunda hareket ederek bir kapasite değeri meydana getirir bu kapasite değeri ölçülerek sismik kütlenin yer değıştirmesi hesap edilebilir. Bu tip sensörlerin en büyük avantajı boyutlarından dolayı her türlü sisteme kolayca entegre edilebilmeleridir. En büyük dezavantajı ise sistemin termal değışimlere aşırı derecede hassas olması ve kabul edilebilir bir sonuç almak için bir doğrultma işlemine gerek duymalarıdır.

1.2.4.3 Akışkan Dolgulu Sensörler

Akışkan dolgulu sensörler elektrolitik ve kapasitif olarak ikiye ayrılmaktadır. Elektrolitik eğim sensörleri bir çok uygulamada yatay x ve y eksenlerinde meydana gelen eğimleri hassas bir şekilde ölçmede oldukça iyi sonuçlar veren sensörlerdir. Bu tür sensörler uygulamada dar ve geniş açı ölçümlerinin gerektiği yerlerde hassas ölçüm kabiliyetleri ve kolay entegre edilebilir fiziksel yapıları nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedirler. Elektrolitik eğim sensörleri içi elektrik iletkenliği bulunan bir sıvı ile dolu cam veya seramik yapılardan meydana gelir. Akışkan normal pozisyonda cam veya seramik haznenin içerisinde şekil 1.10'da görüldüğü gibi pozitif, negatif ve ortak elektrodlarla temas halindedir. Normal konumunda elektrodla akışkan içerisinde dengeli elektiksel sinyaller oluşturur. Sensör herhangi bir açıda hareket ettiğinde dengeli elektiksel sinyaller bozulur ve yapılan açıyla orantılı olarak dengesiz sinyaller oluşur.



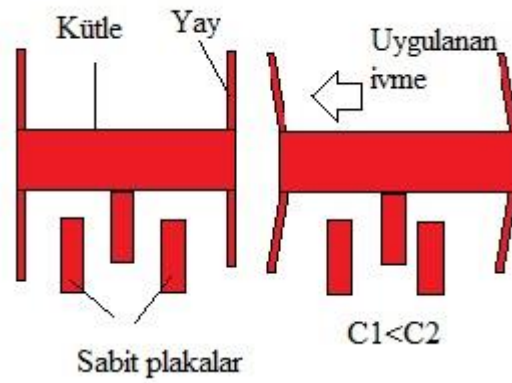
Şekil 1.10:Elektrolitik eğim sensörü.

Soldaki şekilde sensör normal pozisyonunda durmaktadır ve elektrotlar aynı hacimde sıvı içerisinde durmaktadırlar. Sağdaki resimde ise sensör 45 derece döndürülmüş ve pozitif elektrot hacmi negatif elektrota oranla daha fazla sıvıya maruz kalmıştır.

Kapasitif tilt sensörlerde benzer sistemin bir kapasite oluşturacak şekilde dizayn edilmesi ile meydana gelir. Kapasitif eğim sensörleri fiyatlarına oranla gösterdikleri performans açısından oldukça avantajlı iken çalışma sırasında tepki sürelerinin sınırlı olması en büyük dezavantajlarıdır.

1.2.4.4 İvme Sensörleri

İvme sensörleri ivme ve titreşim değerlerini ölçen, görüntüleyen ve analiz eden cihazlardır. Bu cihazlar da eğim sensörü olarak kullanılabilir ancak kararlılıkları oldukça düşüktür ve hassas uygulamalar için uzun süreli kullanımda hassaslığını yitirir. Günümüzde kararlılıkları yüksek ve hassas ölçümlerin gerektiği askeri ve havacılık sanayinde kullanılan çok yüksek maliyetli bazı özel ivme sensörleri de mevcuttur. İvme ölçerler genellikle piezoelektrik veya kapasitif olarak üretilir.(Şekil 1.11)



Şekil 1.11: Kapasitif ivme sensörünün yapısı

1.3 Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın yapılmasındaki amaçlardan en önemlisi otomotiv sanayinde yüzey pürüzlülük toleransının dar olduğu ürünlerin üretiminde prosesin güvenilirliğinin sağlanması için yapılan İPK çalışmalarında iş parçasının seri olarak yapılan her ölçümünde daha stabil ve hatasız bir ölçüm ucu-ölçüm yüzeyi dikliğine pozisyonlanmasını sağlamaktır. Bu sayede yapılan istatistiksel hesaplama sonucu prosesin güvenilirlik değeri artırılarak gelecek üretimlerde kontrol sıklığı azaltılabilecek ve maliyetler düşürülecektir.

Bir diğer amaç ise ölçüm parçasının hazırlık sürecinde pozisyonlanmasını bir otomasyon sistemi ile yaparak hazırlık süresini %70-80 oranında düşürmektir. Aynı zamanda ölçüm sırasında ölçüm ucu ölçüm yüzeyi dikliğinin tam olarak sağlanamamasından kaynaklanan kabul edilebilir hataların daha stabil hatalar olarak tespit edilmesi prosesin güvenilirliği grafiklerinde stabil olmayan sapmaları engelleyecektir.

İPK çalışmalarından tam olarak verim alınabilmesi ancak seri olarak yapılan tüm ölçümlerin doğru ve hep aynı koşullar altında yapılması ile mümkün olmaktadır. Bu çalışma kapsamında pozisyonlama birinci derecede önem arz ettiğinden paralel robotlar araştırılmış ve sahip olduğu rijit yapısı ve serbestlik derecesiyle pozisyonlama işlemi yapabilecek bir ölçüm tablası olarak stewart platformu tasarlanmış ve üretilmiştir. Stewart platformu 1982’de Hunt’ın önerdiği rotasyonel yapıda tasarlanmış ve ölçümü yapılacak parçaların düşük ağırlıkları da gözönüne alınarak eyleyici olarak step motorlardan yararlanılmıştır. Step motorların en verimli şekilde sürülebilmesi için kontrolcü araştırması ve seçimi yapılmıştır. Stewart platformunun pozisyon kontrolü ters kinematik denklemler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan denklemlerin doğrulanması için simulink kullanılarak bir modelleme yapılmış ve bu model ters kinematik denklemler yardımıyla simule edilerek doğrulanmıştır. Tasarlanan stewart platformunun güvenli olarak kullanılabilmesi için sonlu elemanlar metodu yardımıyla yapısal olarak sistem analiz edilmiştir. Ölçüm çevresini gözlemlemek ve step motorlara girdi değeri verebilmek için sensör olarak inklinometrelerden faydalanılması düşünülmüştür. Ölçüm yüzeyinin x ve y yatay eksenlerinde yaptığı açıların arduino ile kontrol edilen bir inklinometre ile tespit edilmesi düşünülmüştür. Stewart platformunun mikrodenetleyicisi ile inklinometrenin mikrodenetleyicisi arasında veri alış verisinin yapılabilmesi için bir seri iletişim ağı kurulmuştur. Son olarak oluşturulan sistemin üzerinde seri olarak deney parçaları ölçülmüş ve bu ölçümler eski sistem ile yapılmış olan ölçümlerle kıyaslanmıştır. Yeni sistemde yapılan ölçümler sonucu yeni istatistiksel hesaplamalar yapılmış ve prosesin yeterliliği katsayısındaki artış gözlemlenmiştir.

2. YÜZEY ÖLÇÜM SİSTEMLERİ VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Yüzey pürüzlülüğü, dalgalanması ve genel form hataları bir yüzeyin kalitesini belirten parametrelerdir. İşlenmiş yüzeyler kullanıldıkları ortama bağlı olarak bağlı olacakları montajlarda ya da kullanılacakları alanlardaki fonksiyonellikleri bakımından önem arz ettiğinden yüzey pürüzlülük değerlerini hassas bir şekilde ölçme ihtiyacı doğmuştur.

Yüzey pürüzlülüğünü ölçmeye yarayan cihazlara profilometre adı verilir. Endüstride yüzey pürüzlülüğü ölçümü genellikle mikrometreler mertebesinde yapılırken günümüzde yüzey pürüzlülüğünü atomik düzeyde ölçmekte mümkündür.

Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazları yüzeyle temas halinde ölçüm yapan mekanik profilometreler yüzeyle herhangi bir temas kurmadan ölçüm yapan optik mikrometreler ve hem temaslı hem de temassız olarak ölçme yöntemine sahip atomik kuvvet mikroskopları olarak 3'e ayrılır. Üretim sektöründe üretilen ürünün gereklilikleri ne derece karşıladığının kontrolünde genellikle mekanik profilometreler ve optik profilometreler kullanılır. Bu iki ölçüm tekniğinde de hatasız bir ölçüm yapmak için ölçüm parçasının doğru pozisyonlanması son derecede önemlidir. Ölçüm sırasında karşılaşılan hatalar ve keşfedilen hataların da stabil olmaması büyük oranda pozisyonlama hatalarına bağlıdır. AFM'ler ise atomik düzeyde ölçüme imkan sağladıklarından genellikle araştırma çalışmalarında ve sağlık sektöründe sıklıkla kullanılır.

2.1 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sistemleri

2.1.1 Mekanik Profilometre

İlk temas uçlu(iğneli) ölçme sistemi 1929 yılında G.Schmaltz tarafından yüzey dokusunun değerlendirilmesi için geliştirildi.Schmaltz'dan sonra sırasıyla 1936 yılında Dr. E. Abbot ve 1939 yılında Taylor Hobson yüzey ölçme teknolojisini illetttiler.

Mekanik profilometreler elmas ölçüm ucuna sahip olan ve ölçüm yüzeyi boyunca belirli bir kuvvette ve mesafede dikey pozisyonda yanal yönlerde hareket eden cihazlardır.(Şekil 2.1) Yapılan bu hareket sonucu yüzey yapısındaki geometriye bağlı olarak ölçüm ucunun pozisyonundaki değişiklikler bir analog sinyal yaratırlar daha sonra bu analog sinyaller dijital sinyallere dönüştürülerek analiz edilir ve yüzeyin geometrisi elde edilir.



Şekil 2.1: Mekanik profilometre.

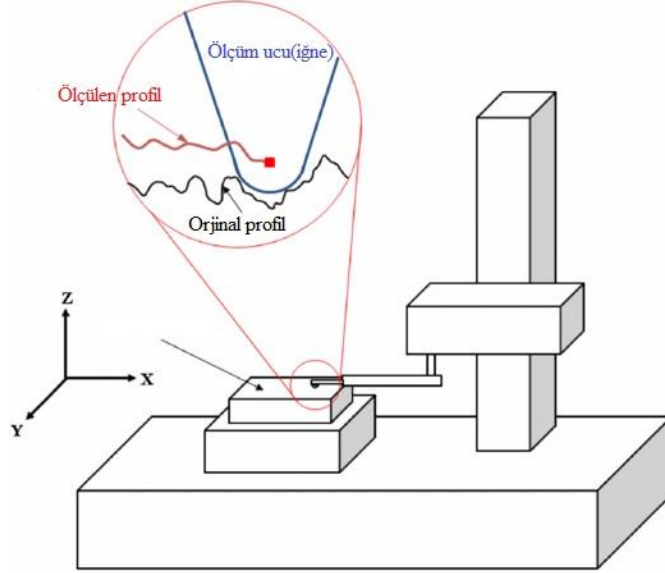
Cihazın dedektörüne bağlı iğne ortalama olarak z ekseninde $350\mu\text{m}(+150\mu\text{m}/-200\mu\text{m})$ ve $0.01\mu\text{m}$ çözünürlükte), x ekseninde $12,5\text{mm}$ hareket edebilmektedir. Bazı mekanik profilometrelerde elmas ölçüm ucundan başka bu ucu çevreleyen ve pabuç adı verilen bir filtreleme ucu da bulunur. Görevi yüzeydeki geniş dalgalanma ve form sapmalarının içine girerek bu sapmaları pürüzlülük değerinin dışına çıkarmaktır. Bu pabuç mekanik bir filtre görevi görür. Ölçülen profili farklı algılanmasına sebep olduğundan zorunluluk dışında kullanılmamalıdır.(Şekil 2.2)

Mekanik profilometrelerde en önemli etken ölçüm ucu malzemesinin geometrisi ve fiziksel özellikleridir. Genellikle malzeme ölçümler boyunca ölçüm ucuna gelecek zararı engellemek için sert ve aşınmaya dayanıklı olarak seçilir ancak bu tip malzemeler ölçüm yüzeyi geometrisine zarar verebilir. Tüm bu nedenler ölçümün mümkün olan en iyi çevresel koşullarda yapılmasını zorunlu kılar.

Mekanik profilometrelerden ölçüm ucunun ve ölçüm yüzeyinin yapısına göre ölçüm sırasında uygulanması gereken kuvvet denklem 2.1’de gösterilen Hertzian denkleminde hesaplanır.

$$p_0 = \left(\frac{6WE'^2}{\pi^3 R^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.1)$$

Burada W ölçüm ucu ağırlığı, R ölçüm ucunun yarıçapı E' ise temas eden yüzeyler arası efektif young modülüdür ve denklem 2.2'de gösterildiği gibi hesaplanır.



Şekil 2.2: Mekanik profilometre ölçümü[8].

$$E' = \left(\frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (2.2)$$

Hesaplanan p_0 basınç değeri ile ölçüm esnasında yüzeye zarar vermeden en uygun plastik deformasyonun yapılması sağlanır.

2.1.1.1 Mekanik Profilometrenin Avantajları ve Dezavantajları

Mekanik profilometrelerin en büyük avantajları dünya üzerindeki geçerlilik değerleridir. Üretim sektörünün büyük bir kesiminde mekanik profilometreler düşünülerek standartlar ve şartnamalar hazırlanır. Mekanik profilometreler her türlü yüzey üzerinde kullanılabilir. Yüzeyin kirliliği çok tercih edilen bir durum olmasa da ölçüm yapılmasına engel teşkil etmez. Yüzeyin fiziksel ve kimyasal özellikleri ölçümün yapılmasına engel olmaz.

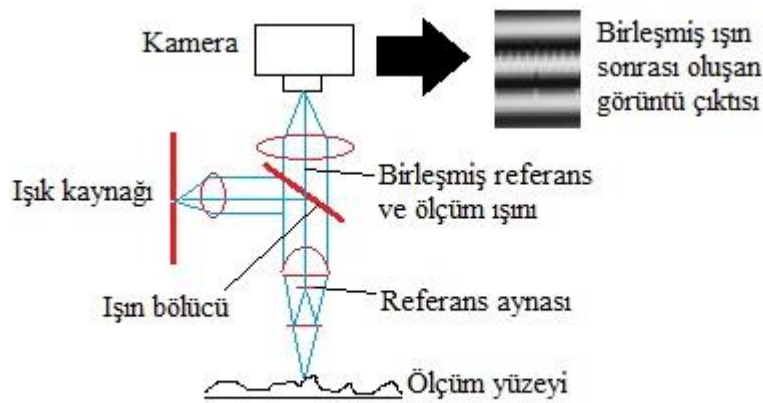
Mekanik profilometrelerin en büyük dezavantajı ise sürtünmeden kaynaklanan aşınmalar ve meydana gelen hatalardır. Ölçüm hızları limitlidir. Ölçüm sonuçlarının hassaslığı ölçüm ucunun geometrisiyle sınırlanır.

2.1.2 Optik Profilometre

Optik profilometreler ışığın dalga boyu özelliğinden faydalananarak yüzey geometrisindeki değişimi ölçmek amacıyla üretilen sistemlerdir. Optik profilometreler ışığın dalga boyu özelliğini kullanarak ölçüm yüzeyinin referans dalga boyu ile farkını esas alarak oldukça hassas ölçümler yapabilir.

Optik profilometrenin ışık kaynağından çıkan ışık bir ışın ayırıcı yardımıyla ayrılır. Ayrılan ışın dalgalarından biri odak yüzeyinden geçerek ölçüm yüzeyine çarpar ve yansıma gerçekleştirir. Diğer ışın dalgası ise optik profilometrenin içine yerleştirilen referans aynasının yüzeyine çarparak yansır. Bu iki yansıyan ışın tekrar birleşerek ölçüm yüzeyinin mesafesindeki değişimlere göre değişik dalga boylu ışınlar oluşturur. Burada referans yüzey mükemmel yüzeyi temsil ettiğinden dalga boyundaki değişim ölçüm yüzeyindeki değişimlerden kaynaklanır.

Referans ve ölçüm yüzeylerinden yansıyan ışınlar optik profilometrenin üzerine konulan bir dijital kameraya odaklanır. Ölçüm yüzeyine gönderilen ışın tümseklerden yansıdıkkça nominal yüzeyden yansıyan ışına oranla daha aydınlık bir görüntü, çukarlardan yansıdıkkça ise daha karanlık bir görüntü meydana gelir.



Şekil 2.3: Optik profilometrenin iç yapısı.

2.1.2.1 Optik Profilometrenin Avantajları ve Dezavantajları

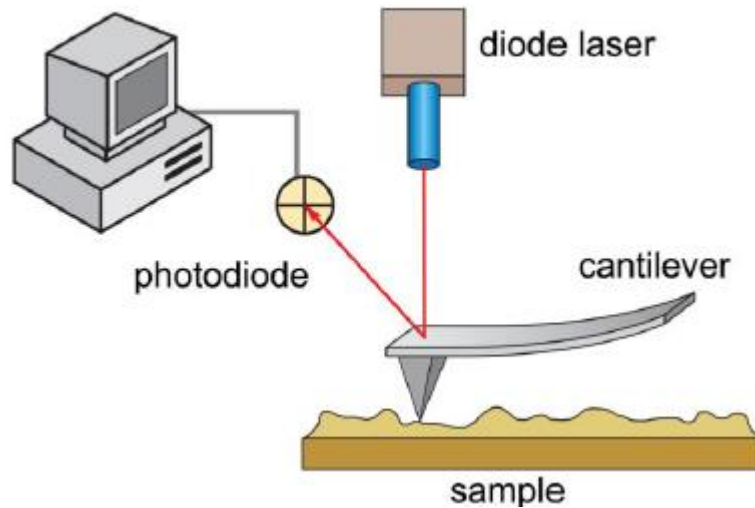
Optik profilometrelerin en önemli avantajı ve dezavantajı temas gerçekleştirmeden ölçüm yapabilme kabiliyetinden kaynaklanır. Ölçüm esnasında herhangi bir temas gerçekleştirmediğinden hızı yalnızca ışının yansıma hızına bağlıdır ve mekanik profilometreye göre çok daha seri ölçümler yapılabilir. Bu özelliğinin dezavantajı ise çok eğimli ve yüzeyi oldukça hatalı parçaların ölçümlerinde ışın yansımalarını istenilen şekilde odaklamak zorlaşır ve hatta bazen imkansız hale gelebilir.

Optik profilometreler temassız ölçüm yaptıklarından daha az sıklıkta bakım gerektirirler ve kişi dikkatinden ötürü(yanlış konumlama, çalıştırma) zamanla aşınma meydana gelme riski taşımazlar.

2.1.3 Atomik Kuvvet Mikroskobu

Atomik kuvvet mikroskobunda ölçüm ucu manivela biçimli bir yaya bağlıdır. Bu yay genellikle piezo malzemeden yapılır ve onun özelliklerinden yararlanır.

Ölçüm esnasında ölçüm ucu ve ölçüm numunesi arasında oluşan kuvvete karşı piezo malzemenin pozisyon değişimleri sayısallaştırılarak kaydedilir.(Şekil 2.4)



Şekil 2.4: Kontak mod atomik kuvvet mikroskobu[8].

Atomik kuvvet mikroskobunun kontak mod ve kontak-olmayan mod olmak üzere 2 temel yapısı vardır. Kontak-olmayan modda 10nm ölçüsünden 100nm ölçüsünde hassaslığa kadar ölçümler elde edilir. Kontak-olmayan modda yüzey topografyasını

elde etmek için ölçüm ucu ile ölçüm yüzeyi arasında oluşan van der waals, elektrostatik, magnetik ve kılcal kuvvetler modellenerek ölçümler yapılır.[8]

Gerçek anlamda atomik düzeyde ölçümler kontak mod AFM ile mümkündür. Kontak mod AFM’de atomik itme kuvvetlerinin gerçekleştirdiği yer değişimlerinden yararlanarak 2 boyutlu atomik düzeyde yüzey topografyası elde edilebilir. Ayrıca kontak mod ölçüm sırasında yanal yüzeylerin manivelaya bağlı ölçüm ucuna uyguladığı tork ölçülerek aynı zamanda 3 boyutlu ölçümler yapmakta mümkündür.[8]

Kontak mod AFM aynı zamanda bir atomik ölçekte bir manipulatördür. Yüzey topografyasının atomik düzeyde görüntüsünü oluşturma yanında atomik boyuttaki partiküllerin yer değiştirilmeside AFM’in uygulayacağı yanal kuvvetlerle mümkün olmaktadır. Bu sebeple AFM endüstriden ziyade sağlık sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır.

AFM kontak modda ölçüm ucuna etki eden en önemli kuvvet intermoleküler kuvvettir. Bu kuvvet ölçüm ucu ile ölçüm yüzeyinin malzemelerine ve aralarındaki mesafeye bağlıdır. Ölçüm esnasında ölçüm ucuna etki eden bir diğer kuvvet ise van der waals kuvvetidir. Ölçüm çevresine göre eğer gerekli ise viskoelastisiteden kaynaklanan kuvvetler de hesaplama dahil edilmelidir. Tüm bu etkiler göz önüne alındığında ölçüm ucuna etki eden kuvvetler denklem 2.3’de görüldüğü gibi olur.

$$F_n = \frac{-HR}{6a_0^2} + \frac{4}{3}E'\sqrt{R}(a_0 - z_y)^{\frac{3}{2}} - \eta_n(a_0 - z_y)^{\frac{1}{2}}z_y(t) \quad (2.3)$$

Burada z_y geçici ölçüm ucu ölçüm yüzeyi ayrımı, H hamaker sabiti, R ölçüm ucu radüsü a_0 ise intermoleküler mesafeyi temsil etmektedir. Ölçüm esnasında bulunan bu kuvvet ölçüm ucundaki yer değiştirmeye ve yayın salınımından oluşan kuvvete eşitlenir.

AFM atomik düzeyde ölçüm sonuçları verdiğinden üretim endüstrisinde kontrol amaçlı kullanılmaz. Daha çok atomik düzeyde yapılan araştırmalar için ve özellikle sağlık sektöründe tedavi ve araştırma amaçlı sıklıkla kullanılır.

2.1.4 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sistemlerinde Karşılaşılan Hatalar

2008 yılında Modern Machine Shop dergisinde yayınlanan bir araştırma yüzey pürüzlülük ölçümlerinde karşılaşılan hatalar üzerine bir araştırma yayınlamıştır. Bu araştırma yüzey pürüzlülük ölçümü sırasında çevresel ve yapısal nedenlerin araştırılarak etkenlerin ve bu etkenlerin ağırlıklarının saptanması ile ölçüm prosesinin iyileştirilmesi amacını taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı da bu hataların belki de en önemlisi olan ölçüm çubuğu ile parça yüzeyinin paralel olmaması maddesine odaklanmaktır.

Kontur Ölçme Cihazlarındaki Hatalı Ölçümlerin Sebepleri

- Ölçüm yüzeyinin kirliliği
- Parça sabitlenmesinde yapılan hatalar
- Ölçüm çubuğu ile parça yüzeyinin paralel olmaması
- Çevrede meydana gelen titreşimler

2.2 Yüzey Pürüzlülüğü

Mühendislik malzemeleri döküm, plastik şekil vermek, dövme, talaşlı imalat, kaynak gibi çok fazla kuvvet, ısı, basınç gereken bir çok yöntemle üretilebilir. Bu üretim sonucunda karşılaşılan malzeme yüzeyleri ürünlerin kullanılacakları fonksiyonel ihtiyaçlara cevap verecek nitelikte olmayabilir. Ya da malzemenin her bir yüzeyinin farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip olması ve bu özelliğin sıklıkla kontrol edilmesi gerekebilir. Bu durumda bu yüzeylerin ürün üretildikten sonra ek bir yüzey bitirme prosesine sokularak işlenmesi gerekmekte ve yüzeylerin doğru bir şekilde ölçülerek istenilen değere ulaşp ulaşmadığı kontrol edilmektedir.

Yüzeyin geometrik karakteristiği 3 ayrı parametre ile belirlenir.

- Makro deviasyonlar
- Yüzey dalgalanmaları
- Mikro form hataları

Makro deviasyonlar genellikle işleyici bir takımın, yüzeyin bir ucundan diğer ucuna gitmesiyle oluşan pek çok çizikli, düzensiz kısa dalga boyu uzunluklarıdır.

Yüzeydeki çizik izlerini normal yönde ölçme ile çapraz yönde(açılı kesik çizgi) ölçme arasında dalga boyu uzunluğu açısından fark vardır.

Yüzey pürüzlülüğü düzensiz dalga boyu uzunlukları olarak dağılmışsa, yüzey aşırı yüklenmiş demektir. Bu tür bir oluşum dalgalanma olarak adlandırılır. Dalgalanma,yüzeyin taşlanması esnasında, taşlama taşının eksik kısımlarından, işlemeyi yapan takımın bağlantı karterinin titreşiminden ve ısıl işlemlerden meydana gelebilir.

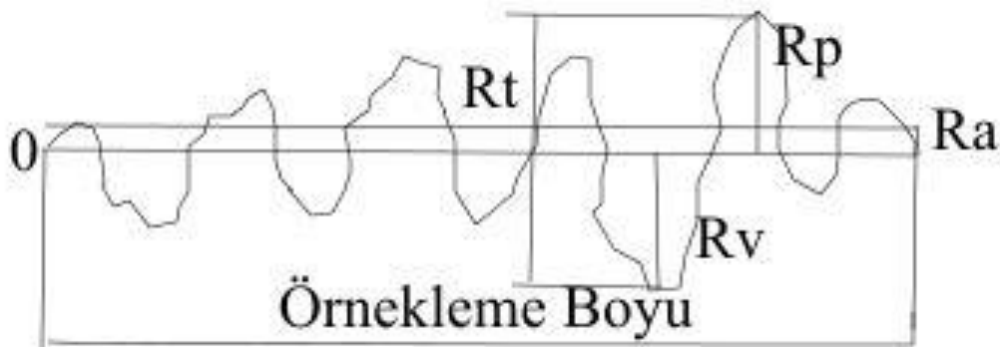
Yüzeyin yapısında, kızak aşınmalarından, tornalama işleminde işleyici takımın merkezinin aşağıda veya yukarıda olmasından, iş parçası işlenirken iş parçasının eğilip bükülmesinden form hataları meydana gelebilir.

Yüzey hataları literatürde belirlenmiş bazı yüzey parametreleri ile belirlenerek yüzey kaliteleri sınıflanır. Şekil 2.5 yüzey hatalarının sınıflandırılmasında kullanılan temel yüzey parametrelerini göstermektedir. Bu parametreler arasında en sık kullanılanı yüzeyin sahip olduğu hata değerlerinin aritmetik ortalamasını veren R_a değeridir.

R_a değeri bir örnekleme boyunda z eksenindeki mutlak koordinat değerlerinin integralinin alınması ile bulunur.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (2.4)$$

Burada L değeri örnekle boyunu $z(x)$ değeri ise örnek boyunca x 'inci yüzey hatasının değerini göstermektedir.



Şekil 2.5: Yüzey pürüzlülük parametreleri.

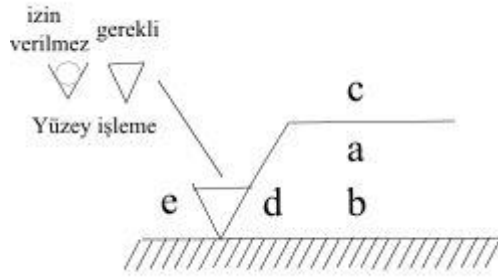
Şekil 2.5’de gösterilen R_p değeri bir örneklem boyunca yüzeyin sahip olduğu en büyük tümsek boyunu, R_v değeri ise yüzeyin sahip olduğu en büyük çukur boyunu gösterir.

$$R_p = \max(z(x)) , R_v = \min(z(x)) , R_t = R_p + R_v \quad (2.5)$$

Literatürde sıklıkla kullanılan bir diğer yüzey pürüzlülük parametresi ise R_z değeridir. R_z değeri yüzeyin sahip olduğu en büyük 5 tümsek değeri ile en büyük 5 çukur değerinin aritmetik ortalamaları ile hesaplanır.

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (Z_{p_i} + Z_{v_i}) \quad (2.6)$$

Burada Z_p değeri tümsek boylarını, Z_v değeri ise çukur boylarını temsil etmektedir.



Şekil 2.6: Yüzey dokusu gereklilikleri.

Şekil 2.6’da a ve b harfleri yüzey kalite limitlerini gösteren değerlerdir. Yüzey kalitesi yüzey son işlemesi yapıldıktan sonra burada belirtilen toleranslara uygunluk göstermelidir. Şekilde görülen c değeri bu yüzey kalitesine ulaşmada uygulanması şart olan bir yöntem var ise o yöntem biçimini beliren göstergedir. d harfi ile belirtilen gösterge yüzeyin sahip olması gereken işleme yönünü belirtir. e harfi ile belirtilen gösterge ise yüzeyin bitirme işleme mesafesini belirtir.

Şekil 2.6’da üçgen ve üçgen içinde daire ile gösterilen semboller bu yüzey kalitesine ulaşırken yüzeyden talaş kaldırma işlemi yapılıp yapılamayacağını belirten göstergedir. Eğer gösterge yalnızca üçgen işaretiyle verilmişse ilgili yüzeyin yüzey kalitesi talaş kaldırma işlemiyle elde edilebilirken eğer gösterge üçgen içerisinde daire ile belirtilmişse ilgili yüzey kalitesi talaş kaldırma işlemleri uygulanmadan elde edilmelidir.

3. İSTATİSTİKSEL PROSES KONTROL

İstatistik yöntemlerinin kalite problemlerinde kullanımı ilk olarak 1920’lerde A.B.D’de gerçekleşmiştir. Shewhart, Dodge, Roming, Tippet, Pearson gibi araştırmacıların istatistik yöntemleri o yıllardan başlayarak sanayi problemlerine uygulamaları ile geliştirdikleri yöntemler günümüze kadar gelmiştir.

İstatistik, bir süreç boyunca hedef kitleye ait numune bilgisinin analizinin yapılarak karar verme potansiyeline uygun teknik sonuçların toplanması olarak ifade edilebilir. Proses birbirini izleyen kaynakların ilgili aktiviteler sonucu girdiden çıktıya dönüşmesi sırasında geçen zamanı ifade eder. Bu dönüşümde kaynaklar personel, finansman, tesis, mühendislik metodları kapsayabilir. Kontrol ise parametre durum ve şartlarındaki değişimlerin denetlenmesi ve önlenmesidir.

Tanımlayıcı ifadesinde bu 3 kelimeyi barındıran İPK, üretim süreçlerinde “hatanın önüne geçme” felsefesini uygulayarak verimi mükemmelleştirmek adına yapılan istatistiksel hesaplamalar ve analizleri kapsar.

İstatistiksel proses kontrol özellikle son yıllarda üretim sektöründe “sürekli iyileştirme” yönetim biçimini vizyon edinen firmaların anahtar uygulaması haline gelmiştir. İPK’nin en çok kullanılan araçları ürünün tüm çıktılarının analizlerini içeren kontrol kartları ve üretim esnasındaki gözlemlerden oluşan neden-sonuç ilişkisi diyagramlarıdır. Sorunların daha gerçekleşmeden tespit edilmesi ve engellenmesini esas alan bir kalite yöntemi olarak İPK diğer bütün kalite yöntemlerine göre avantaja sahiptir. Genel kalite yöntemleri üretilen ürünün müşteri isteklerine veya ürün gerekliliklerine olan uyumunu inceleyerek kabul-red sistemini bir amaç olarak belirlerken İPK’da kabul-red sistemi İPK’nin bir sonucudur. Bu sistem İPK’yi üretim sonrası değil üretim öncesi bir kalite yöntemi olarak özel kılmaktadır. İPK kalitenin muayene yolu ile yüzde yüz olarak sağlanamadığı gerekçesiyle üretilen ürün yerine ürünü üreten sürecin incelenmesi fikriyle doğduğundan tüm proses değişkenlerini kontrol altında tutmayı amaçlar.

3.1 İstatistiksel Proses Kontrolde Kullanılan Yöntemler

Seri imalat üretilen ürünün sürekli olarak aynı kalitede teknik şartnamelerde belirtilen şartlara uygun olmasını amaçlar. Ancak doğada hiçbir ürün birbirinin aynısı değildir. Üretilen her ürünün kalite özelliklerinde çeşitli etkenlere bağlı değişiklikler meydana gelir. Bu değişiklikler çoğunlukla doğal sebeplerdir ve kalitesizlik olarak gösterilmezler. Bu hataları gerçek kalitesizlik hatalarından ayırmak bir kontrol süreci ile mümkündür. Ürünün farklılaşmasında oluşan doğal sebeplerin bir kalitesizlik olarak görülmesini önlemek amacıyla bir tolerans kavramı ortaya çıkar.

Diğer taraftan bazen proseste beklenmeyen ve gereklilikleri önemli ölçüde etkileyen değişiklikler görülür. Bu değişiklikler doğal olmayan değişikliklerdir. Doğal olmayan değişiklikler ürünün belirtilen tolerans limitinin dışına çıkmasına yol açabildiğinden kalitesizlik olarak değerlendirilirler.

Ishikawa'nın istatistiksel proses kontrolde 7 temel aracı;

- Gruplandırma
- Çetele
- Histogram
- Pareto Analizi
- Neden-Sonuç Diyagramı
- Serpilme Diyagramı
- Ishikawa Kontrol Hesaplamaları

Bu temel araçlardan gruplandırma ve çetele proses değişkenlerini kayıt altına almaya histogram,pareto, neden-sonuç ve serpilme diyagramları proses değişkenlerini görselleştirmeye yararken Ishikawa kontrol hesaplamaları sayısal olarak prosesin yeterliliğinin hesaplanması için yapılan matematiksel hesaplamaları ve bu hesaplamalar sonucu oluşturulan grafikleri kapsar. Bazı durumlarda sürekli olarak prosesin kontrol edilebilmesi için bu grafikler üretim ile paralel bir şekilde oluşturulur ve grafik değişkenleri belirlenen limitlerin dışına çıktıklarında sistem otomatik olarak durdurulur. Bu tarzda uygulanan bir hata önleme sistemine POKE-YOKE denir.

3.1.1 Gruplandırma

Gruplandırma, verinin değişkenlik kaynaklarına göre gruplara ayrılarak kaydedilmesi ve işlenmesi olarak tarif edilebildiğı gibi, kategorilere ve özelliklere göre bilgilerin sınıflandırılması süreci olarak da tarif edilebilir.

Gruplandırmanın temel amacı istatistiksel hesaplamalarda kullanılacak olan verileri toplamak ve belirtmektir.

Çizelge 3.1: Kontrol ölçümü için yapılan gruplandırma tablosu.

Hata Türü	Gündüz Yapılan Ölçümlerde	Gece Yapılan Ölçümlerde	Toplam	%
A	45	15	60	24,5
B	30	45	75	30,6
C	80	30	110	44,9
Toplam	155	90	245	100

Çizelge 3.1’de yapılan gruplandırma ile üründe tespit edilen hataların türleri ve hangi vardiyada hangi tür hataların hangi oranda ortaya çıktığı tespit edilerek gruplandırılmıştır. Daha sonra yapılacak analiz hesaplamalarında bu veriler uygun şekilde seçilerek gruplandırılabilir.

3.1.2 Çetele

İPK uygulamasının en önemli aşamalarından biri proses boyunca doğru verilerin toplanmasıdır. Çetele oluşturulurken toplanan veri türünün açıklayıcı bir şekilde ortaya koyulmasına dikkat edilmelidir, parti ya da operasyon numarası, tarih, analizci ve yetersiz prosesi teşhis etmek için faydalı olacak her türlü bilgi yazılmalıdır. Eğer çetele, daha sonraki hesapları yapma temeli üzerine kurgulanmış ya da bilgisayara veri girmek için taslak olarak kullanılacaksa, toplanan veriler sonucunda çetelenin bu amaca uygun olarak hazırlanmış olduğundan emin olunmalıdır. Bazı durumlarda, çetelenin düzen ve tasarımı için bir deneme çalışması yapmak yardımcı olacaktır.[10]

Çizelge 3.2 yakından incelendiğinden yüzey problemleri hatasının sabah öğle ve akşam olmak üzere günün her saati meydana geldiğı, eksik parka hatası en çok öğlen olmak üzere akşam da görülebildiğı ancak sabahları hiç görülmediğı, deformasyon hatasının ise yalnızca öğlenleri meydana geldiğı görülmektedir.

3.1.3 Histogram

Histogramlar bir grup verideki değişimlerin dağılım aralıklarını ve yoğunluklarını göstermek için kullanılır. Süreç iyileştirmede, veri gruplarının çubuk grafik şeklinde gösterildiği şekil histogramın daha klasik bir şeklidir ve çan eğrisi olarak da bilinir.

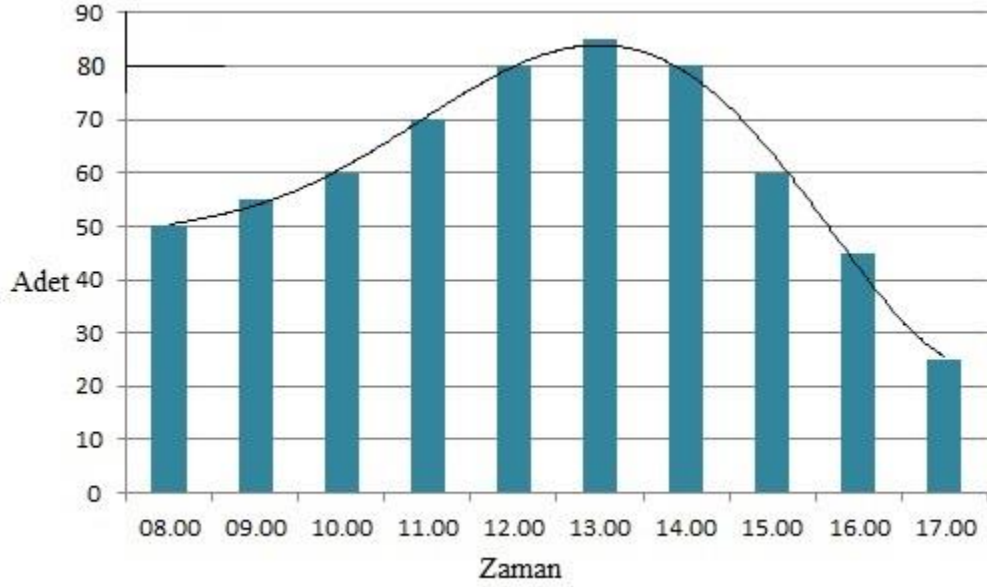
Çizelge 3.2: Üretim prosesinde kullanılan bir çetele örneği

Çetele	
Ürün:	Tarih:
Proses No:	Lokasyon:
Tespit Edilen Bulgular:	Bölüm:
Toplam Adet:	Operatör:
Notlar:	Üretim no:
	Sipariş no:

Hata Türü	Kontrol	Ara Toplam
Yüzey problemleri	//// //// ////	12
Eksik	//// //	6
Deformasyon	//	2
Diğer	//// //// //// ////	16
Toplam Iskarta		36

Histogramların gösteriminde genellikle enleri eşit ve boyları o veri grubunun frekansı ile orantılı olarak değişen dikdörtgenler kullanılır. Bu dikdörtgenlerin oluşturduğu grafik görsel olarak ilgili değişkenlerin durumu hakkında bilgi verir ve böylece prosesteki sapmaların şekli ve yönü de tespit edilebilir.

Histogram özellikle kalite süreçlerinde ölçümlerdeki şablonların, varyasyonların ve merkezlerin tespitinde sıklıkla kullanılan bir araçtır. Geleceğe yönelik olarak varyasyonları azaltma ve mevcut problemlerin sebeplerinin belirlenmesinde güçlü bir araçtır. Kalite süreçlerinde kalite karakteristiğinin üretim tutarlılığı prosesler boyunca oluşturulan histogramlar sayesinde izlenebilir.



Şekil 3.1: Gün içerisindeki üretim performansını değerlendiren histogram.

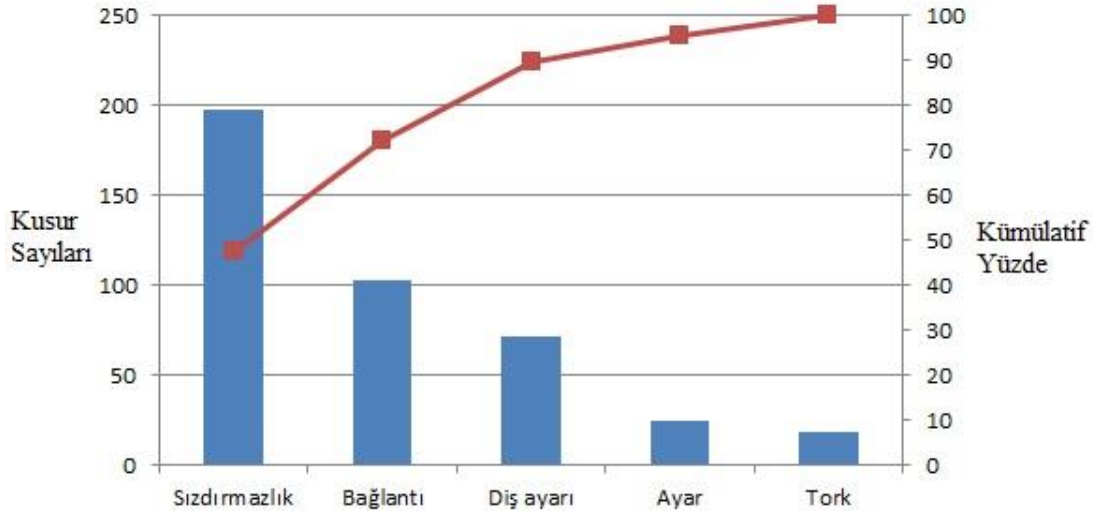
3.1.4 Pareto Analizi

Pareto kuralı Joseph Juran tarafından 1950 yılında gözlemlenmiştir. Juran, etkilerin çoğunun sadece birkaç durumdan ileri geldiğini bulmuştur. Örneğin, bir kağıt fabrikasındaki maliyetler analiz edildiğinde, toplam kalite maliyetlerinin %61'inin bir Pareto analizi, dikkatleri en önemli problem alanlarına çekmek için kullanılan bir tekniktir. 19. Yüzyıldan sonra İtalyan iktisatçı Vilfredo Pareto'nun adıyla anılan Pareto kavramı, toplam olaylar (şikayetler, kusurlar, problemler) içerisinde diğerlerine nazaran daha yüksek orana sahip faktörleri gösterir. Bu görüş, durumları önem sırasına göre derecelendirmeyi sağlar ve sonrasında, daha az önemli olan sorunlar ("trivial many") bırakılıp, en önemlileri çözmeye odaklanılır. Çoğu kez, 80-20 kuralı olarak anılan Pareto Analizine göre problemlerin (fiyat, maliyet vb.) %80'inin sebebi, öğelerin % 20'sinden kaynaklanır. Örneğin, makine arızalarının %80'i, makinelerin %20'sinden kaynaklanır ve ürün kusurlarının %80'i, kusur sebeplerinin %20'sinden kaynaklanır.

Çizelge 3.3, belirli bir prosesin kusurlarının verilerini içermektedir. Tüm kusurların sebebi bir grup yetersiz operasyondur fakat kusurları beş kategoriye ayırabiliriz: Sızdırmazlık, ayar, bağlantı, yanlış tork ve diş ayarı.

Çizelge 3.3: Pareto analizi için yapılan kusur kayıtları(Kaoru Ishikawa, “Guided to Quality Control”).

İncelenen ürün sayısı N=2165			
Tarih:			
Kusurlu ürün	Kusurlu sayısı	Kusur yüzdesi	Kusurlu yüzde dağılımı
Sızdırmazlık	198	9,1%	47,6
Ayar	25	1,2%	6
Bağlantı	103	4,8%	24,7
Tork	18	0,8%	4,3
Diş ayarı	72	3,3%	17,3
Toplam	416	19,2%	99,9



Şekil 3. 2: Çizelge 3.3’deki verilerin pareto analizi.

3.1.5 Neden-Sonuç Analizi

Neden sonuç diyagramı(Balık Kılıcı) Kaoru Ishikawa tarafından geliştirilen bir yöntemdir ve onun onuruna Ishikawa diyagramı olarak da anılır. Neden-Sonuç diyagramının amacı bir problemin ana sebebi ile ilgili çeşitli teoriler arasındaki karşılıklı ilişkileri düzenlemek ve göstermektedir. Neden-Sonuç diyagramı sistematik bir şekilde, yapılandırılmış belirli bir problemin, mümkün olan sebeplerine odaklanarak, bir problem çözme ekibine, potansiyel sebepler üzerinde düşünüp açığa kavuşturmak için olanak sağlar ve takımın gerçek kök sebep veya sebepleri keşfetmek için daha verimli çalışmasına imkan sunar.[10]

Bu çalışmanın yapılmasına karar verilmeden önce şekil 3.4’de görülen Ishikawa analizi yapıldı. Bu analizde yüzey pürüzlülük ölçümlerinde sürekli olarak yapılan hatalı ölçümlerin nedenleri ve sonuçları araştırıldı. Daha sonra bu nedenlerden en çok hangisinin ölçümün hatalı yapılmasına veya yapılan ölçümlerdeki hataların çok farklı dalgalanmasına sebep olabileceği üzerine düşünülerek mevcut sistemdeki pozisyonlamanın hassas bir ölçüm için yetersiz olduğuna karar verildi.

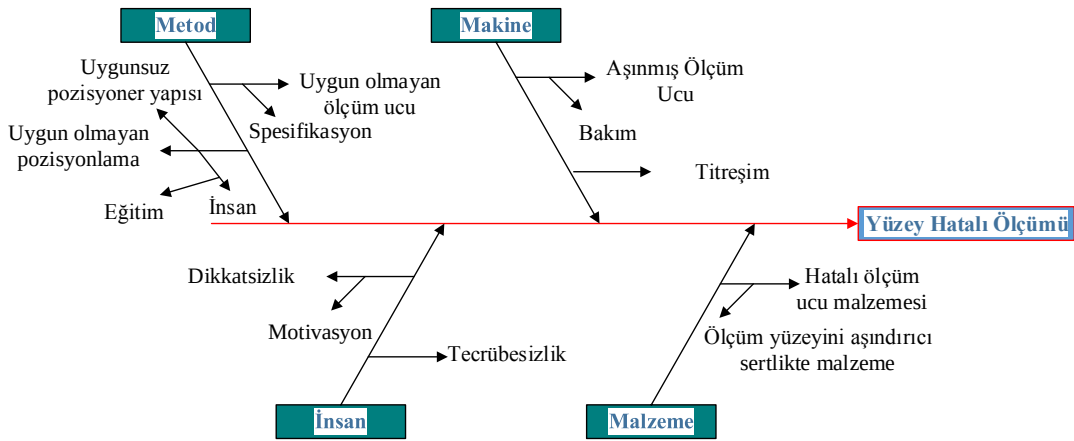
Bu örnekte görüldüğü gibi Ishikawa analizi İPK’da Ishikawa kontrol hesaplamalarına başlamadan önce gidilmesi gereken yolu belirlemede oldukça önemli bir araçtır. Şekil 3.4’de uygun olmayan pozisyonlama yapısının insan faktöründen olabileceği ya da mevcut pozisyoner yapısının gereklilikleri karşılamada yetersiz olabileceği görülmektedir.



Şekil 3.3: Neden-Sonuç analizinin akışı.

Mevcut durumda pozisyonlama mekanik profilometrenin altında bir mengene kullanılarak yapıldığından hassas pozisyonlama mümkün olmamakta ve süreç tamamiyle insan kontrolüne bırakılmaktadır. Bu sebepleri Ishikawa balık kılıcı diyagramında net olarak görmek mümkündür.

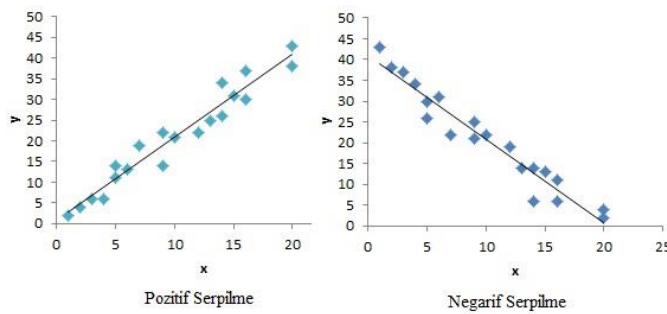
Tüm bu nedenlerden dolayı hem insan hem de makine'den kaynaklanan sorunları ortadan kaldırmak adına bir aksiyon almak adına stewart platformu bir pozisyoner olarak kullanılacak ve pozisyonlamada insan faktörü ortadan kaldırılacaktır. Aynı zamanda stewart platformu bir eğim sensörü ile konumlandırılarak pozisyonlama daha da mükemmelleştirilmeye çalışılacaktır.



Şekil 3.4:CPS Pressform'da yapılan hatalı yüzey pürüzlülük ölçümü Ishikawa analizi.

3.1.6 Serpilme Analizi

Serpilme diyagramı, iki değişken arasındaki ilişkiyi göstermek ve ikisi arasında korelasyon olup olmadığına karar vermek, bir neden-sonuç ilişkisi olabileceğini(yada neden-sonuç ilişkisi olmadığını) göstermek için kullanılan grafiksel bir araçtır.(Şekil 3.5)



Şekil 3.5: Pozitif ve negatif serpilme diyagramları

3.1.7 Ishikawa Kontrol Hesaplamaları

Kontrol Grafikleri ilk olarak 1920 lerde Bell Laboratuarlarında Walter Shewhart tarafından önerilmiştir. Shewhart süreç değişkenliğinde ki genel nedenler ve özel nedenleri ayrı tutmak için kontrol grafiklerini geliştirmiştir. Yakın zamanda, kontrol grafiği Japonların kalite ve verimlilik çalışmalarında yardımcı temel bir araç olmuştur. Japonların başarısı sonucunda, kontrol grafiklerine tüm dünyada ilgi duyulmuştur.

Ishikawa kontrol hesaplamaları ve diyagramları İPK'nin en önemli aşamasıdır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen C_p ve C_{pk} değerleri prosesin yeterliliğine dair bilgiler verir. Ayrıca işlemin sonucunda oluşturulan diyagramlar hataların düzgün bir dağılımla meydana gelip gelmediğini göstererek mevcut prosesin gelecekte yapılacak üretimlerde de güvenli bir şekilde toleranslar dahilinde ürün üretilip üretilmeyeceğinin anlaşılmasını sağlar. Ishikawa kontrol hesaplamaları yapılırken istatistiksel hesaplamalarda altı sigma kuralı uygulanır.

3.1.7.1 Altı Sigma

Sigma istatistiksel hesaplamalarda genellikle standart sapmayı belirten semboldür. Altı sigma 1986 yılında Motorola firması tarafından geliştirilen ve proseslerin iyileştirilmesi amacı ile geliştirilmiş bir yöntemdir. 1995 yılında General Electric firmasının ana geliştirme stratejisi olarak kullanılmış ve gösterdiği başarıdan sonra günümüzde endüstrinin vazgeçilmez uygulamalarından biri haline gelmiştir.

Bir proseste %99,99966 başarı seviyesini ifade eden Altı Sigma performans düzeyi aynı zamanda bunu gerçekleştirmeye yönelik vizyonu ve sistemi ifade eden bir sistemdir.

Genellikle üretim proseslerinde karşılaşılan sorunların çözümünde geçmişte yaşanmış tecrübeler düşünülerek tecrübeye dayalı kararlar alınırken altı sigma çözüme ulaşmada istatistiksel veriye dayalı bir yol izler. Bu aynı zamanda altı sigmanın yaşarken öğrenme ve sorunları anında çözme avantajını öne çıkarmaktadır.

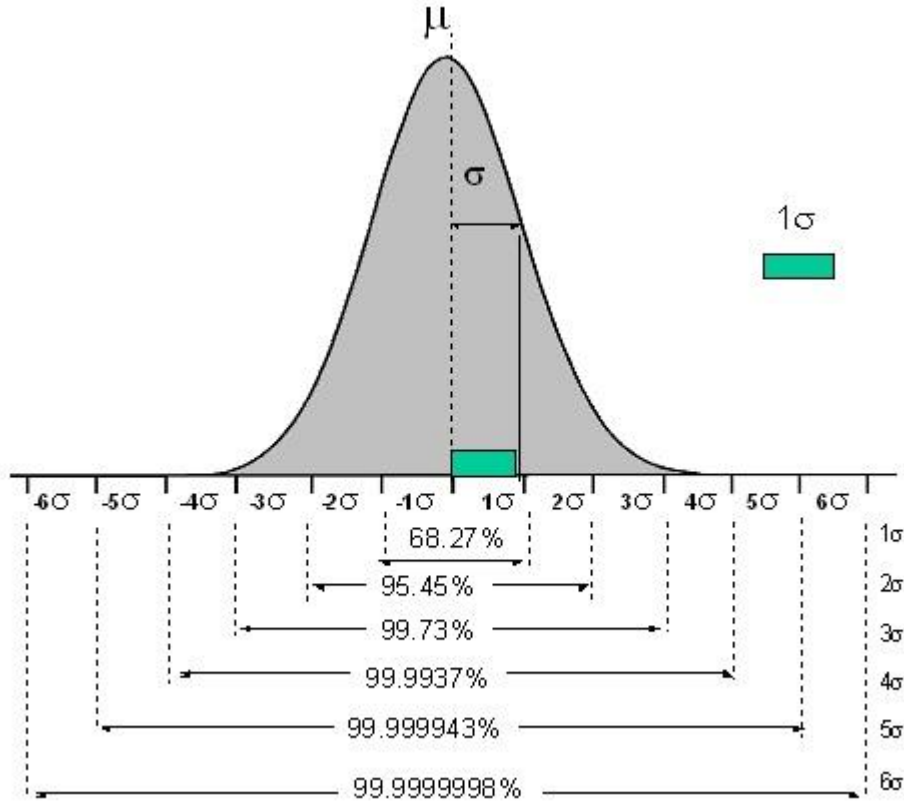
Altı sigma'da hedef sigma derecesi olarak “6 sigma” değerine ulaşmaktır. 6 sigma derecesinin anlamı istenilen ölçünün üst ve alt tolerans limitlerine standart sapmanın 6 katı oranında uzakta kalarak ürünleri üretmeye devam edebilmektir. Bu değer

%99.9999998’lık bir değeri gösterdiğinden neredeyse mükemmel yakın bir değerdir. Altı sigma’da gerçekçi hedef ise $\pm 3\sigma$ değerine ulaşmaktır. Bu değer Şekil 3.6’da görülen %99,73’lük başarı değerini gösterir.

Şekil 3.6’da görülen normal dağılımın fonksiyonu dikey eksen y yatak eksenini ise x kabul edersek;

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.1)$$

olur. Denklem 3.1’de μ değeri proses sayısını göstermektedir. Bu denkleme göre bir prosesin ilk aşamada gerçek hedefi üretilen 1.000.000 adet parçada yalnızca 3 hatalı ürün başarısıdır. Bu hedef ancak ilk aşama için geçerlidir. Her proses zamanla performansını yitirir ve gereken ortalama değerden bir miktar uzaklaşır bu sebeple altı sigma da bir alt tanım olarak 1,5 sigma ötelemesi terimi ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.6: Altı sigma normal dağılım grafiği.

6 sigma hedefi prosesin bir süre tekrarından sonra 1,5 sigma ötelemesi ile değerlendirilmeye başlanır. Bu değer 4,5 sigma değerine karşılık gelir. 4,5 sigma

değerinde prostesten ürettiği her 1.000.000 adet parçada en fazla 1.300 adet hatalı ürün üretmesi beklenir. Bu gereklilikleri karşılayan proses kesinlikle güvenilir bir proses olarak değerlendirilmektedir. (Çizelge 3.4)

Çizelge 3.4: Sigma Seviyeleri.

Sigma Seviyesi	1.000.000 Adetteki Hatalı Ürün	Hata Yüzdesi
1	691.500	69%
2	308.500	31%
3	66.800	6,70%
4	6.200	0,62%
5	230	0,023%
6	3	0,00034%

3.1.7.2 Kontrol Limitleri ve Grafikleri

3.1.7.2.1 Niceliksel Değerler İçin İstatistiksel Yöntemler

$\bar{x}$ ve R Grafikleri

$\bar{x}$ ve R grafikleri istatistiksel proses kontrolde en fazla kullanılan grafiklerden biridir. İstatistiksel proses kontrol yapılırken ölçülmek istenen ölçü değeri için farklı zamanlarda farklı operatörler tarafından üretilmiş ürünler birden fazla grupta her bir grupta eşit sayıda ürün olacak şekilde dağıtılır. $\bar{x}$ simgesi ölçülen her bir gruptaki değerlerin genel ortalamasını ifade eder. R simgesi ise bu ölçülen en büyük değer ile en küçük değer arasındaki farktır. $\bar{x}$ ve R grafikleri genellikle hızlı bir hesaplama için çok fazla olmayan ürün gruplarında verimli sonuçlar vermektedir.

Tüm gruplarda “n” adet örneklem adeti için $\bar{x}$ değeri;

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (3.2)$$

olarak hesaplanır.

Ölçülen grupta gözlenen en büyük değer ile en küçük değer arasındaki fark;

$$R = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m} \quad (3.3)$$

olarak hesaplanır.

$\bar{x}$ grafiği için kontrol limitleri;

$$\bar{ÜKL} = \bar{x} + A_2 R \quad (3.4)$$

$$AKL = \bar{x} - A_2 R \quad (3.5)$$

olarak hesaplanır. Burada ÜKL ve AKL sırasıyla üst ve alt kontrol limitleridir.

R grafiği için kontrol limitleri;

$$\bar{ÜKL} = D_4 R \quad (3.6)$$

$$AKL = D_3 R \quad (3.7)$$

Bu istatistiksel yöntem genellikle ölçü aletlerinin kalibrasyonunda kullanılan bir yöntemdir. Denklemlerde kullanılan A_2 , D_4 ve D_3 değişkenleri kontrol grafikleri sabitleridir ve değerleri istatistiğe katılan ölçüm numunesi sayısına göre değişkenlik gösterir.

$\bar{x}$ ve S Grafikleri

Alt grup örneklem büyüklüğü 10'un üzerine çıktığında sürecin standart sapmasının tahmin yoluyla hesaplanması iyi sonuçlar vermez. Bu durumlar için $\bar{x}$ ve S grafikleri kullanılır. Burada S standart sapmayı ifade eder. Hesaplamalarda standart sapma " σ " simgesi ile gösterilirken, kontrol grafiklerinde "S" harfi kullanılır. Özellikle hassas toleranslara sahip ürünlerin proses kontrollerinde bu yöntem kullanılmaktadır.

Ölçülen "n" adet ürünün standart sapmasının hesabı denlem 3.8 ile hesaplanır.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\bar{x} - x_1)^2 + (\bar{x} - x_2)^2 + \dots (\bar{x} - x_n)^2}{n - 1}} \quad (3.8)$$

Hesaplanan bu değere göre ÜKL;

$$\dot{ÜKL} = B_4 \sigma \quad (3.9)$$

AKL;

$$AKL = B_3 \sigma \quad (3.10)$$



Şekil 3.7: $\bar{x}$, S ve R grafikleri genel kurulum akışı.

3.1.7.2.2 Niteliksel Değerler İçin İstatistiksel Yöntemler

Niteliksel yöntemler sayısal olarak ifade edilemeyen kalite özelliklerini belirlemede kullanılır. Genellikle “kusurlu” ya da “kusursuz” şeklinde bir değerlendirmeye sınıflandırılır.

p kontrol grafiği

p grafiği proseste gerçekleşen kusurların oranını gözlemlemek için kullanılan bir grafiksel izleme aracıdır. Grafik temel olarak binom dağılımı yaklaşımına dayanmaktadır. P kontrol grafiğinde üst ve alt limit değerleri sırasıyla denklem 3.11 ve 3.12 deki gibi hesaplanır.

$$\dot{ÜKL} = \bar{p} + 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{n}} \quad (3.11)$$

Burada $\bar{p}$ gözlemlenen kusur dağılımının merkez hattını göstermektedir.

$$AKL = \bar{p} - 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{n}} \quad (3.12)$$

***np* kontrol grafiği**

np grafiği proseste gerçekleşen kusurların sayısını gözlemlemek için kullanılan bir grafiksel izleme aracıdır. *np* kontrol grafiğinde üst ve alt kontrol limitleri ise;

$$\text{ÜKL} = np + 3\sqrt{np(1 - p)} \quad (3.13)$$

$$AKL = np - 3\sqrt{np(1 - p)} \quad (3.14)$$

***c* kontrol grafiği**

c grafiği incelenen her ürünün farklı uygunsuzluklara sahip olması durumunda ve bu uygunsuzlukların sayılabilir olması durumunda kullanılır. *c* değeri her uygunsuzluğın sayısını gösterirken $\bar{c}$ değeri ise mevcut her bir uygunsuzluğın ortalamasını ifade eder.[10] *c* kontrol grafiğinde üst ve alt kontrol limitleri;

$$\text{ÜKL, AKL} = c \pm 3\sqrt{\bar{c}} \quad (3.15)$$

olarak ifade edilir.

***u* kontrol grafiği**

u kontrol grafiği genellikle birim başına düşen kusur sayısını hesaplamak için kullanılır. Alt ve üst sınır değeri birim başına düşen kusur sayının oranın göre hesaplanır.

Birim başına düşen kusur sayısı c_i bir alt gruptaki tüm birimlerin toplam kusur sayısı ve n_i her alt gruptaki birim sayısı olmak üzere denklem 3.16 deki gibi hesaplanır.

$$\bar{u} = \frac{\sum c_i}{\sum n_i} \quad (3.16)$$

olarak hesaplanır.

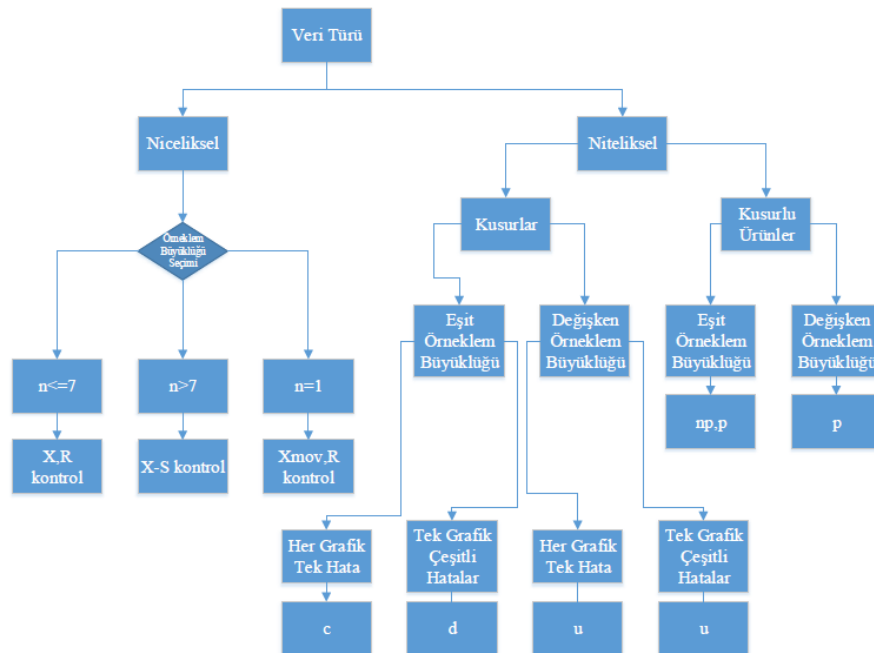
Alt ve üst kontrol limitleri ise şu formuller yardımıyla bulunur:

$$\bar{U}KL, AKL = \bar{u} \pm 3 \sqrt{\frac{u}{n_i}} \quad (3.17)$$

Bir u grafiğinin n ve np grafiklerinden en önemli farkı kusur sayısının ölçülen parça sayısından daha fazla olabilmesi durumudur. Örnek genişliğinin sabit olmadığı durumlarda birin başına düşen kusur sayısındaki değişim bu grafikler yardımı ile incelenir.

3.1.7.2.3 Kontrol Yönteminin Seçimi

Kontrol yönteminin seçiminde en önemli etken incelenecek verilerin özellikleridir. İncelenecek verinin matematiksel olarak ifade edilebilir olması ve incelenecek verilerin örneklem boyutları etkili kontrol yönteminin seçiminde en etken özelliklerdir. Şekil 3.8’de etkin control yöntemlerinin özeti görülmektedir.



Şekil 3.8: İstatistiksel kontrol yöntemi seçimi.

Şekil 3.8 kontrol limitleri ve grafikleri yöntemlerinin bir özeti olmakla birlikte aynı zamanda istatistiksel olarak incelenmesi istenen mevcut prosese göre seçilmesi gereken yöntemi göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında prosesin geliştirilmesi üzere paralel robotlardan yararlanılacak ürünün yüzey pürüzlülük değeri incelenecektir. Yüzey pürüzlülük değeri matematiksel olarak ifade edilebilir olduğundan dolayı niceliksel bir kontrol yöntemine ihtiyaç olduğu şekil 3.8’de görülmektedir. Ürün aynı zamanda bir seri imalat ürünü olduğundan ve ölçülecek değer değişkenlik göstermeye açık bir değer olduğundan 7 adetten çok daha fazla numune üzerinde ölçüm yapma ihtiyacı vardır. Bu sebeple kontrol yöntemi olarak $\bar{x}$,s kontrol limitleri ve grafikleri kullanılacaktır.

3.1.7.3 Proses Yeterlilik İndisleri

Proses yeterlilik indisleri 6 sigma ile bağlantılı olarak bir prosesin yeterliliğini belirten bir değerlendirme yöntemidir. Özellikle otomotiv sanayinde uluslararası olarak kabul edilen TS/16949 ve APQP(İleri Ürün Kalite Planlaması) proseslerin yeterliliklerini bu indislerle kanıtlamak bir zorunluluktur.

Genellikle proses yeterliliğinde ölçülen değer Şekil 3.6’da gösterilen normal dağılımı izlemesi istenir. Normal dağılım içerisinde ürün ölçüsünün ortalama değeri, bu değere göre standart sapmaları ve üst alt kontrol limitlerini barındırır. Tüm bu içerikler herhangi bir uygunsuzluk durumu olasılığının hesaplanmasında kullanılmaktadır.

C_p ve C_{pk} indisleri

C_p ve C_{pk} indisleri bir prosesin yeterliliğini belirlerken hesaplanan en önemli indislerdir. C_p basitçe proses yeterliliği anlamına gelmektedir ve prosesin o an ki durumu ile ilgili yeterlilik bilgileri verir. C_{pk} ise proses yeterliliği içeriği anlamına gelir ve prosesin yeterliliğini normal olmayan dağılımların da hesaba katılmasıyla değerlendirir. Bu bağlamda C_{pk} indisi prosesin yalnızca yeterliliğini değil güvenilirliğini de kontrol etmektedir.

Bir proseste üretilen ürünün ölçülmek istenen değeri çok az değişimler göstermesine rağmen giderek üst ya da alt kontrol limitlerine doğru yöneliyor ve ortalama değerden uzaklaşıyorsa prosesin o andaki yeterliliği(C_p) değeri yüksek çıkmasına

karşın prosesin tutarlılığı da hesaba katılarak bulunan yeterliliği(C_{pk}) değeri düşük çıkacaktır. Aynı şekilde proste üretilen ürünün ölçülmek istenen değeri tolerans sınırları içerisinde olmasına rağmen değerler her seferinde üst ve alt kontrol limitlerine sırasıyla yaklaşıyorsa ortalama değer mükemmel çıkmasına rağmen proses tutarlı davranış göstermediğinden C_p değeri yüksek çıkacakken C_{pk} değeri düşük çıkacaktır. Bu durumda özellikle uzun sürecek bir prosesin yeterliliği hakkında kesin bilgi ancak C_{pk} değerinin belirlenmesi ile mümkün olmaktadır.

C_p değeri tolerans aralığının 6 sigma değerine bölünmesiyle bulunur ve denklem 3.18 deki gibi hesaplanır.

$$C_p = \frac{\bar{U}T - AT}{6\sigma} \quad (3.18)$$

Burada $\bar{U}T$ ve AT sırasıyla üst ve alt tolerans değerleridir. C_{pk} değeri ise üst ve alt tolerans limitlerinin ortalama değer ile olan farkının 3σ ile bölümünden minimum değerde olan seçilerek denklem 3.19'daki gibi hesaplanır.

$$C_{pk} = \min\left(\left(\frac{\bar{x} - AT}{3\sigma}\right), \left(\frac{\bar{U}T - \bar{x}}{3\sigma}\right)\right) \quad (3.19)$$

Denklem 3.19'da minimum değerın seçilmesinin sebebi ortalama değer olan $\bar{x}$ değerının alt veya üst toleranslardan hangisine doğru eğilim gösterdiğine göre C_{pk} değerının değişmesidir.

Elde edilen C_p ve C_{pk} değerlerine göre prosesin yeterliliği ve güvenilirliği analiz edilirken standartlaştırılmış bazı aralıklar olsa da mevcut prosesin yapısına ve ölçülen değerin tolerasına göre bu değerler çok iyi şekilde analiz edilmelidir. Daha güvenilir proses daha kaliteli ürün daha düşük maliyet anlamına geldiğinden proses yeterliliklerini artırmak üretim sektörünün en önemli önceliklerindendir.

Otomotivde genellikle yeni kurulan bir proste “kısa dönem” ve “uzun dönem” yeterlilikleri olarak 2 ayrı yeterlilik testi yapılmaktadır. Kısa dönem yeterlilik testinde proses ilk kurulduğunda sigma seviyesinin “6 σ ” mertebesinde olması hedeflenir. Bu C_{pk} değeri olarak “2” değerine denk gelir. Proste belirli bir süre

geçtikten sonra prosesin tüm çevresel etkileri ve değişkenleri dengeye geldiğinde sigma seviyesinde bir düşüş olması hedeflenir. Bu düşüş ile birlikte ölçülen değer uzun dönem yeterlilik değeridir ve çoğunlukla sigma 4,5 ve C_{pk} değeri olarak “1,5” mertebesinde olur. Elbette bu değerle ulaşmak prostesten prosese değışmekle birlikte oldukça zordur. Kısaca $C_{pk} = 2$ değeri ulaşılması istenen hedefi gösterir.

- C_p ve $C_{pk} > 1,33$ olduğunda proses yeterlidir ve mevcut durumda ve gelecekteki bir süre için gerekli spesifikasyonları karşılayabilir.
- $C_p > 1,33$ ve $C_{pk} > 1$ durumunda proses mevcut durum için kabul edilebilir olmasına rağmen kısa vade de potansiyel bir hata ile karşılaşma ihtimali çok yüksektir.
- C_p ve $C_{pk} < 1$ ise proses mevcut durumda yetersizdir ve ileriye dönük bir gelişme beklenmemektedir. Prosesin geliştirilmesi üzerine en kısa zamanda çalışmalar yapılmalıdır.

$C_{pk} = 1,33$ değerinde sayısal olarak 1.000.000 adet üretilen parçadan yalnızca 6.210 adetinin ilgili ölçüsü tolerans limitleri dışında çıkacaktır. $C_{pk} = 1$ değerinde ise üretilen 1.000.000 adet parçanın 66.807 adetinde ilgili ölçü tolerans limitleri dışındadır. Ulaşılması istenen hedef olarak belirlediğimiz $C_{pk} = 2$ değerinde üretilen 1.000.000 adet parçanın yalnızca 3 adetinde ilgili ölçü tolerans limitleri dışında kalacaktır. C_{pk} değerleri ve üretilen hatalı ürün karşılaştırılmalarını içeren detaylı tablo EK A.1’de yer almaktadır.

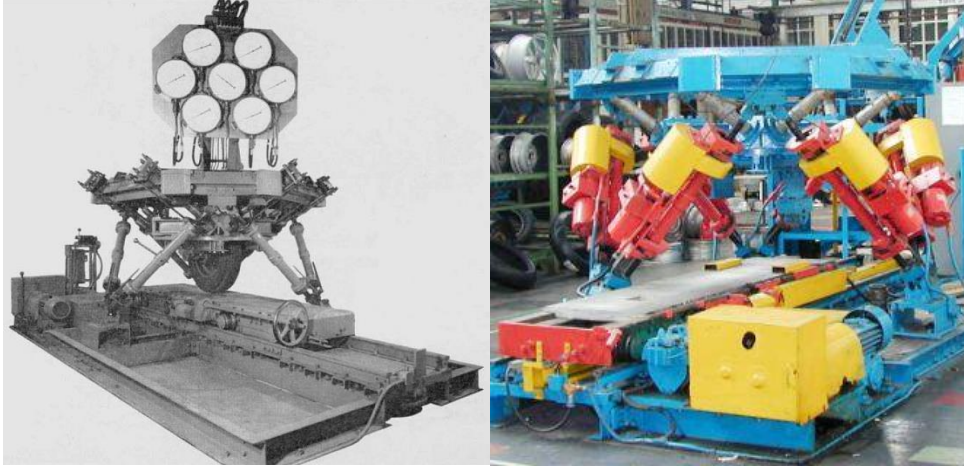
4. STEWART PLATFORMU

Paralel manipulatörler hassas hareket kabiliyeti, rijitlik ve yüksek yük taşıma özellikleri ön plana çıkan kapalı çevrim mekanizmasına sahip sistemlerdir. Genellikle paralel manipulatörlerin yapısı 2 ana kütleyi birbirine bağlayan ve paralel bir şekilde hareket eden çok sayıda bağlantı elemanlarından oluşur. Bu 2 ana kütleden isteğe bağlı olarak sabit bir şekilde tasarlanan yapıya “sabit platform” ya da “taban”, oluşturulan tasarımın izin verdiği sınırlar dahilinde hareket eden kütleye ise “hareketli platform” ya da “uç işlevcisi” denir. Bu iki platform birbirine küresel, universal, dönel ya da prizmatik mafsallar yardımıyla bağlanır. Paralel robotlarda genellikle hareketi sağlayan eyleyici sayısı, serbestlik derecesiyle aynı olmaktadır.

Paralel platformlar arasında en popüler olanlarından biri de Stewart platformudur. Stewart platformu ilk olarak 1965 yılında bir uçuş simulatörü olarak kullanılmak üzere Stewart tarafından geliştirilmiştir. Platformun sahip olduğu yapı ilk olarak bir otomotiv mühendisi olan Dr. Eric Gough tarafından bir otomobil lastiğine gelen yüklerin etkisini test etmek amacıyla 1954 yılında kurulmasına karşın ilk olarak Stewart tarafından yayınlandığından platforma Gough-Stewart platformu da denmektedir. Stewart tarafından önerildiği tarihten itibaren neredeyse 15 yıl boyunca platform fazla bir çalışmaya konu olmamasına rağmen 1984 yılında Hunt platformun hareket kabiliyetinin yanı sıra, mükemmel pozisyonel hassaslığını ön plana çıkarmış ve böylelikle Stewart platformu üretim sektöründen, ar-ge ve sağlık sektörüne kadar birçok alanda popüler olmaya başlamıştır.

Stewart platformu 2 ana platform ve bu 2 ana platformu birbirine bağlayan 6 adet baktan oluşan bir yapıya sahiptir. Stewart platformunun genel yapıda sabit platforma bağlı bacakları universal mafsaldan oluşur ve bu mafsala bağlı bacaklar ise lineer pozisyon değişimini sağlaması için prizmatik mafsallara bağlıdır. Prizmatik mafsaldan sonra devam eden bacak yapısı hareketli platforma küresel mafsallarla bağlıdır. Stewart platformunun genel olarak bu yapıda kurulmasının temel sebebi çok yüksek ağırlıklarda çalışabilmesini mümkün kılmaktır.(Şekil 4.1) Bu çalışmadaki

gereklilikler göz önüne alındığında stewart platformu sabit platforma bağlı step motorlar dönel mafsall olarak kullanılmaktadır.



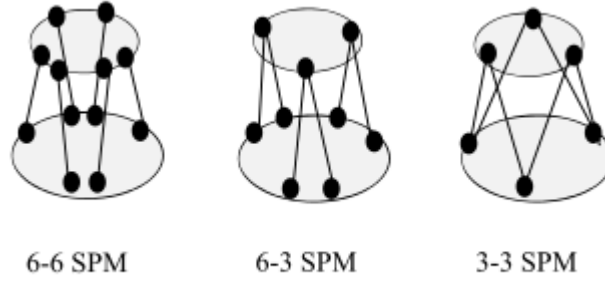
Şekil 4.1: Dr. Eric Gough tarafından geliştirilen ilk model ve günümüzdeki örneği.

Bu çalışmadaki gereklilikler göz önüne alındığında stewart platformu sabit platforma bağlı step motorlar dönel mafsall olarak kullanılmaktadır. Dönel mafsallara bağlı uzuvlar küresel mafsallar yardımıyla, hareketli platforma yine küresel mafsallarla bağlı olan ikinci uzuvlara bağlanır. Stewart platformunda genellikle alt kütle sabit üst kütle hareketli olmasına rağmen üst kütle sabit alt kütle hareketli olduğu petrol platformları, helikopterle taşıma üniteleri gibi yapılarda vardır. Genellikle alt ve üst kütlelerdeki bacak yapıları eş düzlemliler olarak monte edilir. Eş düzlemliler olmadan monte edilen yapıların kinematik çözümleri zordur ve gerekmedikçe bu şekilde yapılar tasarlanmamasına rağmen ekstra algılayıcılar yardımıyla bu yapıları da çözmek mümkündür.

Stewart platformları genellikle bağlantı elemanlarının sırasına göre bir ön ad alabilirler. Alt kütlede universal, ortada prizmatik ve üst kütlede küresel bağlantı elemanı bulunduran yapılar UPS, alt kütlede küresel, ortada prizmatik, üst kütlede küresel bağlantı elemanı bulunduranlar SPS, ve bu projede kullanıldığı gibi alt kütlede dönel, ortada küresel ve üst kütlede küresel bağlantı bulunduranlar RSS şeklinde ön ad alırlar.

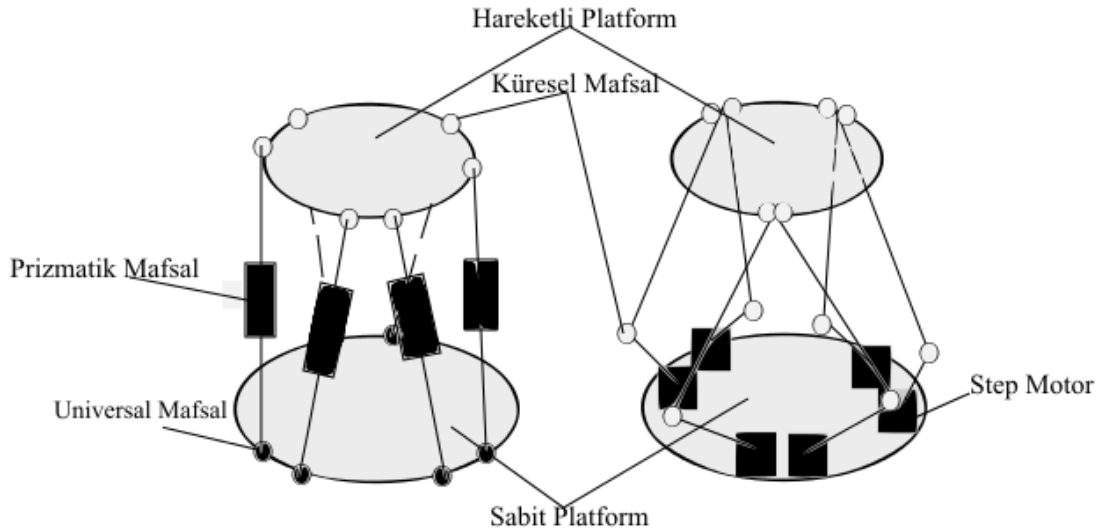
Stewart platformları ayaklarının bağlantı şekillerine göre de isimlendirilebilirler. Bu yapısal değişiklikler genellikle sistemin kinematik çözümünü kolaylaştırmak, daha hassas düşük hatalı yapılar elde edebilmek için yapılır. Alt kütlede 6 ayrı bağlantı bölgesi üst kütledeki 6 ayrı bağlantı bölgesine bağlı ise bu yapılar 6-6 SPM olarak

adlandırılır. Alt platformun 6 ayrı bağlantı bölgesine bağlı bacaklar üst platformda 3 ayrı bölgede birleşiyorsa 6-3 SPM olarak adlandırılırlar. Yine alt ve üst platformda her 2 bacak bir bağlantı noktasına bağlanmak üzere oluşturulan yapılar 3-3 SPM olarak adlandırılmaktadır.(Şekil 4.2)



Şekil 4.2: 6-6,6-3,3-3 SPM yapıları.

Şekil 4.3’de genel stewart platformu ile bu projede üretilen stewart platformu arasındaki yapısal fark görülmektedir. Genellikle stewart platformlarındaki eyleyiciler yüksek tork değerlerine maruz kaldıklarından yük altındaki performansları en önemli seçim kriterleri olmuştur.



Şekil 4.3: Lineer ve dönel stewart platformları.

Bu sebeple bu projede kullanıldığı gibi rotasyonel hareket sağlayan DC motorlar ve bu motorlarla birlikte kurulan yapı günümüzdeki stewart platformlarında çok tercih edilmez. Step motorların düşük pozisyon hatalarının olması ve bu hataların kümülatif olmamasına rağmen yüksek tork altında adım hataları oldukça yükseldiğinden ağır yüklerle çalışması beklenen stewart platformlarında kullanılmazlar. Ancak yük taşımamanın stewart platformunun amaçlarından biri olmadığı durumlarda step motorlar yüksek pozisyonlama kabiliyetlerinden dolayı öne çıktığından bu projede dönel stewart platformu yapısı tercih edilmiştir.

4.1 Stewart Platformunun Kullanım Alanları

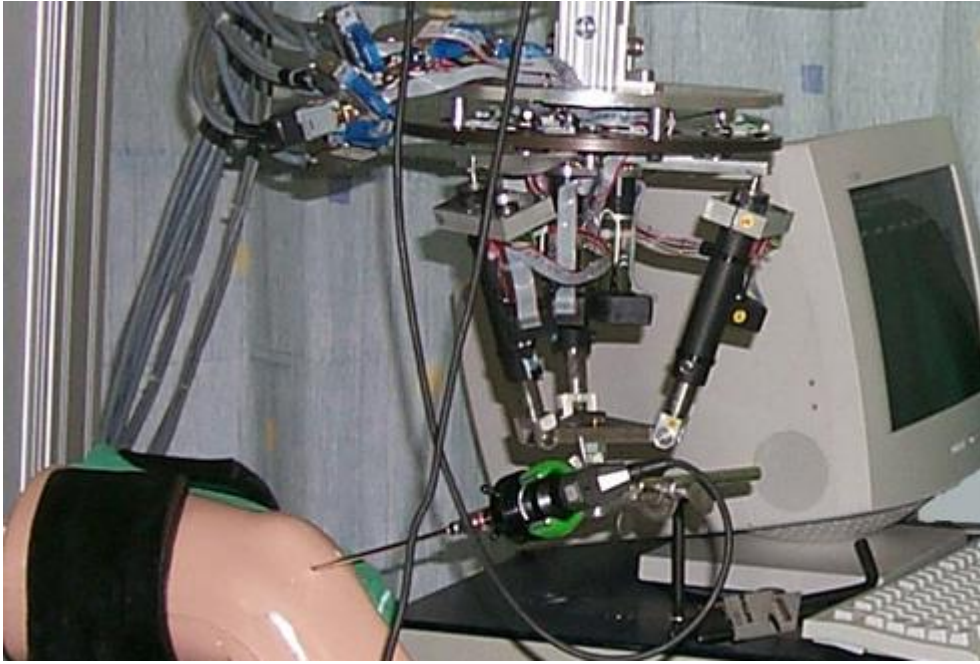
Stewart platformunun en popüler uygulama alanı ortaya çıkış amacı olan uçuş simülatörü olarak kullanılmasıdır.(Şekil 4.4).



Şekil 4.4: Swissair firmasının uçuş simülatörü.

Şekil 4.4’de bir havacılık firmasının pilot eğitiminde ve uçak kazalarının analizinde kullandığı bir SPM görülmektedir. 6 serbestlik dereceli seri hareket kabiliyeti sayesinde SPM’ler pilotun uçuş esnasında maruz kalacağı kuvvetleri ve hareketleri simüle edebilmektedir.

Son yıllarda robotik otomasyon biliminin sağlık sektöründe kullanımı ile ilgili artan araştırmalar stewart platformunun birçok cerrahi operasyonda görülmesine yol açmıştır. Şekil 4.5’de görülen düzenek bir artroskopi ameliyatında kullanılmak üzere kurulmuştur. Bu düzenek sayesinde cerrah hastanın kemik yapısını kalem kalınlığında bir kamera yardımıyla izlemektedir. Bu işlemin stewart platformu yardımıyla gerçekleştirilmesi stewart platformunun hassas pozisyonlama yeteneği ile cerrahi operasyon sırasında oluşan kanamaların minimum seviyede gerçekleşmesini mümkün kılmaktadır.



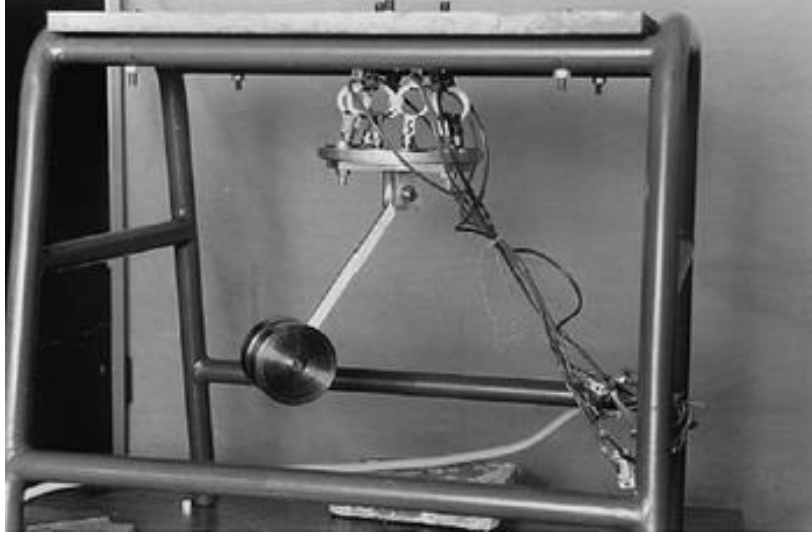
Şekil 4.5: Stewart platformlu artroskopi düzeneği[31].

Şekil 4.6’da stewart platformunun imalat sektöründe kullanımının bir örneği görülmektedir. Stewart platformunun rijit yapısı talaş kaldırma gibi yüksek tepki kuvveti meydana gerektiren ortamlar için çok uygundur. Seri manipulatörlere göre dinamik karakteristikleri yüksek mekanik yapıya sahip olması stewart platformunun yüksek tork değerleri altında hassas pozisyonlama gereken çalışmalarda özellikle tercih edilmesine sebep olmuştur. Talaş kaldırma işlemlerinde yüksek çalışma hacminin gerektiği yerlerde stewart platformu yetersiz kalabilmektedir. Bu durum stewart platformunun üretim alanında işleme ucunun hareket kabiliyetini sağlayan mekanizma olarak kullanımını kısıtlamaktadır. Bu nedenle çalışma hacmi ve tekillik gibi konular paralel manipulatörlerde önemli araştırma konularıdır.



Şekil 4.6: Talaşlı imalat makinası olarak SPM[32].

Stewart platformunun bir başka uygulama alanı da kuvvet sensörü uygulamalarıdır. İlk olarak 1998 yılında SPM yapısının statik kuvvet iletim yapısındaki hassaslığı ön plana çıkartılarak bir kuvvet-tork sensörü olarak kullanılmıştır(Şekil 4.7).



Şekil 4.7: Kuvvet-tork sensörü olarak SPM[30].

Stewart platformunun astronomi alanında ilk kullanımı Avrupa Uzay Rasathanesi (ESO) tarafından Cassagrain teleskopunun konum hatalarını gidermek üzere gerçekleştirildi. Bu yapıda stewart platformu, teleskobun ısıya ve eğime bağlı konum hatalarını gidermek amacıyla birincil aynadan aldığı bilgiye göre ikincil bir aynanın optik hizalayıcısı olarak çalışmaktadır.

Stewart platformunun diğer robotlarla birlikte çalıştığı hibrit yapılarda mevcuttur. 1999 yılında Rene Graf ve Rudiger Dillmann'ın yaptığı çalışmada stewart platformu

taşıyıcı araç olarak kullanılan bir mobil robotun üzerinde ivme sönümleyici olarak kullanılmıştır. Sistemde mobil robotun ivme datası odometre yardımıyla alınmış ve ivme datasının integrali alınarak stewart platformunun pozisyonlaması gerçekleştirilmiştir. İntegralden kaynaklanan kümülatif hatalar washout filtresi yardımıyla elemine edilmiştir.

4.2 Tekillik

Kinematik tekillik manipülatörün uç işlevcisinin mafsallarla olan pozisyonel ilişkisini modelleyen ters kinematik denklemlerinden en az birinin lineer bağımlı duruma gelmesiyle oluşur. Kinematik tekillik bir manipulatörün serbestlik derecesinde anlık olarak beklenmedik değişikliklerin yaşanmasıyla tüm mekanizma yapısının değişmesi durumudur. Bu durum bir çok uygulamada hesaba katılması, incelenmesi ve kontrol altında tutulması gereken bir olaydır.

Tekilliğin etkileri:

- Serbestlik Derecesi Kaybı. Kinematik denklemlerin türevi ve ileri kinematik, manipülatörlerin eklem hızları ile uç işlevcisi hızı arasındaki ilişkinin modellenmesinde kullanılır. Bu lineer transformasyon literatürde “Manipülatör Jakobian” olarak geçer. Tekillikler jakobian rank değerinde düşüşe ve bununla birlikte uç işlevcisinin bir veya daha fazla derecede hareket kaybına sebep olur.
- Çalışma Uzayı. Bir manipulator çalışma uzayının sınırlarına geldiğinde zorunlu olarak kinematik haritasının tekillik bölgesine giriş yapar. Bu durumda ters kinematik pozisyonlama kuralları geçerli olmaz. Sonuç olarak manipülatörün çeşitli eklemleri kontrol dışı pozisyonlanabilir. Dolayısıyla manipülatörün tekillik bilgisi çalışma uzayı hakkında önemli bilgiler verebilir.
- Kontrol Kaybı. Manipülatörlerin kontrolünde çeşitli yöntemler kullanılır. Hız kontrolü tekniğinde uç işlevcisinin hedefe belirli bir hızda ulaşabilmesi için ileri kinematik denklemlerin türevinin tersi alınarak tüm eklemlerin sahip oldukları hız belirlenmelidir. Tekillik durumunda bu matris koşulları hesaplanamaz duruma gelerek kontrol algoritmasının çökmesine ya da ivme ve hızda sürdürülemez büyüklükte bir seviyeye gelmesine yol açabilir.

Bunun dışında paralel manipulatörler için iyi bir şekilde adapte edilmiş kuvvet kontrolünde eklem ve mafsallık kuvvetleri sisteme zarar verecek kadar büyük seviyelere ulaşabilmektedir. Genellikle denklem 4.1’de Y katsayısının tersinin alınmadığı durumlarda gerçekleşir.

- Mekanik Avantaj. Kinematik tekillik yakınlarında, eklem değişkenlerinin geniş hareketler yapması uç işlevcisinin yavaş hareket etmesi sonucunu doğurabilir. Bu durum manipulatöre bir taşıyıcı olarak avantaj sağlayabilir. Yine bu durum manipulatörün uç işlevcisinin hassas konumlandırıcı olarak kullanılmasına da imkan sağlayabilir.

θ_{end} mafsallık değişkenlerinin konumunu, W_h ise uç işlevcisinin hızını ifade eden vektörler olsun, θ_{end} ‘in zamanla değişimi ile W_h arasındaki bağıntı X ve Y gibi iki değişken ile ifade edilmek istenirse;

$$X\theta_{end} + YW_h = 0 \quad (4.1)$$

denklemini elde edilir. Bu denkleme göre X’in tekillik olması durumunda uç işlevcisinin hareketsiz olduğu $W_h=0$ durumları için mafsalların hız vektörü $d\theta_{end}$ sıfırdan farklı bir değer olur. Bu tip tekillik durumlarında mafsallık hızının çok büyük olduğu durumlar çok küçük uç işlevcisi hızları yaratır.

Seri manipulatörlerin aksine paralel manipulatörler tam anlamıyla kinematik tekilliğe sahip değildir bu nedenle hareket potansiyelleri genellikle mafsalların hareket limitlerine bağlıdır. Ancak paralel manipulatörler kuvvet transformasyon matrislerinde kuvvet tekilliği yaşayabilirler. Bu durum manipulatörlerin serbestlik derecesi yerine kısıt kaybetmelerine ve kontrol dışı hareket etmelerine sebep olur.[13] Bu şekilde gerçekleşen tekillik Gosselin ve Angeles’in çalışmasında “ikinci tip” tekillik olarak tanımlanır.

Tekillik Konfigürasyonu

Robotik manipulatörlerde tüm hareketi boyunca pozisyon ve kuvvet değerleri açısından tamamiyle kontrol edilebilir bir sistem yaratmak ancak tekillik konfigürasyonların hesaba katılmasıyla mümkündür. Tekillik konfigürasyonları kontrol altında tutmak için yapılması gereken tasarımın bu konfigürasyonlar göz önüne

alınarak yapılması ve bu konfigürasyonların çalışma uzayının dışında tutulmasıdır. Bir diğer yöntem ise tekil konfigürasyonların pozisyonlarının belirlenmesi ve kontrol algoritmasının bu pozisyonlardan kaçınacak şekilde geliştirilmesidir.

Uç eleman yörüngesinin değiştirilmesinin her uygulamada mümkün olmaması ve özellikle gerçek zamanlı kontrol edilen sistemlerde yeni bir yörünge tanımlaması konusunda kullanışlı yöntemler geliştirilememesi sebebiyle günümüzde en çok tercih edilen tasarım yöntemi bu konfigürasyonların çalışma uzayından çıkarılmasıdır.

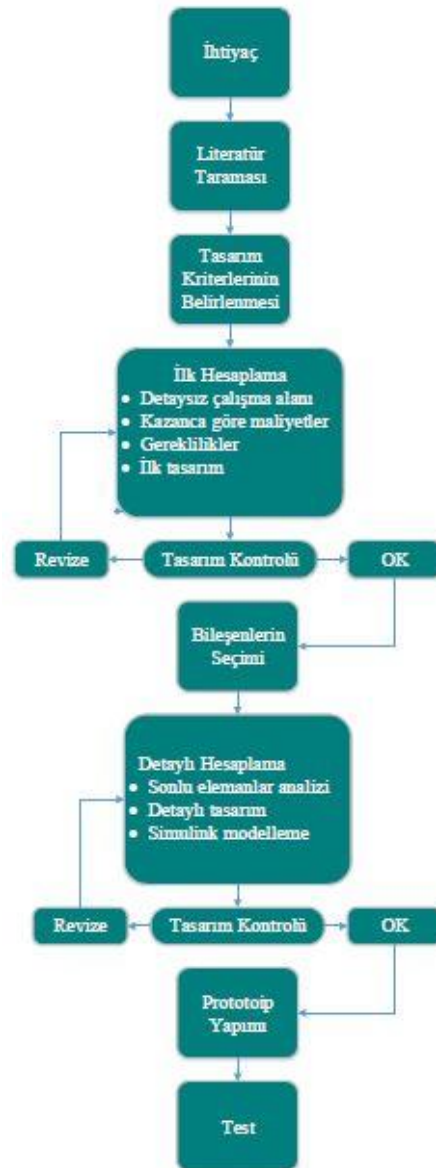
Mekanizmanın tekil bir konfigürasyona olan yakınlığı sistem Jakobiyen matrisin özdeğerleri incelenerek hesaplanabilir. Özdeğerlerinin herhangi birinin sıfıra yakınsaması durumunda sistemin tekil bir konfigürasyona yaklaştığı anlaşılır. Literatürde tekillik endeksi olarak adlandırılan bir değer bu tip kritik konumları belirlemede kullanılmaktadır. Tekillik endeksi Jakobiyen matrisinin determinantıdır ve böylece özdeğerlerin sıfıra yaklaşması durumunda sıfıra doğru yakınsar. [14]

4.3 Stewart Platformu Tasarımı

Tasarımın ilk aşaması elbette çözülmesi istenen problemin iyi bir şekilde tanımlanmasıdır. Tüm gerekliliklerin açık bir şekilde ortaya konulması ve incelenmesi, en uygun yapının oluşturulmasında izlenecek yolu belirler. Bu aşamada ilk olarak tanımlanan ihtiyacın giderilmesi amacıyla oluşturulacak tasarımın yapısı için gereklilikler göz önüne alınarak tutarlı tahminler yapılmaya çalışılır. Bu tahminler doğrultusunda mevcut sistemlerin literatürdeki uygulama alanları araştırılır. Ardından tasarım kriterleri belirlenerek detaysız ilk hesaplamalar ve tasarımlar gerçekleştirilir. Yapılan bu ilk tasarım değerlendirilir ve bu detaysız yalnızca ana hatları belli tasarım üzerinde karar verilmesi durumunda gerekli bileşenlerin seçimleri üzerine yoğunlaşılır. Bu aşamadan sonra gereklilikler doğrultusunda detaylı mühendislik hesaplamaları yapılır. Oluşturulan modellerden alınan sonuçlara göre tasarım incelenir ve onaylanması durumunda prototiplerin oluşturulması ve testlerin yapılması aşamasına geçilir. Şekil 4.8 bu çalışma için tasarlanan stewart platformunun tüm tasarım kriterlerinin seçilmesinde ve nihai tasarımın meydana getirilmesinde izlenen yolun akışını özetlemektedir. Akışa göre en kritik bölgeler tasarım kontrollerin yapıldığı bölgeler olarak gözükmemektedir.

4.3.1 Tasarım Gereklilikleri

Yüzey pürüzlülük ölçümü yapan mekanik bir profilometrenin altında konumlandırıcı olarak tasarlanması planlanan SPM mekanizmasının ve tasarlanan yapının hareketini sağlayacak eyleyicilerin seçiminde en önemli kriter iş yüküdür. Mekanizmanın taşınması ve konumlandırılması gereken iş yükünü herhangi bir pozisyon kaybı yaşamadan hassas bir şekilde konumlandırabilecek yapıya sahip olması çok önemlidir. İkinci önemli kriter ise tasarımın boyutlandırılmasında çok önemli olan iş yükünün uzayda kapladığı hacimdir. SPM mekanizmasının platformu iş yükünün kolayca sabitlenebileceği boyutlarda olmalıdır. Üçüncü tasarım kriteri ise tasarımda



Şekil 4.8: Tasarım akış şeması.

kullanılması planlanan mafsalların limitleri ve bağlantı elemanlarının boyutlarıdır. Bu limitler aynı zamanda robotun uç işlevcisi olan platformun hareket kabiliyetlerini belirleyecek olan limitlerdir. Dolayısıyla oluşturulması planlanan ana tasarım 3 ana gereklilik temel alınarak belirlenmiştir.

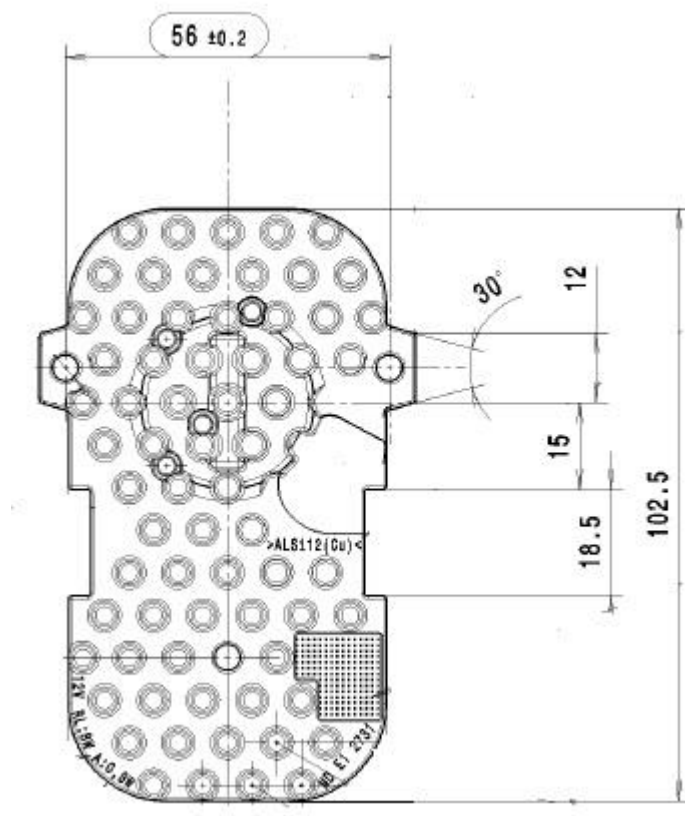
Yüzey pürüzlülük ölçümünün en doğru pozisyonda yapılabilmesi için konumlandırıcı ölçüm tablası olarak kullanılacak SPM mekanizmasının altında ilk etapta kullanılacak ürün yüksek basınçlı enjeksiyon yöntemiyle üretilen AlSi12 malzemesine sahip bir soğutucudur.(Şekil 4.9)



Şekil 4.9: Pürüzlülük ölçümü yapılacak iş parçası(Soğutucu).

Şekil 4.9’da görülen iş parçası otomobillerin ön farlarındaki aydınlatma sistemlerinin elektronik devrelerinin üzerine monte edildiği bir soğutucu elemanıdır. Bu elemanın ana görevi üzerine monte edilen elektrondan taşınım yoluyla ısı geçisi yaparak sıcaklık değerini düşürmek ve devreyi güvenli çalışabilir seviyede tutmaktır. Ürünün sahip olduğu ağırlık 150 gramdır. Ürün Şekil 4.10 da görüldüğü gibi 102.5mmx56mm boyutlarındadır. Ürün üzerinde yapılacak 2 adet yüzey pürüzlülüğü noktası belirtilmiştir. Yapılacak ilk ölçüm Şekil 4.9’da görülen düz yüzey ve şekil 4.10’da görülen taralı yüzeydir. Bu yüzeyler ürün platforma koyulduğu anda platformla yaklaşık olarak 20 derecelik bir açı yapmaktadırlar. Yüzey pürüzlülüğü ölçümünün kusursuz olarak yapılabilmesi için yüzey pürüzlülüğü yapılacak yüzeyler ile ölçüm ucunun yatay x ve y eksenlerinde oluşturulacak yüzeylerin paralel olması

Tasarım gereklilikleri belirlendikten sonra gerekli taşıma ve dönme hareketlerini vermesi için tasarlanacak SPM mekanizmasının lineer yada dönel mafsallardan hangilerinin kullanılacağına karar verilmesi gerekmektedir. Bu konu incelendiğinde genel Stewart platformu lineer mafsalsız olarak 2 çeşit eyleyici kullanmaktadır. En çok kullanılan yapı hidrolik piston yapısı iken nano hassaslıkta pozisyonlama uygulamalarında lineer step motorların kullanıldıkları görülmektedir.



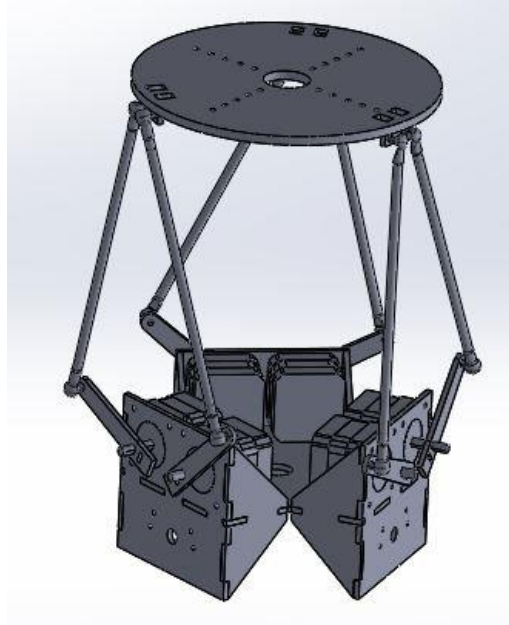
Lineer step motorlar hassas pozisyonlama istediğimiz bir alanda çok iyi bir seçim olmasına rağmen bu çalışmada milimetrik ya da mikrometre mertebesinde hassaslıklar yeterli olacaktır. Bu sebeple lineer step motorların yüksek maliyetine oranlandığında rotasyonel step motorların kullanıldığı bir tasarım hem istenilen hassaslığı sağlayacak hem de düşük maliyetli bir seçim olacaktır.(Çizelge 4.1)

Çizelge 4.1: SPM mekanizmalarında kullanılan eyleyicilerin karşılaştırılması.

	Lineer Step Motor	Rotasyonel Step Motor	Hidrolik Piston
Yük kapasitesi	İyi	Orta	Çok iyi
Hassaslık	Çok iyi	İyi	Orta
Çalışma alanı	İyi	İyi	Çok iyi
Maliyet	Çok yüksek	Düşük	Yüksek
Kinematik anali	Orta	Zor	Orta

4.3.2 Bilgisayar Destekli Model

Tasarım gereklilikleri belirlendikten sonra 3 boyutlu model SolidWorks programında oluşturulmuştur.(Şekil 4.11) Modelde oluşturulan yapı yaklaşık 1500 gram taşıma kapasitesine sahiptir. ± 30 derece yunuslama ve yuvarlanma açıları ± 10 derece sapma açısına müsaade edecek şekilde modellenmiştir. Modelin uzunluğu dinlenme pozisyonunda 190mm, rotasyonel bacakların yatay durumda olduğu merkez pozisyonunda 230mm dir. Tüm ölçüler detaylı olarak EK B’de verilmiştir.

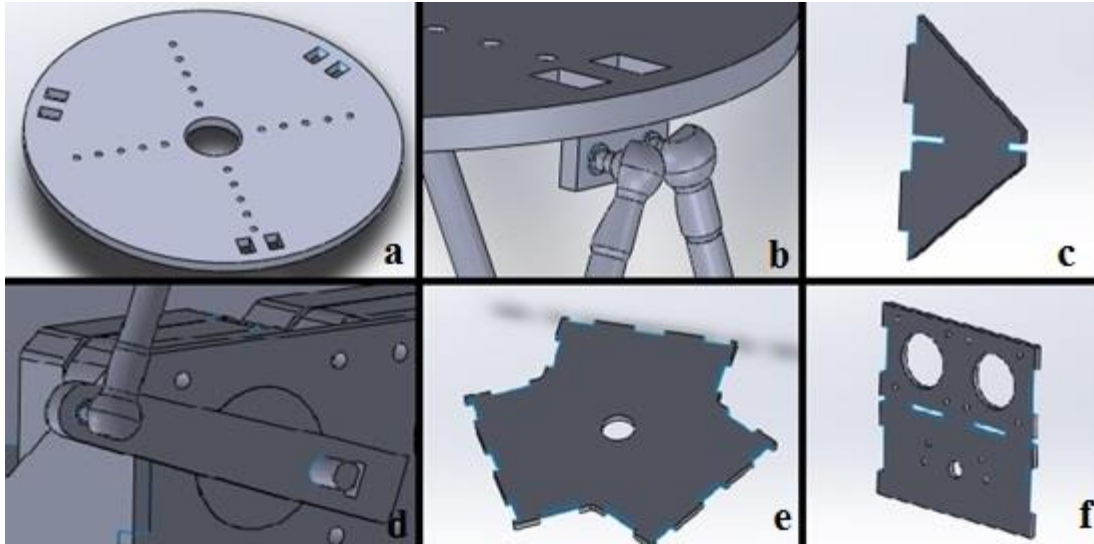


Şekil 4.11: Stewart platformu CAD modeli.

Şekil 4.11’de görülen yapıda eyleyici olarak seçilen step motorlar taban platforma sabitlenmiştir. Rotasyonel harekete izin veren step motorlara bağlanan hareket elemanlarına rotasyonel eklemler, platforma bağlı eklemlere ise platform eklemleri

denmektedir. Rotasyonel eklemler, platform eklemlerine küresel mafsallar yardımıyla bağlanmaktadır. Platform eklemlerinin diğer uçları platforma yine küresel mafsallarla bağlı olduğundan bu çalışmada oluşturulan model RSS-SPM olarak isimlendirilebilir. İsimlendirmede “RSS” ismi ingilizce revoluted(dönel), spherical(küresel) kısaltmalarından gelmektedir.

Şekil 4.12’de görülen platform ve eyleyici destek yapıları seri üretime uygun bir şekilde tasarlanmıştır. Malzeme olarak yüksek korozyon özelliği olan ve kaynağa oldukça elverişli bir malzeme olan X5CrNi18-10 malzemesi seçilmiştir.(Çizelge 4.2) X5CrNi18-10 malzemesi yüksek oranda krom ve nikel elementleri barındıran östenitik paslanmaz çeliktir. Oldukça da sünek bir yapıya sahiptir.



Şekil 4.12:Stewart platformu destek ve bağlantı elemanları.

Step motorlar açık çevrim sistemlerine sahip olduklarından istenilen hareketler yaptırıldıktan sonra son pozisyonlarını belirleyebilmeleri için dış bir geri besleme yapısına ihtiyaç duyarlar. Şekil 4.12f ‘de görülen ve step motorların sabitlenmesi için tasarlanan yapının alt tarafında orta alanda 8mm çapında bir daire ve bu dairenin sağ ve sol taraflarında 2.4mm çaplarında daha küçük boyutta daire şeklinde boşluklar açılmıştır. Açılan bu boşluklara mekanik bir anahtar monte edilecek ve step motorların ana konumu bu anahtarlar sayesinde belirlenecektir. Step motorların rotasyonel hareketi veren gövdelerinin sabit platforma bağlı dayamalardan rotasyonel eklemlerle olan bağlantısı sağlamak amacıyla dayamalara 25’er mm lik daire şeklinde boşluklar açılmıştır. Step motorlar sabit platformlara M3 vidalar yardımıyla monte edilecektir. Bu nedenle Şekil 4.9f de görülen dayama yapısında 25mm lik

boşlukların dört bir yanına 3mm lik vida boşlukları açılmıştır. Bu alanın hemen altında bulunan 21mm x 3mm lik dikdörtgen profil sabit platformun dayamalarla olan montajını yapabilmek için açılmıştır.

Çizelge 4.2: X5CrNi18-10 malzemesinin yüzde alaşım değerleri

C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	N
0.07	1	2	8-10.5	0.045	0.015	17.5-19.5	0.11

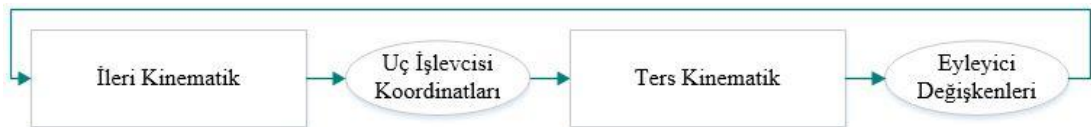
Yapılan tasarım ile birlikte robotun özelliklerinin aşağıdaki gibi olması planlanmaktadır:

- 1500 g taşıma kuvveti
- 1650 g ağırlık
- ± 40 mm iniş-kalkış mesafesi
- $\pm 30^\circ$ yunuslama ve yuvarlanma açısı
- $\pm 10^\circ$ sapma açısı
- 230mm maksimum yükseklik

Robotun ilk planda taşınması beklenen ağırlık 150-300 gram aralığında ve beklenen döndürme açıları 15° - 25° aralığında olduğundan üretilecek olan robot tekil konfigürasyon noktalarına toleranslı olarak tasarlanmıştır.

4.4 Kinematik

Kinematik kelime anlamı olarak hareket etüdünü ifade eder. Genel anlamda mekanik biliminde kinematik bir noktanın, objenin ya da bir sistemin hareketini, bu hareketin etkenlerini düşünmeden ifade eden tanımlamalar bütünüdür.(Şekil 4.13)



Şekil 4.13: İleri ve ters kinematik dönüşüm diyagramı.

İleri kinematik ve ters kinematik bir mekanizmanın hareketini iki farklı doğrultuda tanımlamakta kullanılır. İleri kinematikte oluşturulan modelin çözümü mekanizmanın sahip olduğu eyleyicilerin konum değişkenlerini uç işlevcisinin sahip olduğu konum değişkenlerine dönüştürür. Ters kinematikte oluşturulan modelin çözümü ise mekanizmanın uç işlevcisinin konum değişkenlerini mekanizmanın sahip olduğu eyleyicilerin konum değişkenlerine dönüştürmekte kullanılır. Robotik manipülatörlerde uç işlevcisinin pozisyonunu kontrol etmek için gerekli eyleyici konumları bu şekilde bulunur. Bu nedenle ters kinematik robotik manipülatörlerin kontrolünde kullanılmaktadır. İleri kinematikte ise robotun belirtilen eyleyici konumlarında sahip olduğu uç işlevcisi konumu belirlenir. Bu nedenle ileri kinematik analizler genellikle robotik manipülatörlerin çalışma alanlarının belirlenmesinde kullanılan denklemlerdir.

4.4.1 Stewart Platformunun Serbestlik Derecesi

Stewart platformu 6 eyleyici tarafından kontrol edilen 6 serbestlik derecesine sahip bir paralel robottur. Stewart platformu mekanizmasında eyleyicilerle montajlanan eklemler mafsallar ve platform istenilen hareketi verecek serbestlik derecesine sahip olmalıdır.

Düzlemsel ve uzaysal tüm mekanizmalar için serbestlik derecesi denklem 4.2 ile bulunabilir[15].

$$N = \lambda(l - j - 1) + \sum_{i=1} f_i - I_d \quad (4.2)$$

Denklem 4.2’de N mekanizmanın sahip olduğu efektif serbestlik derecesini, λ mekanizmanın iş yaptığı ortamdaki serbestlik derecesini, l mekanizmanın sahip olduğu eklem sayısını, j mekanizmanın sahip olduğu mafsal sayısını, f_i mafsalların sahip olduğu toplam DOF sayısını, I_d ise mekanizmanın sahip olduğu pasif serbestlik derecesi sayısını belirtir.

Pasif serbestlik derecesi robota eyleyici hareketini veren serbestlik derecesi sayısıdır. Bu çalışmada tasarlanan SPM mekanizmasında eyleyici olarak kullanılan step

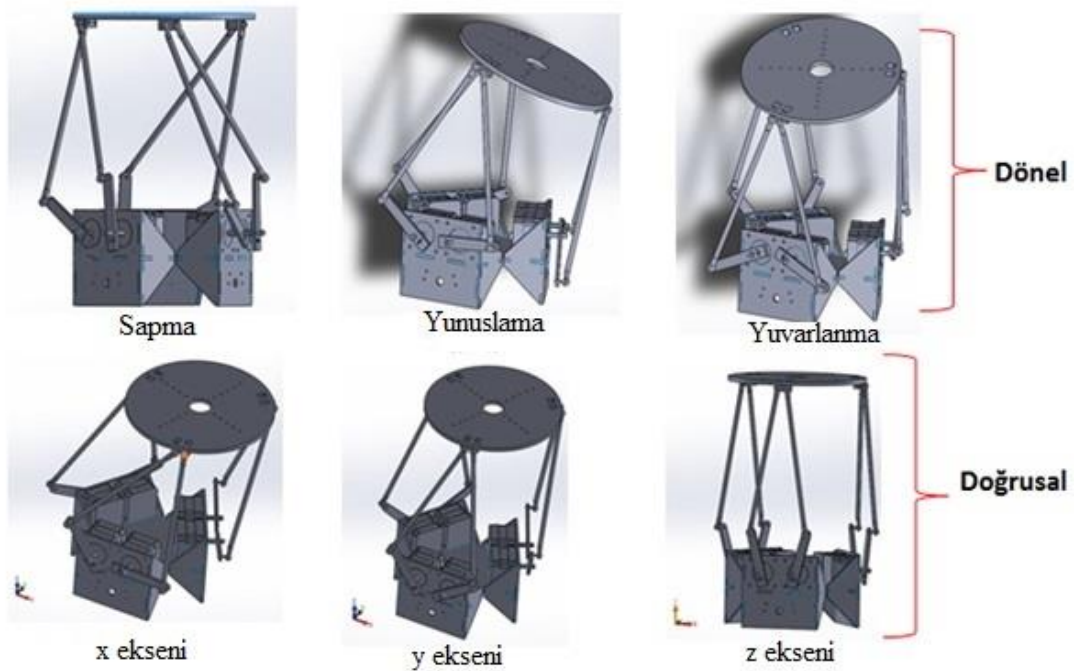
motorlar dönel hareket verdiği için bir serbestlik dereceleri vardır. Toplam 6 adet eyleyici olduğundan pasif serbestlik derecesi sayısı “6” olur.

Tasarlanan RSS-SPM mekanizmasında 12 adet küresel mafsall ve 6 adet dönel mafsall kullanılmaktadır. Mekanizmada bir sabit platform, sabit platforma bağlı, dönel mafsalların hareket verdiği 6 adet eklem ve bu eklemlere bağlı 6 adet platform ve bir de hareketli platform bulunmaktadır.

Dolayısıyla mekanizmanın sahip olduğu toplam eklem sayısı 14 tür. Mekanizmanın sahip olduğu her küresel mafsall 3 serbestlik derecesine ve her dönel mafsalda birer serbestlik derecesine sahip olduğundan mafsalların toplam serbestlik derecesi 42 dir. Böylece robotun serbestlik derecesi 4.3’de belirtildiği gibi bulunur.

$$N = 6(14 - 18 - 1) + (6 + 3 \times 12) - 6 = 6 \quad (4.3)$$

4.3’te bulunan 6 serbestlik derecesi mekanizmanın platformunun hareket serbesiyetini ifade eder. Stewart platformunun 6 serbestlik derecesi x, y, z eksenlerinde öteleme ve sırasıyla bu eksenlerin etrafında ϕ , θ , ψ açılarıyla yapılan dönme hareketleridir. Şekil 4.14 bu çalışmada kullanılan SPM mekanizmasının tüm serbestlik derecelerini göstermektedir.



Şekil 4.14: Tasarlanan SPM mekanizmasının hareketleri.

Tasarlanan SPM mekanizmasının x, y ve z eksenlerinin her birinde toplam 80mm aralıkta öteleme hareketi yapabilme kabiliyeti vardır. X ekseninin etrafında ϕ açısıyla yuvarlanma hareketini her iki yöne toplamda 60 derece aralığında, y ekseninin etrafında θ açısıyla yunuslama hareketini toplam 60 derece aralığında, z ekseninin etrafında ψ açısıyla sapma hareketini ise 20 derece aralığında yapabilmektedir.

Bu serbestlik dereceleri ve mafsallardan kaynaklanan hareket limitleriyle tasarlanan SPM mekanizması, üzerine konulan iş parçasını yukarıda belirtilen aralıklar dahilinde x ve y eksenlerinde gerekli ölçüm açısına pozisyonlayarak bir profilometrenin altında çalışır vaziyette kullanılabilir. Yine x ve y eksenlerinde öteleme hareketi yaparak sabit bir ölçüm ucu altında ölçüm işleminin yapılabilmesini sağlayabilir. Genel bir mekanik profilometre cihazı yalnızca tek eksende hareket yaptığından diğer eksenlerde ölçüm yapmak için iş parçasının pozisyonunun ve ölçüm tablasına montajının değiştirilmesi gerekmektedir. Sahip olduğu serbestlik derecesiyle SPM mekanizması parçanın demonte ve tekrar monte işlmine gerek kalmadan hem x hem de y eksenlerinde ölçümünün yapılabilmesine imkan sağlar.

4.4.2 Ters Kinematik

SPM mekanizmasının sahip olduğu x, y, z öteleme ve ϕ , θ , ψ dönme hareketlerinin değerleri platformun o an sahip olduğu konumu tanımlar. Ters kinematik hesaplamalar sonucu elde edilen denklemlerde bu değişkenler bilinen ve gerçekleşmesi istenen değerlerdir. Ters kinematik denklemi bu değerlere bağlı olarak α_i ($i=1..6$) ile ifade edilen eyleyici konumlarını belirlemek için kullanılır. Genel olarak paralel manipülatörlerin ters kinematik hesaplamaları analitik çözüm yöntemleriyle bulunabilir.

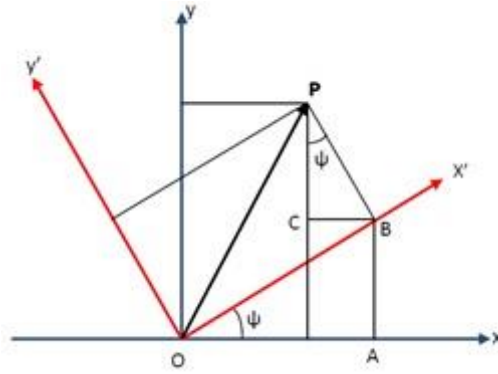
Genel Stewart platformu 2 rijit eksen takımını bağlayan 6 uzuvdan oluşur. Bu çalışmada dönel eyleyicilere seri bağlı 2 uzuvdan oluşan bir yapı oluşturulduğundan genel Stewart platformlarındaki 6 uzuv bu 2 uzvun vektörel olarak bileşkesini ifade eden hayali uzuvları ifade eder. Alttaki eksene bağlı olan model referans eksen takımı olarak geçer ve x,y,z eksen takımı ile tanımlanır. Üstteki eksen takımına bağlı olana platform ekseni denir ve ortogonal x',y' ve z' eksen takımına sahiptir.

Platform referans takımı eksenine göre 6 serbestlik derecesine sahiptir. Platformun orjin bölgesi her eksen için 1 adet olmak üzere toplam 3 adet lineer yer değiştirmeyle tanımlanır.

Yine 3 adet açısal yer değiştirme platformun referans takımı eksenine göre oryantasyonunu tanımlar. Bu açılara Euler açıları denir. (Şekil 4.15)

- z- eksen takımı etrafında dönme ψ (sapma)
- y-eksen takımı etrafında dönme θ (yunuslama)
- x-eksen takımı etrafında dönme ϕ (yuvarlanma)

Eğer z-ekseni etrafında dönmeyi ifade edersek ψ (sapma):



Şekil 4.15: Sapma(ψ) açısında platformun referan eksenine göre dönme hareketi.

$$P = i'x' + j'y' + k'z' = ix + jy + kz \quad (4.4)$$

$$x = |OA| - |BC| = x' \cos \psi - y' \sin \psi \quad (4.5)$$

$$y = |AB| + |PC| = x' \sin \psi + y' \cos \psi \quad (4.6)$$

$$z = z' \quad (4.7)$$

Bu denklem ifadeleri kullanılarak P vektörünün öklit uzayında z eksenini etrafındaki dönme hareketi rotasyon matrisi ile denklem 4.8'deki gibi tanımlanır.

Aynı şekilde y ve x eksenini etrafında dönüşleri de tanımlarsak:

$$R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

$$R_x(\varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

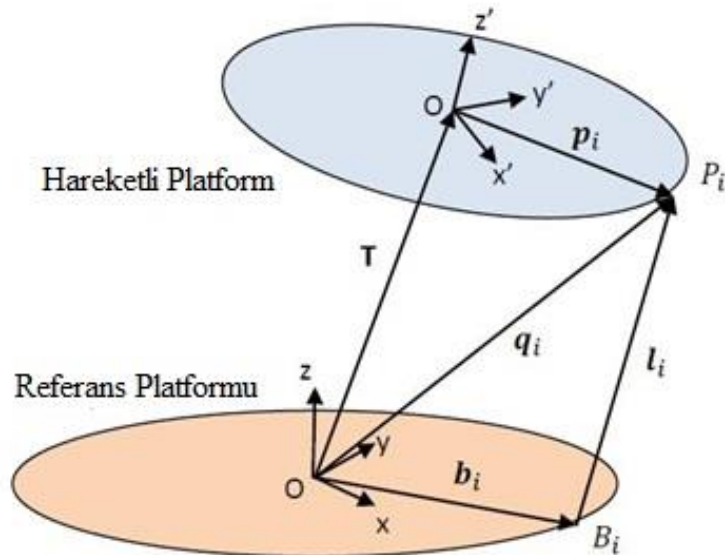
olarak ifade edilir.

Denklem 4.8, 4.9 ve 4.10'u kullanarak genel rotasyon matrisi denklem 4.11'deki gibi ifade edilir.

$${}^P R_B = R_z(\psi) R_y(\theta) R_x(\varphi) \quad (4.11)$$

$${}^P R_B = \begin{pmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\varphi + \cos\psi\sin\theta\sin\varphi & \sin\psi\sin\varphi + \cos\psi\sin\theta\cos\varphi \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\varphi + \sin\psi\sin\theta\sin\varphi & -\cos\psi\sin\varphi + \sin\psi\sin\theta\cos\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{pmatrix}$$

Şimdi Stewart platformunun her bir uzvunun boyunu referans ve platform eksenlerine bağlantısını şekil 4.16'daki gibi vektörel olarak tanımlayalım;



Şekil 4.16: SPM mekanizmasının vektörel gösterimi.

Şekil 4.16' da referans platformu(sabit platform) ve hareketli platformun merkez noktalarının konumları vektörel olarak ifade edilmiştir. Bu vektörel ifadeyi kullanarak hareketli platformun merkez noktasındaki konum değişimlerini referans platformuna göre belirtmek mümkündür. Şekil 4.16'ya göre q_i vektörü denklem 4.12'deki gibi ifade edilir.

$$q_i = T + {}^P R_B p_i \quad (4.12)$$

Burada T , x, y ve z eksenleri boyunca lineer değişimi veren vektördür. p_i değeri ve b_i değerleri sabit değerler olup sırasıyla uzvun hareketli platform ve referans platformu ile bağlı olduğu noktaların koordinatlarıdır. Bu bilgiye dayanarak uzuvların uzunluğu rotasyonel ve lineer değişimlere bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$l_i = T + {}^P R_B p_i - b_i \quad (4.13)$$

Denklem 4.13'de hesaplanan l_i değeri genel SPM mekanizmalarında lineer eyleyicilere bağlı her bir eklem boyunu verir. Bu çalışmada kullanılan dönel Stewart platformunda l_i değeri rotasyonel eklemler ile bu eklemlere bağlı platform eklemlerinin vektörel bileşkesine karşılık gelir ve yapısal olarak mevcut değildir.

Genel Stewart platformu mekanizmasında lineer eyleyiciler doğrudan denklem 4.13'de bulunan l_i bacak boylarını değiştirebildiğinden buraya kadar yapılan hesaplamalar kontrol algoritmasının geliştirilmesi için yeterlidir. Bu çalışmada kullanılan dönel SPM mekanizmasında ise l_i hayali eklem boyu uzunluğu, a vektörü ile ifade edilen rotasyonel eklemler ile, uzunluğu s vektörü ile ifade edilen platform eklemlerinin vektörel bileşkesine eşit olduğundan ek hesaplamalar gerektirir.

Bu çalışmada kullanılan dönel RSS-SPM mekanizmasında a vektörü ile s vektörünün bileşkesi olan l_i vektörünün değeri sistemde eyleyici olarak kullanılan step motorların α_i ile belirtilen açısal değişimlerine bağlıdır.

Şekil 4.17 α_i açı değerleriyle l_i vektörünün ilişkisini gösteren vektörel ifadedir. Burada P_i noktası platform eklemının platform ile bağlantı noktasını gösterir. A_i noktası platform eklemi ile rotasyonel eklemın bağlantı noktasıdır. B_i noktası ise motorun dönme ekseninin rotasyonel eklem ile bağlantı noktasını ifade eder.

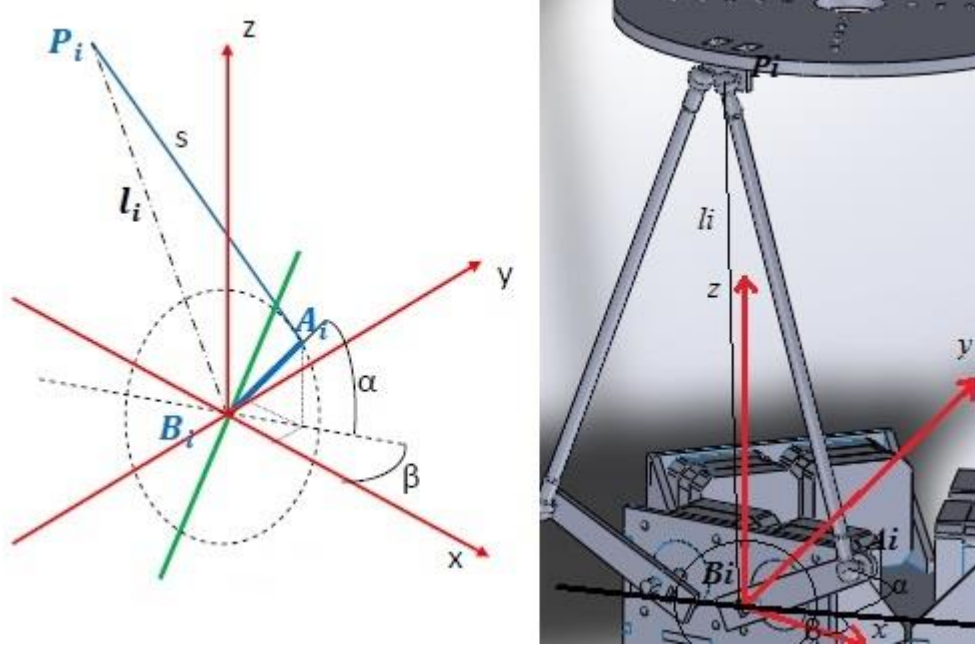
A_i , B_i ve P_i noktaların koordinatlarını belirten matrisleri sırasıyla:

$$a_i = [x_a \quad y_a \quad z_a],$$

$$b_i = [x_b \quad y_b \quad z_b],$$

$$p_i = [x_p \quad y_p \quad z_p]$$

$q_i = [x_q \quad y_q \quad z_q]$ olarak ifade edelim. Burada P_i noktasının hem hareketli hem sabit platforma göre koordinatlarının sırasıyla p_i ve q_i olarak ifade edilmiştir.



Şekil 4.17: l_i vektörünün vektörel gösterimi.

α' ya motorun dönme eksenini etrafında yaptığı açı ve β' ya rotasyonel eksenin x eksenini ile yaptığı açı diyelim. Buradan;

$$x_a = a \cos \alpha \cos \beta + x_b \quad (4.14)$$

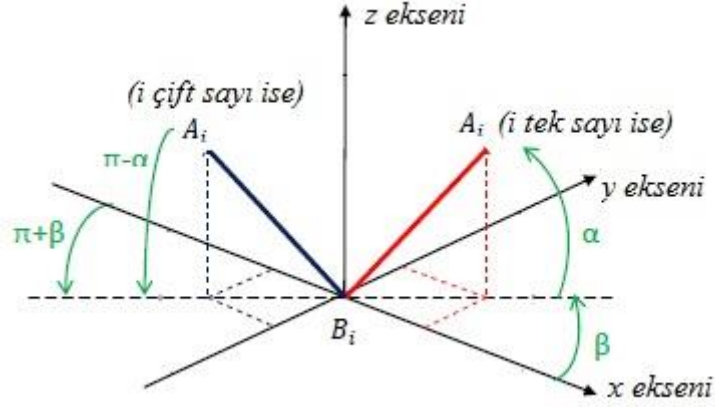
$$y_a = a \cos \alpha \sin \beta + y_b \quad (4.15)$$

$$z_a = a \sin \alpha + z_b \quad (4.16)$$

olarak bulunur.

Yukarıda bulunan ifadeler i değerinin tek sayı olduğu rotasyonel eklem konumları için geçerlidir. i değerinin çift sayı olduğu eklemler i değerinin tek sayı olduğu

eklemlerin yansımaları konumlarındadır. Dolayısıyla i değerinin çift sayı olduğu eklemler için x_a , y_a , ve z_a , değerleri şekil 4.18 deki değerleri kullanarak:



Şekil 4.18: Tek ve çift sayılı rotasyonel eklemler için A noktaları.

$$x_a = a \cos(\pi - \alpha) \cos(\pi + \beta) + x_b \quad (4.17)$$

$$y_a = a \cos(\pi - \alpha) \sin(\pi + \beta) + y_b \quad (4.18)$$

$$z_a = a \sin(\pi - \alpha) + z_b \quad (4.19)$$

olarak bulunur.

Denklem 4.17, 4.18 ve 4.19 için trigonometrik değişimlerden yararlanırsak:

$$\sin(\pi - \alpha) = \sin \alpha, \cos(\pi - \alpha) = -\cos \alpha,$$

$$\sin(\pi + \beta) = -\sin \beta, \cos(\pi + \beta) = -\cos \beta$$

ifadeleri bulunur. Bulunan bu ifadeler denklem 4.17, 4.18 ve 4.19 de yerlerine konulursa i sayısının çift olduğu rotasyonel eklemlerde de ifadelerin denklem 4.14, 4.15 ve 4.16 daki ifadelerle aynı olduğu görülmektedir.

Şekil 4.17’de belirtilen a , s ve l vektörlerini bulmak için sırasıyla A_i ve B_i , P_i ve A_i son olarak P_i ve B_i arasında pisagor teoremi uygulanırsa:

$$a^2 = (x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2$$

$$a^2 = (x_a^2 + y_a^2 + z_a^2) + (x_b^2 + y_b^2 + z_b^2) - 2(x_a x_b + y_a y_b + z_a z_b) \quad (4.20)$$

$$s^2 = (x_q - x_a)^2 + (y_q - y_a)^2 + (z_q - z_a)^2$$

$$s^2 = (x_q^2 + y_q^2 + z_q^2) + (x_a^2 + y_a^2 + z_a^2) - 2(x_q x_a + y_q y_a + z_q z_a) \quad (4.21)$$

$$l^2 = (x_q - x_b)^2 + (y_q - y_b)^2 + (z_q - z_b)^2$$

$$l^2 = (x_q^2 + y_q^2 + z_q^2) + (x_b^2 + y_b^2 + z_b^2) - 2(x_q x_b + y_q y_b + z_q z_b) \quad (4.22)$$

denklemleri bulunur. Gerekli düzenlemeler yapıp denklem 4.20, 4.21 ve 4.22 birlikte çözülürse:

$$s^2 = l^2 - (x_b^2 + y_b^2 + z_b^2) + 2(x_q x_b + y_q y_b + z_q z_b) + a^2 - (x_b^2 + y_b^2 + z_b^2) + 2(x_a x_b + y_a y_b + z_a z_b) - 2(x_q x_a + y_q y_a + z_q z_a)$$

ve bulunan ifade düzenlenirse:

$$l^2 - (s^2 - a^2) = 2(x_b^2 + y_b^2 + z_b^2) + 2(x_a(x_q - x_b) + 2y_a(y_q - y_b) + 2z_a(z_q - z_b)) - 2(x_q x_b + y_q y_b + z_q z_b) \quad (4.23)$$

olarak bulunur.

Denlem 4.14, 4.15 ve 4.16'da bulunan değerler denklem 4.23'de yerine konulursa:

$$l^2 - (s^2 - a^2) = 2(x_b^2 + y_b^2 + z_b^2) + 2(acos\alpha cos\beta + x_b)(x_q - x_b) + 2(acos\alpha cos\beta + y_b)(y_q - y_b) + 2(asin\alpha + z_b)(z_q - z_b) - 2(x_q x_b + y_q y_b + z_q z_b)$$

Gerekli düzenlemeler yapılrırsa:

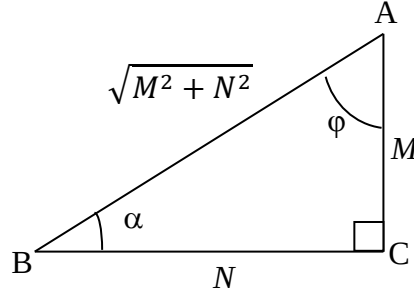
$$l^2 - (s^2 - a^2) = 2asin\alpha(z_q - z_b) + 2acos\alpha cos\beta(x_q - x_b) + 2acos\alpha sin\beta(y_q - y_b)$$

$$l^2 - (s^2 - a^2) = 2asin\alpha(z_q - z_b) + 2acos\alpha[cos\beta(x_q - x_b) + sin\beta(y_q - y_b)] \quad (4.24)$$

olarak bulunur.

Trigonometrik dönüşümleri kullanarak α açısını bulmak için denklem 4.24'ü aşağıdaki forma benzetebiliriz.

$$K = M \sin \alpha + N \cos \alpha$$



Şekil 4.19 :Denklem 4.24'ün benzetildiği formun geometrik gösterimi.

Şekil 4.19'a göre

K ifadesi

$$K = \sqrt{M^2 + N^2} \sin(\alpha + \varphi)$$

olarak yazılabilir.

φ ifadesi de

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{N}{M}$$

olarak yazılırsa:

$$\sin(\alpha + \varphi) = \frac{K}{\sqrt{M^2 + N^2}}$$

ve

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{K}{\sqrt{M^2 + N^2}} - \tan^{-1} \frac{N}{M} \quad (4.25)$$

olarak bulunur.

Denklem 4.25'de K, M ve N ifadeleri

$$K = l^2 - (s^2 - a^2)$$

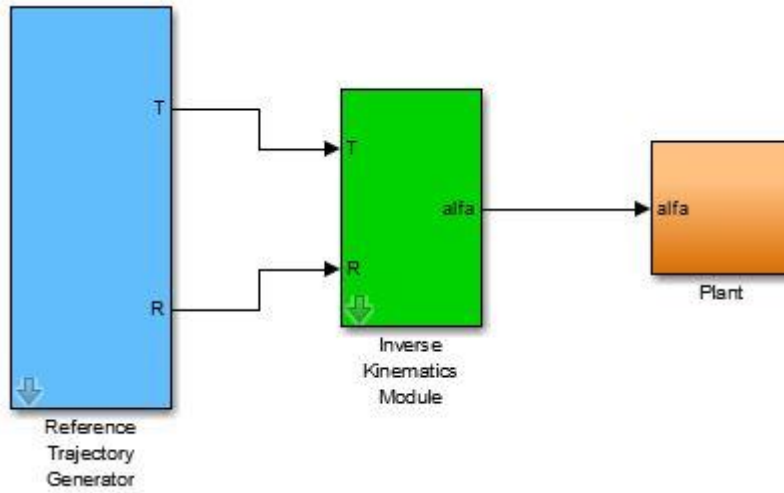
$$M = 2a(z_q - z_b)$$

$$N = 2a[\cos\beta(x_q - x_b) + \sin\beta(y_q - y_b)]$$

dir. Bu bölümdeki denklemlerde kullanılan sabit değerler robot parametreleri olarak geçmektedir. Bu parametrelerin değerleri ve denklemlerin kullanılarak hareketli platformun konum değerlerinin eyleyici konumlarına dönüştürüldüğü bir örnek EK C’de verilmiştir.

4.5 Modelleme

Tasarım işleminin ardından üretim öncesi sistemin beklenen hareketlerdeki davranışının incelenmesi ve ters kinematic denklemlerin doğruluğunun görülmesi için Simulink programında sistem modellenmiştir. Modellenen sistem 3 ana başlıktan oluşurulmaktadır. Şekil 4.20 de görülen modellenen sistemin ana bloğudur.



Şekil 4.20: Modelin ana blok şeması.

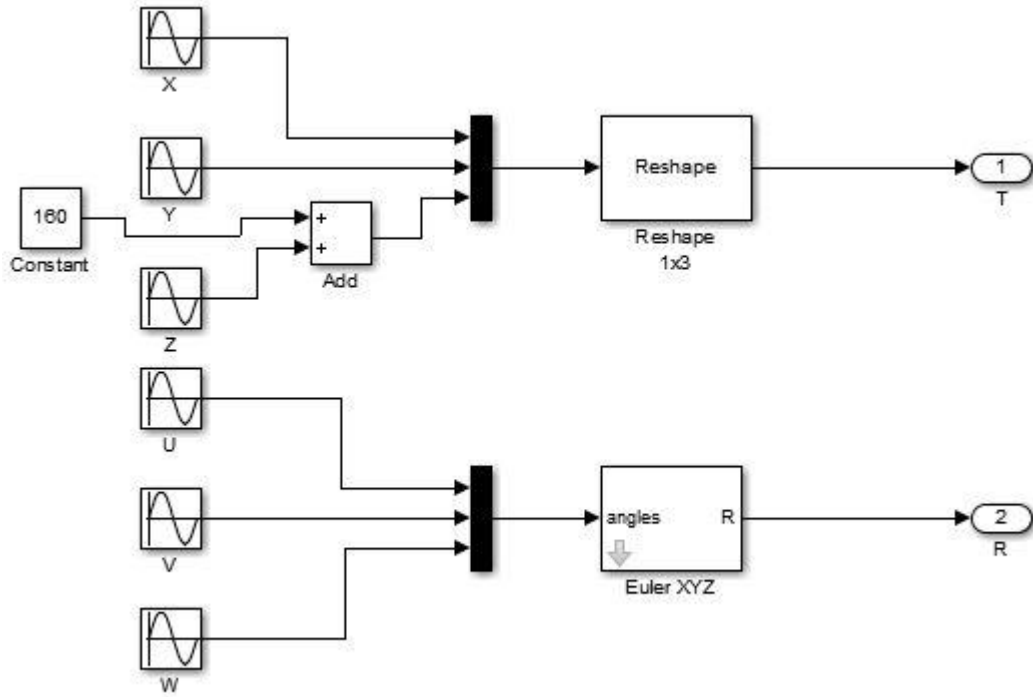
Reference Trajectory Generator bloğu platformun o anda sahip olmasını istediğimiz euler açılarını ve x, y, z eksenlerindeki lineer yer değişimini oluşturan bloktur. Inverse Kinematics Module bloğu ise Reference Trajectory Generator bloğundan aldığı hareketli platformun konum bilgilerini eyleyicilerin konum bilgilerine dönüştürmeye yarayan blokları içerir. Plant bloğunda sistemin mekanik modellenmesi yapılmıştır ve Inverse Kinematic Module tarafından gönderilen eyleyici konum bilgileri burada işlenerek sistem yapılması istenen hareketi simüle

eder. Plant bloğunda çıktı olarak alınmasını istediğimiz hız, konum, ivme ve kuvvet gibi bilgilerin gözlemlenmesi yapılarak mekanizmanın davranışı hakkında bilgi sahibi olunmaya çalışılmaktadır.

4.5.1 Reference Trajectory Generator Blok Şeması

Reference Trajectory Generator bloğunda denklem 4.13’de belirtilen ve SPM’nin hareketli platformunun lineer ve rotasyonel hareketini belirten sırasıyla T ve ${}^P R_B$ matrisleri hesaplanır.

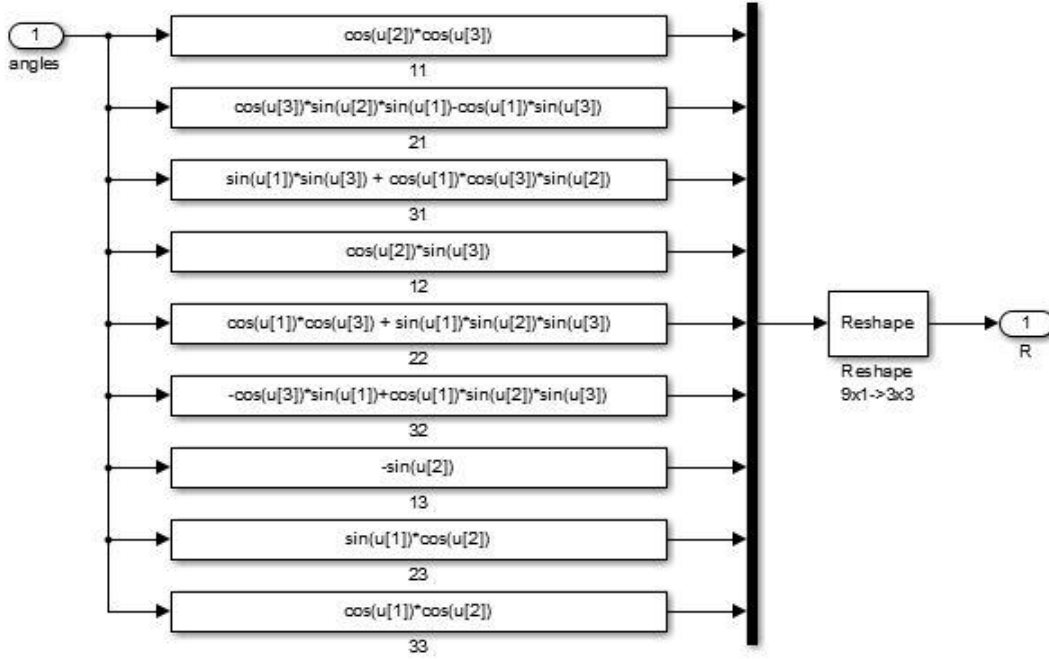
Şekil 4.21’de ilk sırada oluşturulan T matrisi 3×1 lik bir matristir ve hareketli platformun merkezinin sabit platformun merkezine göre x, y ve z eksenlerindeki lineer değişimlerini tanımlar.



Şekil 4.21: Referans Trajectory Generator blok şeması.

SPM mekanizmasının ana konumunda(başlangıç konumu) sabit ve hareketli platformun merkez noktalarının koordinatlarının x ve y eksenlerindeki değerleri çakışıktır ancak z ekseninde hareketli platform sabit platformdan daha yukarıda olduğundan bu mesafe farkı ölçülerek bir başlangıç değeri olarak istenilen değere eklenmelidir. Şekil 4.21’de belirtilen constant(sabit) bu mesafeyi ifade eder.

İkinci sırada oluşturulan matris ise 3×3 lük genel rotasyon matrisidir. Şekil 4.22’de denklem 4.11’de hesaplanan genel rotasyon matrisinin simulinkte hesaplanması görülmektedir. Burada satırlarda görülen $u[1]$, $u[2]$ ve $u[3]$ simgeleri ϕ , θ ve ψ açılarını temsil etmektedir.

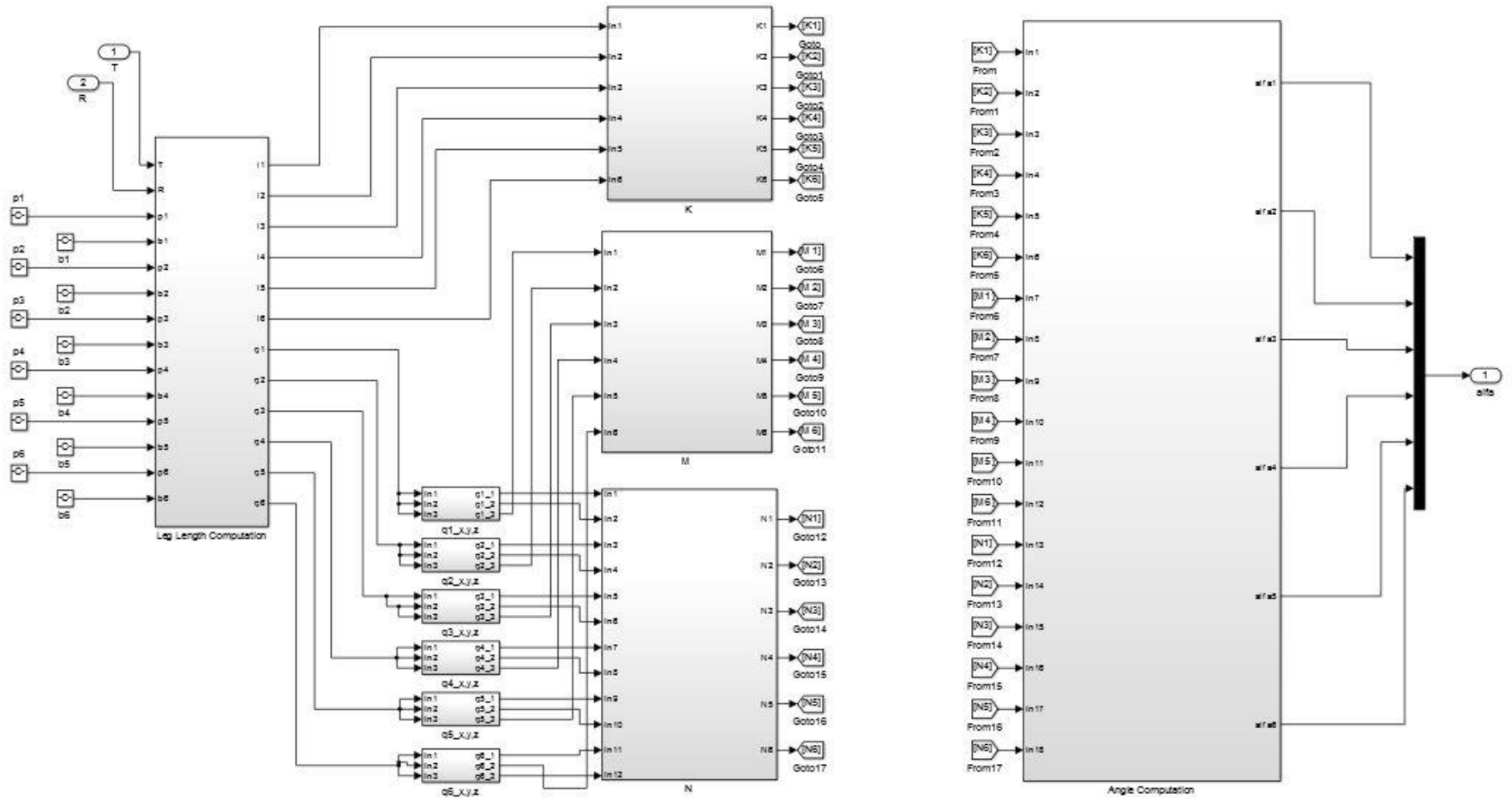


Şekil 4.22:Rotasyon matrisinin hesaplanması.

4.5.2 Inverse Kinematic Module Blok Şeması

Bu şema Reference Trajectory Generator blok şemasından alınan T ve ${}^P R_B$ değişkenlerini kullanarak α_i eyleyici konumlarını bulmakta kullanılır. Daha sonra bulunan α_i değerleri sistemin mekaniksel modelinin oluşturulduğu Plant blok şemasına gönderilecek ve kinematik hesaplamaların doğrulaması yapılacaktır.

Inverse Kinematics Module blok şeması şekil 4.23’de görüldüğü gibi her bir hayali bacak boyunun(l_i) hesaplandığı leg length computation, sabit platformun merkezinden hareketli platformun eklem bağlantı noktalarına olan vektörlerin hesaplandığı q blokları ve Şekil 4.19’da belirtilen formun değişkenleri olan K, M ve N değerlerinin hesaplandığı bloklar ile bu değerleri kullanarak denklem 4.25’i simüle eden angle computation bloğundan oluşmaktadır. Şekil 4.23’de gösterilen Inverse Kinematics Module blok şemasının içeriğindeki blokların ayrıntıları EK D’de gösterilmektedir.

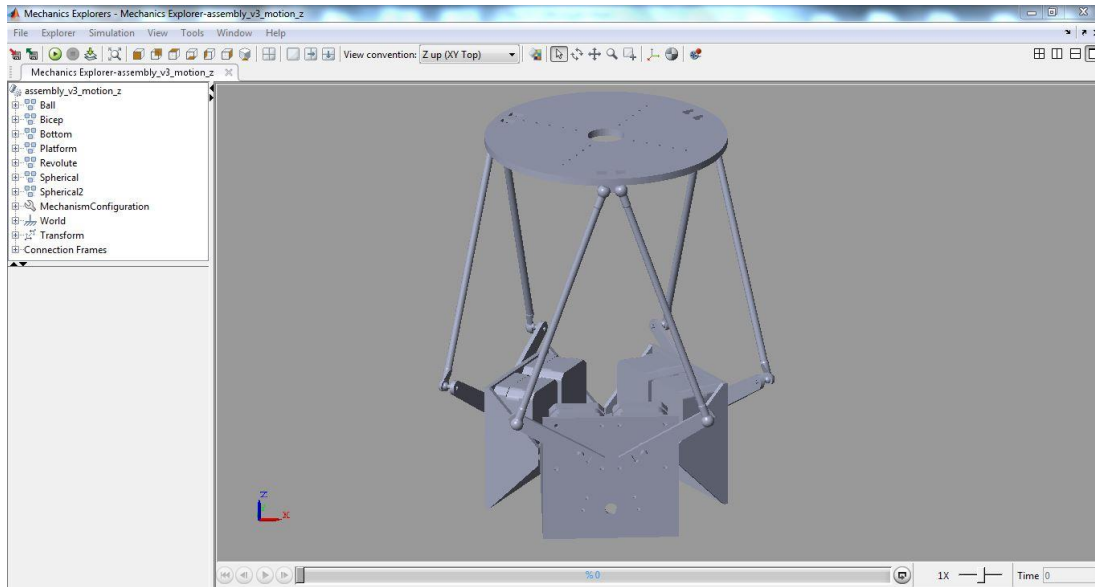


Şekil 4.23: Inverse Kinematic Module blok şeması.

4.5.3 Plant Blok Şeması

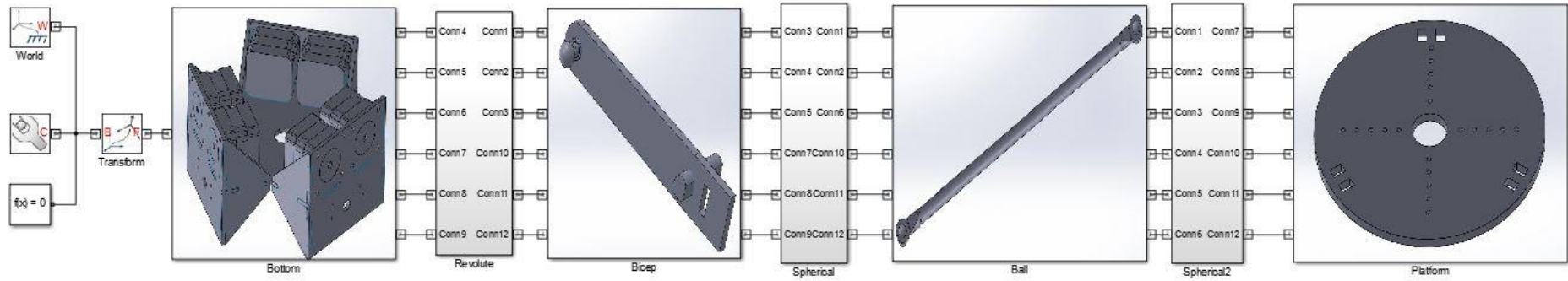
Plant blok şeması RSS-SPM nin katı modellemesinin yapıldığı blokları kapsayan bir şemadır. Katı model temel olarak, sabit platform, rotasyonel eklemler, platform eklemleri ve hareketli platform olmak üzere 4 bölüme ayrılarak ayrı blok şemaları elde edilmiş ve bu bloklar sırasıyla dönel, küresel ve küresel mafsallardan oluşan 3 ayrı blok şemasıyla birbirine bağlanarak geliştirilmiştir.

Tasarlanan SPM'in oluşturulan Plant modelden sonra simulink-simmechanics programındaki görüntüsü şekil 4.24'de verilmiştir. Plant modelde kullanılan küresel ve dönel mafsallara hareket limitleri Simscape-simmechanics iletişim avantajları kullanılarak rotational Simscape hard-stop bloğu kullanılarak verilmiştir.



Şekil 4.24: Tasarlanan SPM'in simulink mechanic explorer görüntüsü.

Şekil 4.25'de gösterilen Plant bloğu sabit platformun ve bu platformun üzerine montajlanan eyleyicilerin katı modellerinin bulunduğu bottom, dönel mafsalların bulunduğu revolute, rotasyonel eklemlerin bulunduğu bicep, küresel mafsalların bulunduğu spherical, platform eklemlerinin bulunduğu ball ve platform katı modelinin bulunduğu platform bloklarından meydana gelmiştir.

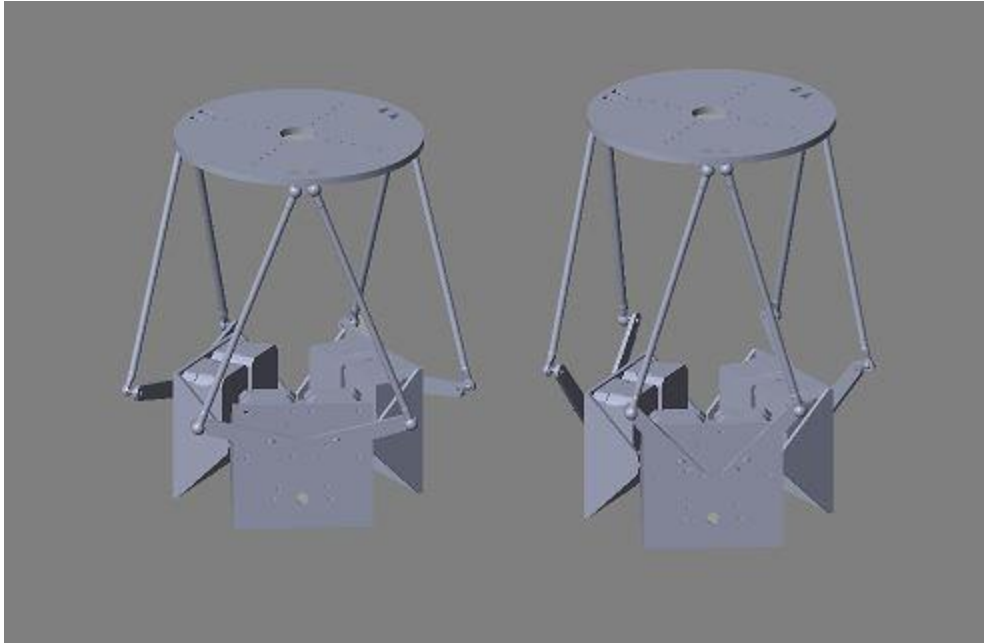


Şekil 4.25: Stewart platformu simmechanics katı modeli.

4.5.4 Simulasyon Sonuçları

Bir önceki bölümde hesaplanan ters kinematik denklemlerin kontrol algoritması geliştirilmeden önce doğruluğunun ispatlanması ve bu kontrol sisteminin yeterliliğinin görülmesi, yapılan 3 boyutlu tasarım üzerine oluşturulan simulink modelinin çalıştırılmasıyla gözlenmiştir.

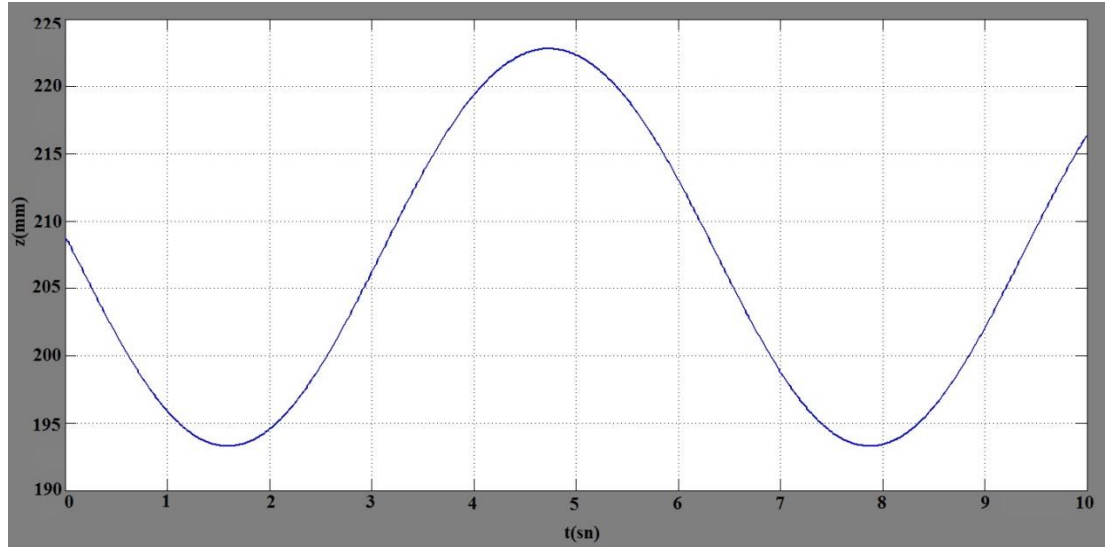
Şekil 4.26'da simulink mechanic explorer'da önceki bölümde hesaplanan ters kinematik algoritmaları kullanarak hareket ettirilen platform görülmektedir. Şekildeki simülasyonda robotun hareketli platformu bulunduğu konumdan 15mm $-z$ yönünde daha sonra 15mm $+z$ yönünde hareket ettirilmesi istenmiştir. Bunun için 6 serbestlik derecelerinden x , y eksenlerindeki hareketler 0 olarak seçilmiş ve yine ϕ , θ ve ψ açıları da 0 olarak seçilmiştir. Bu durumda bölüm 4.4.2 deki ters kinematik hesaplamalar doğru bir şekilde yapılmış ise robot yalnızca z eksenini boyunca hareketini yapmalı ve tüm eyleyicilerin aynı yönlere aynı açılarda senkronize bir şekilde çalışmalıdır.



Şekil 4.26: z eksenini boyunca hareketi gösteren simulasyon.

Şekil 4.26'da soldaki robot platformun z ekseninde -15mm hareket ettiği pozisyonları sağdaki robot ise eyleyicilerin +15mm hareket ettiği pozisyonları göstermektedir.

İstenen hareket sonrası platformun z eksenini boyunca hareketi şekil 4.27 deki gibi olmuştur.

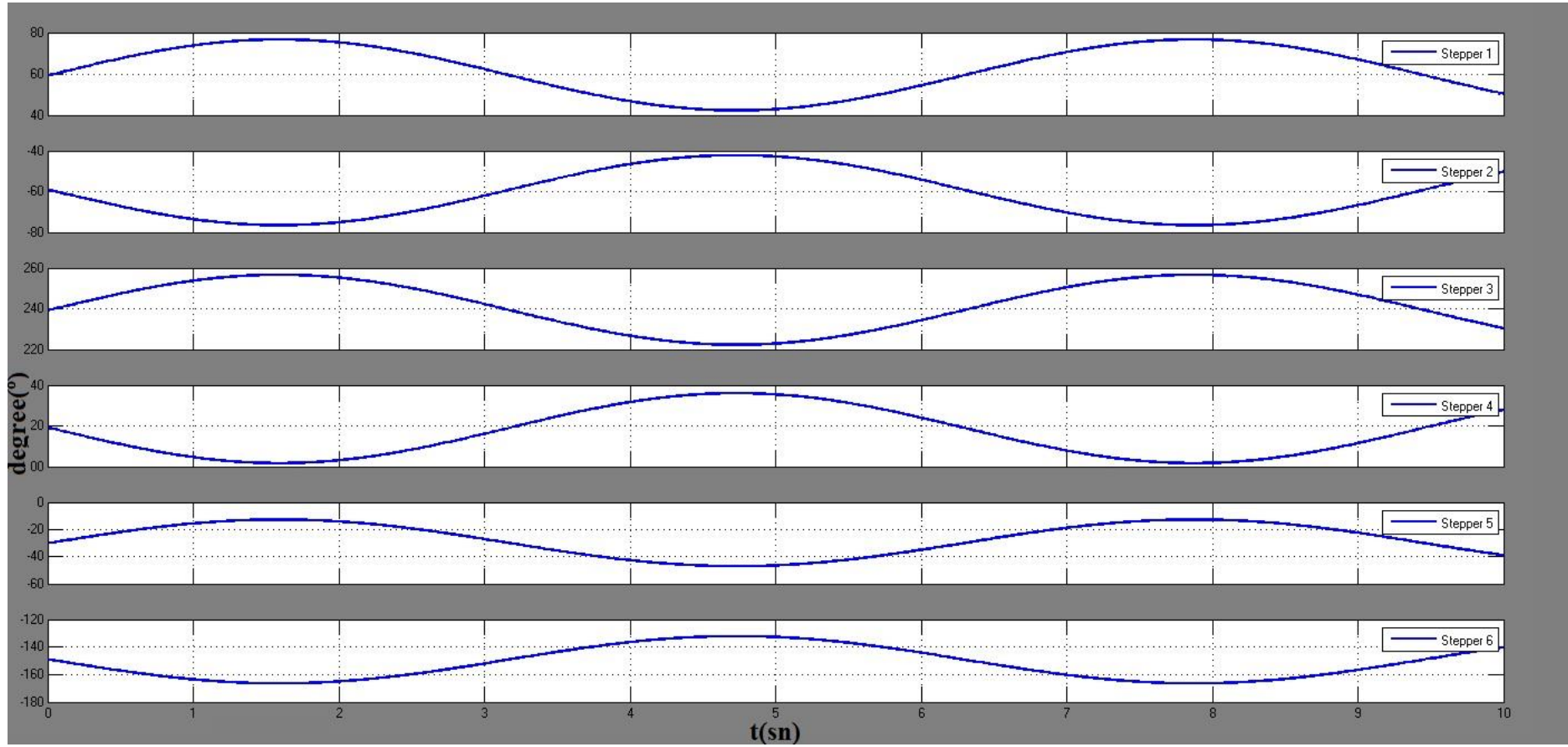


Şekil 4.27: Platformun z ekseninde hareketi.

Simulasyondan önce robotun hareketli platformunun referans kabul edilen sabit platforma göre z ekseninde yüksekliği 208mm idi. Şekil 4.27’de görülen hareket esnasında robotun yan yana konumlandırılmış her bir eyleyicisi birbirlerine ters yönde ancak aynı değerde aynı anda hareket etmişlerdir. Şekil 4.28 hareketli platformun z eksenindeki hareketi esnasında robotun sahip olduğu her bir eyleyicinin hareketini göstermektedir.

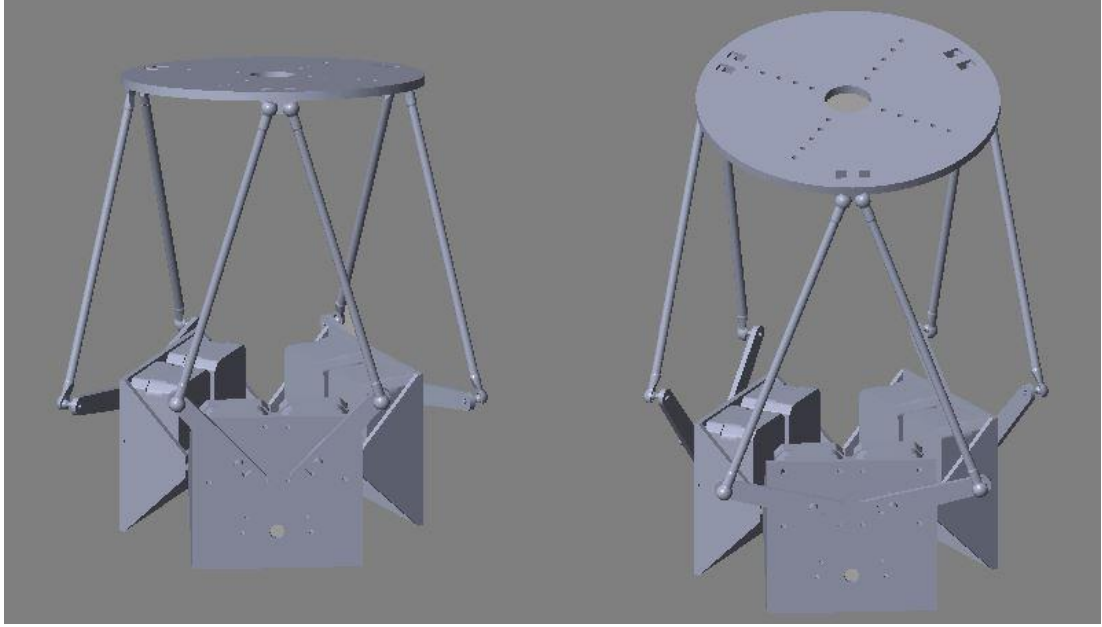
Eyleyiciler saat yönünde sırasıyla 1 den 6 ya kadar stepper 1, stepper 2, stepper 6 gibi ön adlarla numaralandırıldıklarında tek ve çift sayılarla numaralandırılan eyleyicilerin tamamıyla aynı hareketleri yaptıkları şekil 4.28’de görülmektedir. Ters kinematik denklemlerde z ekseninde platformu 0 pozisyonundan +15 pozisyonuna getirmek için, diğer bir deyişle platformu z ekseninde 15mm yükseltmek için her bir eyleyicinin 15.75° lik bir dönüş yapması gerekmektedir.

Yine platformun x eksenini etrafında ϕ (yuvarlanma) açısıyla dönüş hareketi yapması durumunda x eksenine paralel şekilde konumlanan stepper 1 ve stepper 2 eyleyicilerinin aynı değerde zıt yönlerde hareket etmeleri gerekirken x eksenini ile



Şekil 4.28: Hareketli platformun z ekseninde hareketi esnasında oluşan eyleyici konumları.

30'ar derece açı yapan stepper 3, stepper 4 ve stepper 5, stepper 6 eyleyicileri 3 ve 6 ile 4 ve 5 numaraları olanlar aynı değerde zıt yönde olmak kaydı ile farklı değerler alacaklardır. Şekil 4.29'da hareketli platformun x ekseninde -15° den $+15^\circ$ ye hareketi gösterilmektedir.



Şekil 4.29: Platformun yuvarlanma hareketi.

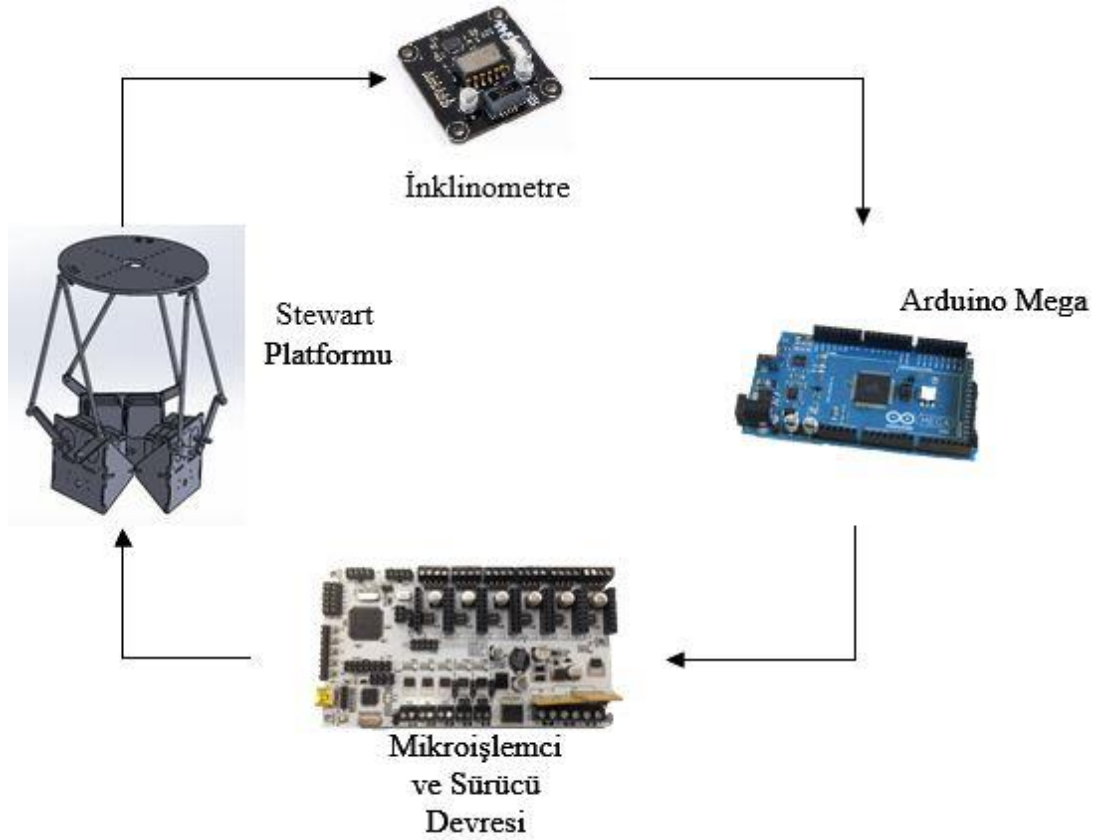
Hareketli platformun yaptığı yuvarlanma hareketi sonrasında x eksenine paralel konumlanan stepper 1 ve stepper 2 eyleyicileri yaklaşık 23° zıt yönde hareket etmektedir. Aynı şekilde 3. ve 6. eyleyiciler zıt yönlerde yaklaşık 15° 4. ve 5. eyleyiciler ise yine zıt yönde yaklaşık 11° hareket etmektedir.

Yapılan bu simülasyonlar sonucu bölüm 4.4.2 de hesaplanan ters kinematik denklemlerin doğruluğu anlaşılmıştır. Robotun hareketli platformunun seçilen mafsalları dahilinde bölüm 4.3.1 de anlatılan ve yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılması planlanan ürünü konumlandırmak için yeterli hareket kabiliyetine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

5. SİSTEM YAPISI VE DEVRE ELEMANLARI

Gerçekleştirilen tasarım ile birlikte SPM'nin kullanılacağı amaca yönelik tasarım gereklilikleri sağlandıktan sonra robotun hareketini sağlayacak eyleyicilerin seçimi ve bu eyleyicilerin kontrolünde kullanılan efektif sürücülerin seçimi çok önemlidir.

Bu çalışmada kurulan sistem robotun hareketine karar vermeden önce çevre ile iletişimi sağlamada kullanılan eğim sensörü ve bu sensörün programlanmasında ve kontrolünde kullanılan mikrodeneleyiciyi, sensörün bağlı olduğu mikrodeneleyici ile seri olarak haberleşen ve robotun eyleyicilerinin ve mikro anahtarların kontrolünde kullanılan mikrodeneleyiciyi, hareketinde step motorlardan yararlanan ve geri besleme olarak anahtarlama sistemleri kullanılan robot yapısından oluşmaktadır.(Şekil 5.1)



Şekil 5.1: Sistemin genel yapısı.

5.1 İnklinometre Sensörü

Sistemde kullanılması düşünülen inklinometre bölüm 1.2.4.1 de çalışma prensibi anlatılan ve içerisinde kuvvet-denge sensörü barındıran bir inklinometredir. Kuvvet-denge sensörlü inklinometre sistemin açısı değiştikçe içerisinde yayla bağlı olan kütleye yerçekimi kuvveti etkiyerek yayı bir miktar uzatmaktadır. Pozisyon sensörü bu uzaklığı algılayarak uzaklığa bağlı olarak bir voltaj çıktısı verir ve devrede akım meydana gelir bu akım ile oluşan magnetik kuvvet yaylı kütleyi kuvvet dengesine getirdikten sonra açı değeri ölçülmüş olur.

Bu çalışmada amaç ölçüm yüzeyinin ölçüm ucunun yatay x eksenini ile tamamen paralel olmasının sağlanması ile ölçüm kalitesinin ve prosesin yeterlilik değerinin artırılması olduğundan seçilen inklinometrenin oldukça hassas ölçüm yapabilme yeteneğine sahip olması çok önemli bir faktördür. Ölçümler çok yüksek tonajlı preslerin sürekli olarak çalıştığı bir fabrikanın kalite laboratuvarında yapılacağından seçilen inklinometrenin titreşime duyarlılığı ve titreşimi absorbe edebilme özelliği de yine çok önemli bir faktördür.

Bu gereklilikler göz önüne alındığında sistemde sensör olarak kullanmak üzere hem x hemde y ekseninde ölçüm yapabilen şekil 5.2 de görülen SCA100T-D01 inklinometre sensörü seçilmiştir. SCA100T sensörleri 3 boyutlu mikro elektromekanik sistemler grubunda bulunan ve eğim ölçmeye yarayan 2 eksenli elemanlardır. SCA100T-D01 ve SCA100T-D02 olmak üzere 2 adet modeli vardır.



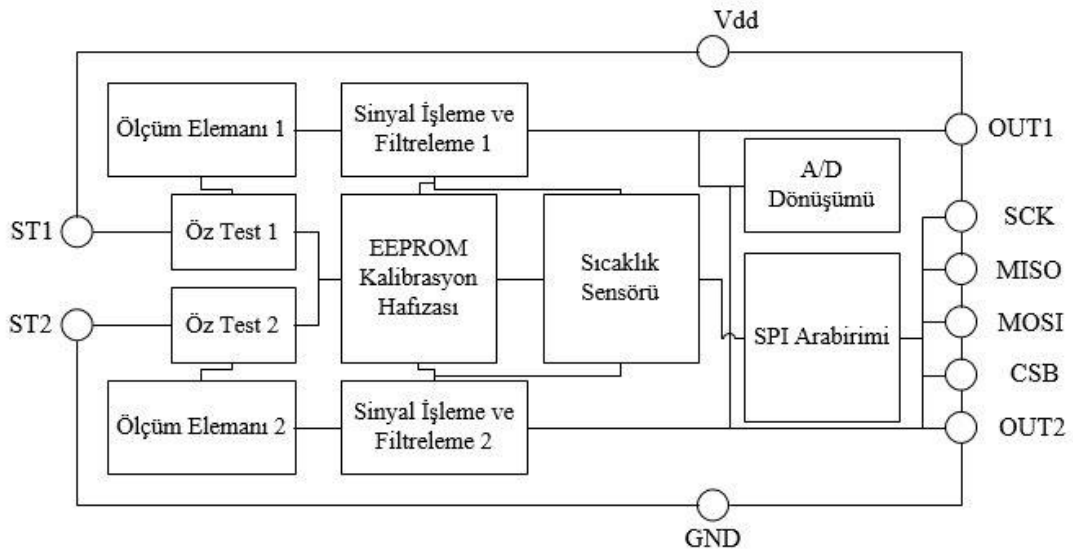
Şekil 5.2: SCA100T-D01 inklinometre.

Çizelge 5.1’de SCA100T sensörlerinin temel özelliklerinin karşılaştırılması görülmektedir.

Çizelge 5.1: SCA100T inklinometre sensörleri.

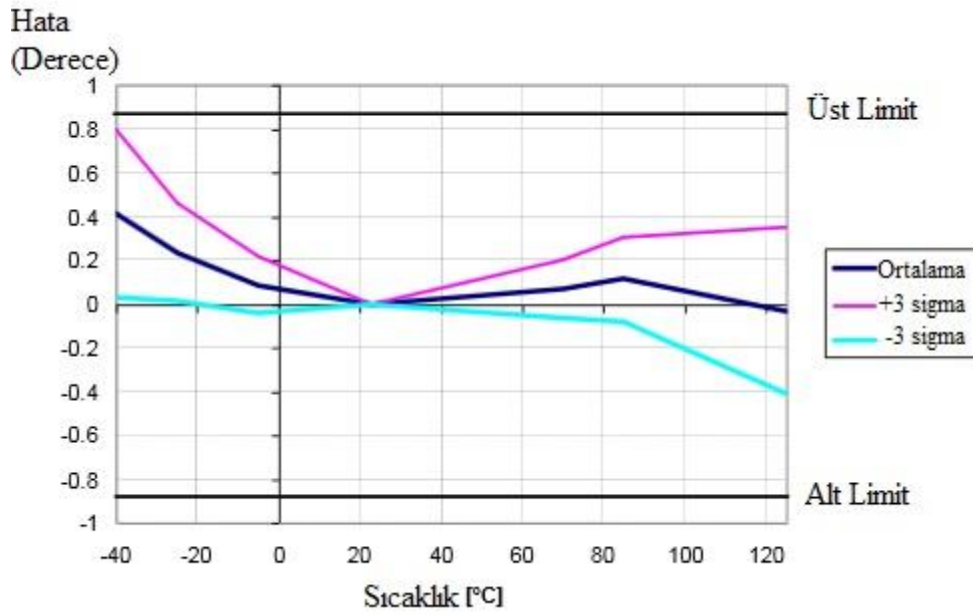
Parametre	SCA100T-D01	SCA100T-D02	Birim
Ölçüm Aralığı	± 30	± 90	°
Ofset	Vdd/2	Vdd/2	V
Hassaslık	0.0070°	0.0035°	°
Sıcaklığa Etkisi	$\pm 0,014$	$\pm 0,014$	% / °C
Rasyometrik Hata	± 2	± 2	%
Frekans Cevabı	8-28	8-28	Hz

Bu çalışmada seçilen SCA100T-D01 sensörü robotun x ve y ekseninde dönme limitleri olan ± 30 dereceyle aynı ölçüm aralığına sahip olduğundan çalışma aralıkları birebir örtüşmektedir, ± 90 derece ölçüm aralığı sunan SCA100T-D02 modeli gereksiz olacaktır. Daha yüksek mafsallarda çalışabilen stewart platformları için bu model tercih edilebilir. SCA100T-D02 modeli 0,0035° hassasiyetle daha hassas bir model olmasına rağmen SCA100T-D01 modelinin 0,007° hassasiyetle beklentileri karşılayacak hassasiyete sahip olduğu düşünülmektedir. Ürünlerin 0° konumundaki voltaj çıkışlarındaki(offset) hata değerini veren rasyometrik hata değerleri de doğru ölçümü etkileyen bir diğer faktördür. Her iki sensörde de bu değer aynı olduğundan SCA100T-D01 seçilmesi bu anlamda da bir engel teşkil etmeyecektir. Şekil 5.3’de sistemin fonksiyonel blok diyagramı bulunmaktadır.



Şekil 5.3: Fonksiyonel blok diyagramı.

SCA100T-D01 inklinometre sensörünün sıcaklığa bağlılığı oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda çok az miktardadır. Oda sıcaklığından yükseldikçe veya oda sıcaklığından çok düşük sıcaklıklarda 0° konumundaki voltaj çıktısının hatası oldukça artış gösterir ve hatalı ölçüm değerleri elde edilir. Bu çalışmada sıcaklık izolasyonu bulunan ve oda sıcaklığı şartlarında sabitlenmiş laboratuvar ortamında yapılacak testlerde bu hatalarla karşılaşmayacaktır. Şekil 5.4’de gösterildiği gibi oda sıcaklığından $\pm 20^\circ$ aralığında sistemin gösterdiği hata 0.2° den daha az olmaktadır.



Şekil 5.4: SCA100T-D01 sensörünün sıcaklık değişimine duyarlılığı.

Bunun dışında SCA100T-D01 inklinometre sensörü sıcaklıktan kaynaklanan voltaj hatasını gidermek amacıyla bünyesinde şekil 5.3 de görüldüğü gibi bir sıcaklık sensörü barındırır.

$$C = -6 \times 10^{-6} \times T^3 + 10^{-4} \times T^2 - 39 \times 10^{-2} \times T + 0,05 \quad (5.1)$$

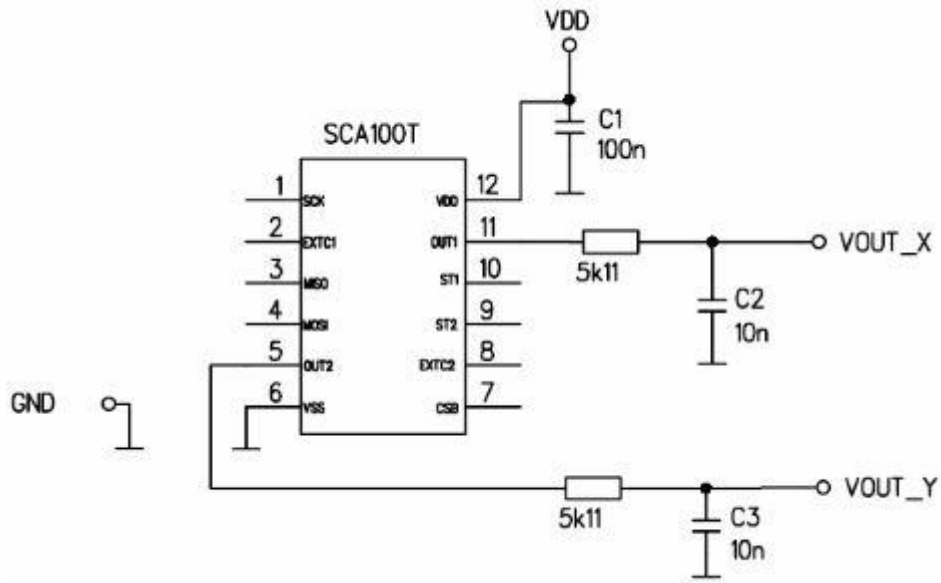
Denklem 5.1’de C değeri, oda sıcaklığında hesaplanan 0° konumundaki voltaj değeri çıktısından çıkartılır ve oda sıcaklığından farklı sıcaklıklarda karşılaşılan hata mümkün olduğunca giderilmeye çalışılır.

SCA100T-D01 inklinometresi kullanılarak açı değerinin hesaplanması için denklem 5.2 kullanılır.

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{V_{out} - Offset}{Sensitivity} \right) \quad (5.2)$$

Denlem 5.2 de V_{out} değeri sensör belirli bir açıda hareket ettirildiğinde meydana gelecektir. Bu değeri 0° konumundaki voltaj değeri olan Offset değerinden çıkartılarak sensörün sahip olduğu hassaslık değerine bölünerek ters sinus değeri hesaplandığında o anda sensörün yapmış olduğu açı değerine ulaşılır.

Şekil 5.5’de SCA100T inklinometre sensörünün devre şeması gösterilmektedir.



Şekil 5.5: SCA100T inklinometre sensörünün devre şeması.

5.2 Eyleyiciler ve Rumba Mikrodenetleyici

Bu bölümde SPM’nin hareketlendirilmesinde kullanılan eyleyicilerin tanımı yapılarak ve seçimlerinin sebepleri anlatılmaktadır. Aynı zamanda eyleyicilerin kontrolünde kullanılan sürücülerin ve sistemin programlanmasında kullanılan mikrodenetleyiciler ile sistemde geri besleme araçları olarak kullanılan anahtar yapılarının devre şemaları ve bağlantıları anlatılmaktadır.

5.2.1 Adım Motorları

Adım motorları, elektrik enerjisini dönme hareketine çeviren eletro mekanik cihazlardır. Bir adım motoru herhangi bir anda bir adım sinyali aldığı anda motorun içerisindeki rotor yapısı istenilen yönde sabit bir açıda hareket eder. Bu sabit açığa adım açısı denir. Adım motorlarında açısal yer değiştirme gönderilen elektrik sinyallerinin sayısını kontrol ederek belirlenir. Açısal yer değiştirmenin hızı ise gönderilen elektriksel sinyallerinin frekansını değiştirilerek belirlenir.[16]

5.2.1.1 Adım Motor Çeşitleri

Adım motorlar yapılarına göre 5 ayrı kategoride sınıflandırılır.

- Sabit mıknatıslı adım motorlar
- Değişken relüktanslı adım motorlar
- Hibrid adım motorlar
- Hidrolik adım motorlar
- Lineer adım motorlar

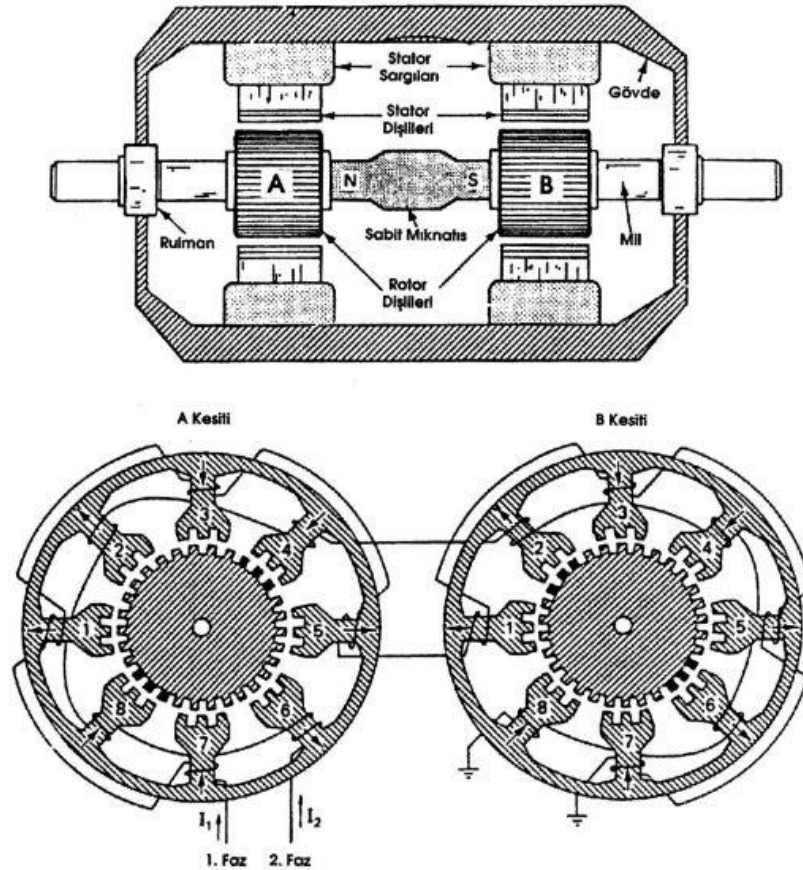
Sabit mıknatıslı adım motorlar iki fazlı sabit mıknatıslı, dört fazlı sabit mıknatıslı, orta uçlu sargılara sahip sabit mıknatıslı, disk tipi sabit mıknatıslı adım motorlar olmak üzere dört ayrı alt kategoride sınıflandırılan yapısal farklılıklar içerirler.

Sabit mıknatıslı step motorların rotorları sabit bir mıknatıstan meydana gelir. Rotor da bulunan sabit mıknatıslar rotor kutuplarını (N ve S) oluşturmaktadır. Rotor da bulunan kutupların ve stator da bulunan sargıların az veya çok sayıda olması, motorun adım sayısını belirler. Genellikle çok küçük adım sayıları gereken alanlarda sabit mıknatıslı step motorlar tercih edilmez.

Değişken relüktanslı step motorlar rotorlarında sabit mıknatıs yerine ferromanyetik malzemeden yapılmış çok kutuplu rotorlar barındıran motorlardır. Statorunda ise bobinler ve elektromıknatıslar bulunmaktadır. Stator sargıları genellikle üç fazlıdır. Değişken relüktanslı step motorlar genellikle yalnızca tam adım olarak çalışabilen ve mikro adımlama özelliği barındırmayan modeller olduğundan çok hassas

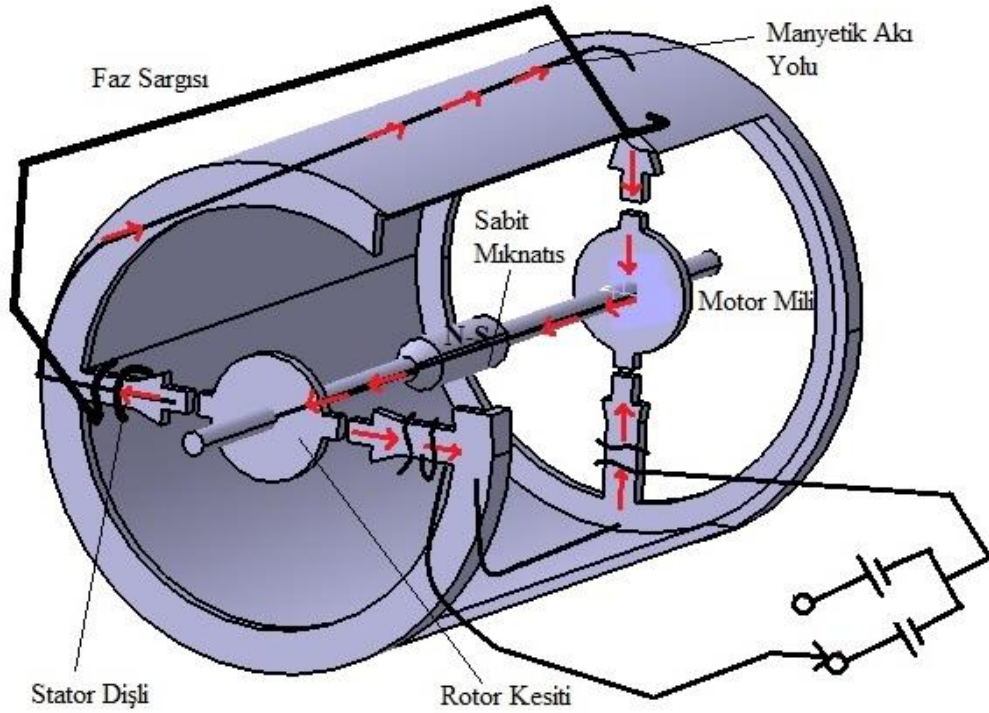
pozisyonlama gerektiren alanlarda kullanımları sınırlanmıştır. Ayrıca düşük tork özelliklerinden ötürü de endüstride pek fazla tercih edilmeyen motorlardır.

Hybrid adım motorlar sabit mıknatıslı ve değişken relüktanslı adım motorların birleştirilerek geliştirilmiş şeklidir. Hybrid adım motorlarda rotor, sabit mıknatıslı olup çeşitli dişli (kesit) sayısında yapılmaktadır. Ayrıca her bir dişli (kesit) üzerinde de çeşitli sayıda dişler bulunmaktadır. Bu dişlilerin arası diskler yardımıyla yalıtılmıştır. Hybrid adım motorlarda stator, çok parçalı değişken relüktanslı tipindedir. Genel olarak stator kutbu 8 kadardır ve her bir kutup 2–8 arası diş sayısına sahiptir. Stator kutupları üzerine sargılar sarılmak suretiyle çeşitli kutup sayıları elde edilir. Şekil 5.6 ‘da gösterilen N ve S kutuplarından müteşekkil sayılar sırasıyla enerjilenerek motor uyarılır. Saat ibresi yönü için faz uçları şekil 5.6 ‘da görüldüğü gibi 1^+ , 2^- , 1^- , 2^+ , 1^+ şeklinde beslenir. Birinci faz ve ikinci faz sargılarının enerjilenme sırası motorun dönüş yönünü ayarlar.



Şekil 5.6: Hibrid step motor kesitleri[17]

Şekil 5.6’da verilen adım motorun birinci faz sargıları enerjilendiği zamanki manyetik akının takip ettiği yol şekil 5.7’de gösterilmiştir. Manyetik akının yolu; N den S’ e doğrudur. N kutbundan çıkan akı, A kesitindeki 1 ve 5 numaralı kutup sargılarının olduğu kısımdan çıkar. B kesitindeki 3 ve 7 numaralı kutup sargılarından girerek S kutbuna ulaşır. En fazla manyetik akının olduğu yol rotor ve stator dişlilerindedir.



Şekil 5.7: Hibrit adım motorlarda akım devresi.

Bir hidrolik motora ait servo valf’inin basınç giriş yolunu translatörlerle (dönebilir lineer çeviriciyle) kontrol eden adım motorlara hidrolik adım motor denir. Kısaca hidrolik motorun basınçlı yağ yolunu denetlemek suretiyle şaftın hareketini ve yönünü tayin eden adım motorlara hidrolik adım motor denir. Hidrolik adım motorlara elektro–hidrolik adım motorlar da denilmektedir.

Mekanik hareketi dairesel bir hareket olmayıp yatay eksen (x veya y eksenleri) üzerinde hareket eden motorlara lineer motor denir. Yani lineer motorlar x ve y yönlerinde veya x ve y düzleminde herhangi bir vektör yönünde hareket ederler. Bu tür motorların tasarımı yapılırsa motor bir gövde üzerinde iki tane ortogonal elektromanyetik alanı içerir. Bu alanı tamamlamak için demir nüve kare şeklinde yapılır. Böylece iki eksenli lineer adım motor oluşturulur.[17]

Yukarıda anlatılan motorlar incelendiğinde karmaşık yapısından kaynaklı yüksek maliyetine rağmen pozisyonel anlamda en hassas hareketi sağlayan hibrit motorlar bu çalışmada kullanılacaktır.

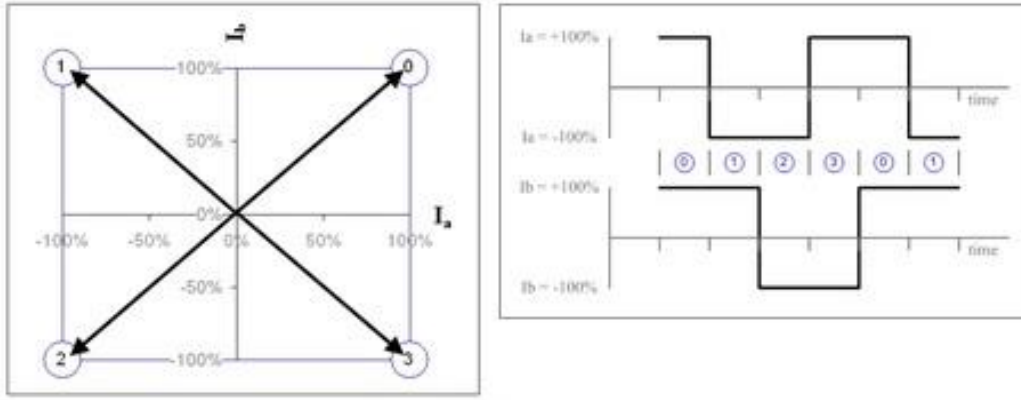
5.2.1.2 Mikroadımlama Teorisi

Pozisyonel hassaslık açısından hibrit motorlar birçok aşamada tercih edilse de, hibrit motorlar her bir adımda, minimum $0,9^\circ$ yer değiştirecek şekilde üretilirler. Bu değer ilgili hibrit motorun sahip olduğu adım açısidir ve hassaslığını belirler. Hassas pozisyonlama gereken bir çok uygulamada $0,9^\circ$ lik adım açısı yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle mikroadımlama teorisi geliştirilmiştir.

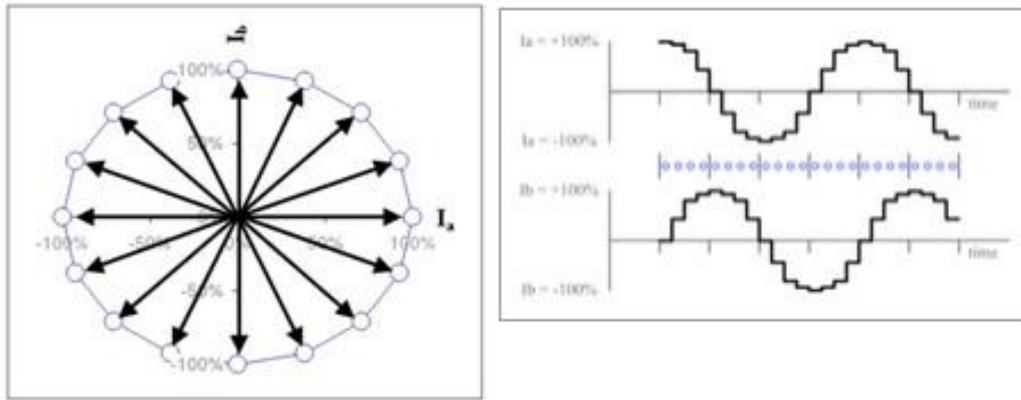
Mikroadımlama teorisi step motorun sahip olduğu bobinlerin bir darbe sinyali yerine sinus sinyaline benzer bir dalga sinyali ile kuvvetlendirilmesi ile olur.

Şekil 5.8.a'da gösterilen diyagram bir hibrit step motorun sabit akım değerleriyle tam adım yöntemiyle çalıştığında meydana gelen faz ve zaman diyagramlarıdır. Mikro adım yöntemiyle Şekil 5.8.a'da gönderilen darbe akımı yerine sinus sinyaline benzeyen sinyaller gönderilmiş ve adım açısı azaltılmıştır.

Mikroadımlamanın gerçekleşmesi için step motor bobinlerine gönderilen akımların çok hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerekir.Çalışmada kullanılan eyleyicilere gerekli akımı iletmek için kullanılan A4988 step motor sürücü devresinde EK F'de görüldüğü gibi MS1, MS2 ve MS3 anahtarları bulunmaktadır. Bu anahtarların konumları A4988 sürücüsüyle kontrol edilen bipolar step motorlara 5 farklı mikroadım açısıyla hareket etme olanağı sağlar. Çizelge 5.2 anahtarların konumlarına göre motorun sahip olacağı adım açısını göstermektedir. MS1 ve MS3 anahtarları $100k\Omega$, MS2 anahtarı ise $50k\Omega$ dirence sahiptir. Bu anahtarların üçünün de devre dışı olması step motorları sahip oldukları adım açısında(tam adım) döndürür.



a) Tam Adım



b) Mikro adım

Şekil 5.8: Tam adım ve mikro adım faz(sol) ve zaman(sağ) diyagramları.

Çizelge 5.2: A4988 sürücüsü mikroadım modları.

MS1	MS2	MS3	Mikroadım Modu
Düşük	Düşük	Düşük	Tam adım
Yüksek	Düşük	Düşük	1/2 adım
Düşük	Yüksek	Düşük	1/4 adım
Yüksek	Yüksek	Düşük	1/8 adım
Yüksek	Yüksek	Yüksek	1/16 adım

Bu çalışmada mümkün olan en hassas konumlama en iyi sonucun alınması açısından çok önemli olduğundan MS1, MS2 ve MS3 anahtarlarının devrede olduğu 1/16 mikroadım modu kullanılmıştır.

5.2.2 Eyleyicinin Özellikleri

Bölüm 5.2.1’de anlatılan step motor ve özellikleri incelendiğinde pozisyonel olarak hassaslığın ön planda olduğu bu çalışma için hibrit bipolar step motorlar arasından bir seçim yapmak uygun görülmüştür.

Bu çalışmada kullanılacak olan step motorlar hibrit nema 17 sınıfı olan LDO-42STH33-0304 MA modelidir. Bu step motor bipolar 2 fazlı, 0,9° adım açısına sahiptir ve orta derecede tork tutma özellikleri vardır. Çizelge 5.3 bu çalışma için seçilen LDO-42STH33-0304 MA step motorunun özelliklerini özetlemektedir.

Çizelge 5.3: LDO-42STH33-0304 Step motorun özellikleri.

Özellik	Değer	Özellik	Değer
Faz Numarası	2 Fazlı	Adım Açısı	0,9°±5%
Voltaj Değeri	12 VDC	Akım Değeri	DC 0,31 A/Faz
Direnç	38,5±15% ohm/phase	Endüktans	21±20% mH/Faz
Tork	1.3 kg-cm	Ağırlık	0,25kg
Rotor Ataleti	35g.cm	Yalıtım Direnci	>100 Mohm

Motorun teknik şeması daha detaylı olarak EK E’de verilmiştir.

5.2.3 Step Motor Sürücüsü

Bölüm 5.2.2’de anlatılan step motorunun mikro-adımlarla efektif bir şekilde sürülebilmesi için uygun sürücü devresinin ve mikroişlemcinin seçilmesi çok önemlidir.

Adım motorları istenilen yönde ve hızda çalıştırmak istendiğinde sargılarına belli bir sırada darbeler uygulanmalıdır. Adım motorun kaç adım atacağı uygulanan darbelere bağlıdır. Fazlara uygulanacak darbeler (palsler-gerilimler) basit olarak bir anahtarlama sistemi ile yapılabilir. Bu işlemi yapan devrelere sürücü devresi veya kontrolör denir. Günümüzde elektronik devreler ile bu işlem çok kolay bir şekilde yapılmaktadır. Adım motorların ve kullanılacak yerin özelliğine göre hazırlanmış mikroişlemci kontrollü sürücü kartları mevcuttur. Bu kartlar sayesinde adım motorların istenilen hızda ve istenilen hassasiyette çalıştırmak mümkündür.

Bu çalışma için seçilen step motor sürücüsü bipolar step motorların adım açısının 1/16’sı kadar hassaslıkta hareketini kontrol edebilen yüksek sıcaklık ve aşırı akım koruması olan 8-35V arasında 1A değerinde soğutma cihazlarına gerek duymadan çalışabilen A4988 Polulu step motor sürücü devresidir. A4988 Polulu step motor devresi soğutucu yardımıyla step motorun sahip olduğu her bir bobin için 2A’e kadar çıkış akımında çalışabilmektedir. Şekil 5.9’da bir görüntüsü verilen A4988 step motor sürücüsünün devre şeması EK F’de verilmiştir.



Şekil 5.9: A4988 Polulu step motor sürücüsü.

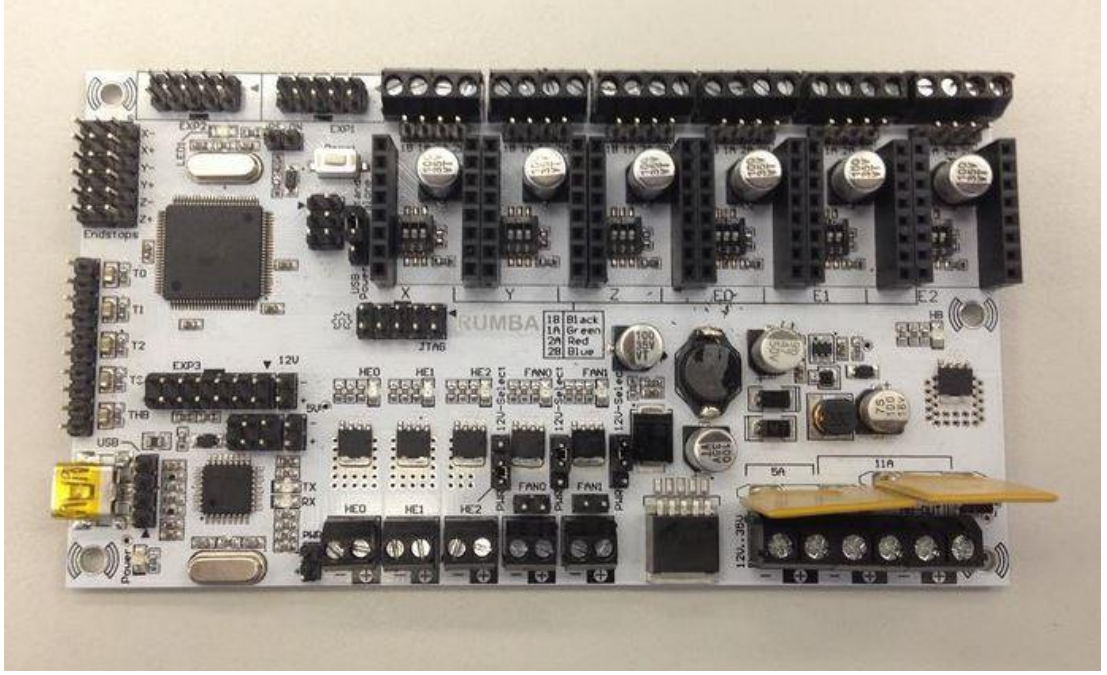
5.2.4 Mikrodenetleyici

Mikrodenetleyiciler programlanarak kontrol edilebilen bir işlemci, bellek birimi ve programlanabilen giriş çıkış birimini barındıran donanım elemanlarıdır. Sahip olduğu işlemci ile bellekte bulunan programların işletilmesini ve çeşitli birimlerle veri iletişimini ve kontrolü sağlar. Donanım yapısında bulunan RAM sayesinde işlemcinin verilerini geçici olarak depolayabilir. Mikrodenetleyiciler bu donanım elemanlarını kendi içerisinde barındırdığından “gömülü sistemler” olarak da anılırlar.

Bu çalışmada mikrodenetleyici olarak AVR ATmega2560 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. AVR denetleyicilerinin işlemci çekirdeği, ilk defa çip üzerinde flash program belleği bulunan işlemcidir. AVR mimarisi denetleyici sistemdeyken tekrar programlamaya izin verir. AVR denetleyicileri azaltılmış komut kümesi mimarisinde üretilmişlerdir. Azaltılmış komut kümesi mimarisi, komutların azaltılmasından ziyade karmaşıklığın azaltılması anlamına gelmektedir. AVR mimarisinde komut setinin zengin olması sayesinde derleyici tek çevrimde işleyebileceği komutların en uygununu seçebilir. Sonuçta makine koduna çevrilmiş olan kod daha hızlı olacaktır. AVR mikrodenetleyicileri harvard mimarisine sahip olduklarından program belleği ile veri bellekleri birbirlerinden ayrılmıştır.

Yüksek seviyeli C dili ile geliştirilmek üzere tasarlanan AVR denetleyicileri, minimum kod boyutu ve maksimum hızda komutları işlemek üzere ayarlanmıştır. Tek çevrimde komutu alma ve işleme yeteneği ve yüksek kod yoğunluğu düşük güç tüketimini ve performansı arttırdığı için AVR’yi diğer mikrodenetleyicilerden farklı kılmaktadır.

Üzerinde AVR ATmega2560 mikrodnetleyici barındıran, A4988 Polulu step sürücülerin entegre edilebildiği, TX-RX seri iletişim portu sayesinde diğer mikrodnetleyicilerle iletişim kurabilen, mikroanahtar sensörlerinin bağlanabildiği bir devre yapısı olan ve eyleyici olarak step motorların kullanıldığı CNC, 3D yazıcı gibi bir çok alanda elektronik devre kartı olarak kullanılan şekil 5.10 da görülen Rumba mikrodnetleyici devresi bu çalışmada kontrolcü kartı olarak seçilmiştir.

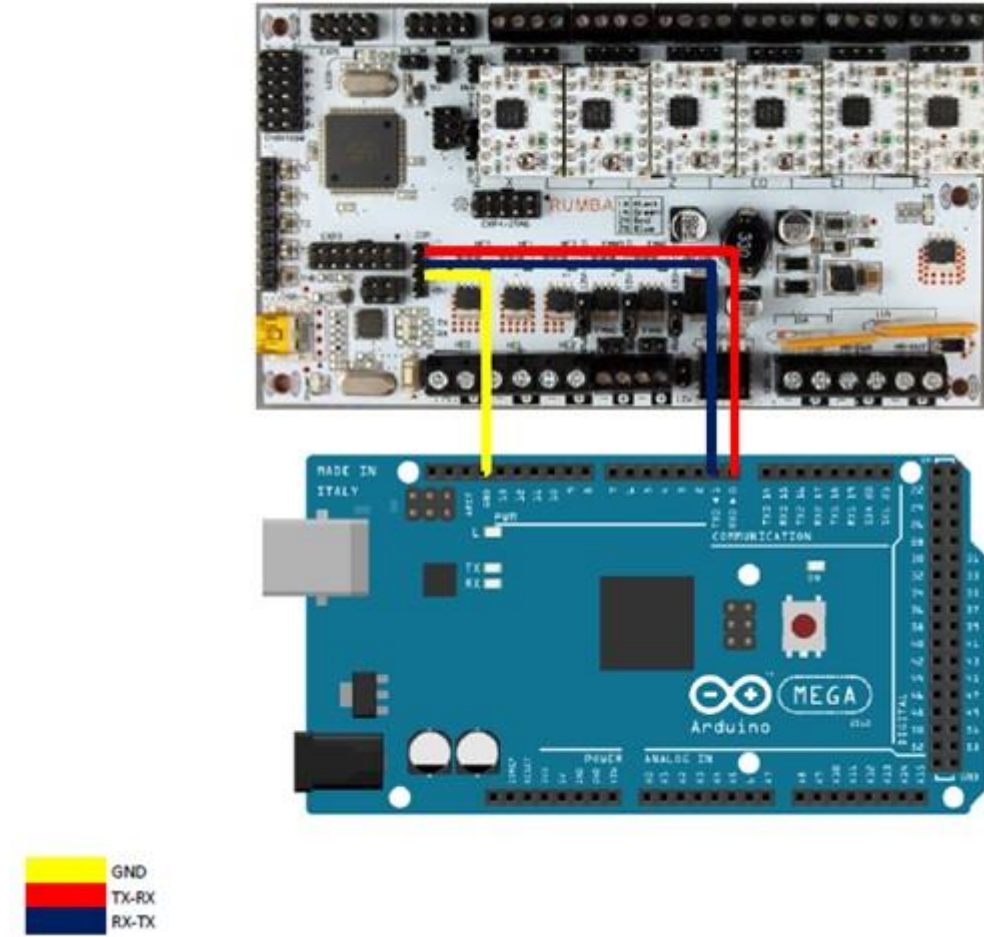


Şekil 5.10: Rumba mikrodnetleyici.

Rumba mikrodnetleyici kartı 12V ile 35V gerilim aralığında çalışabilecek şekilde tasarlanmış, step motorları mikroadımlama teorisiyle kolayca kontrol edebilmek üzere anahtar devreleri barındıran bir karttır. Aynı zamanda başka bir mikrodnetleyici ile seri iletişim kurabilmek adına UART(Evrensel eşzamansız alıcı ve verici) portlarını barındırır. Bu sayede bu çalışmada eyleyicileri ve mikro anahtarları kontrol eden rumba mikrodnetleyici, eğim sensörünü kontrol eden arduino mega mikrodnetleyici ile şekil 5.11 deki devre kurularak seri olarak haberleştirilecektir.

Bu çalışmada yüzey pürüzlülük ölçümü yapan profilometre ile ölçümü yapılacak parçaların konumlandırılmasını sağlamak amacıyla üretilen stewart platformunda konumlandırılacak ürünlerin aç bilgisi ölçmede SCA100T-D01 kuvvet-denge

sensörlü inklinometrenin kullanılması hem performans hem de gereklilikler açısından uygun görülmüştür.



Şekil 5.11: Rumba ve Arduino mikrodeneleyicileri seri haberleşme devresi.

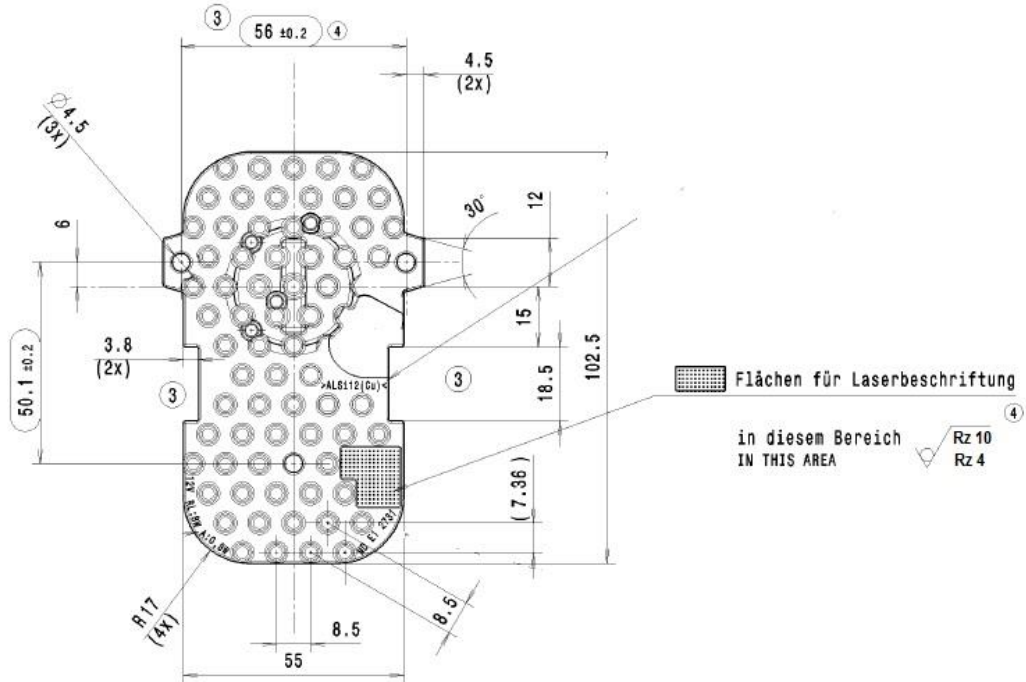
Ancak prototip aşamasında yapılan deneysel ölçümlerde MMA7361 ivme sensörü kullanılmıştır. İvme sensörleri uzun periyotlarda integral işlemiyle pozisyon verisine ulaştıklarından kümülatif hata meydana getirirler ve sürekli kullanımda, daha hassas sonuçlar inklinometre kullanılarak alınmalıdır.

Rumba mikrodeneleyici ile bu sistem için oluşturulan devre şeması EK G’de verilmiştir.

6. DENEYLER VE İSTATİSTİKSEL HESAPLAMALAR

İstatistiksel proses kontrolü yapılan yüzey pürüzlülük ölçümlerinde kullanılması için tasarlanan SPM prototip olarak üretildikten sonra deneysel ölçümler robot kullanılarak ve robot kullanılmadan tekrarlanmış ölçülen değerler karşılaştırılarak bu bölümde sunulmuştur.

Şekil 6.1’de teknik resmi gösterilen, otomobillerin ön far bölümünde bulunan aydınlatma devrelerinin üzerine monte edildiği ve soğutucu görevi gören ürün minimum Rz4, maksimum Rz10 yüzey pürüzlülük toleransına sahiptir. Genellikle yüzey pürüzlülük değerlerinde minimum toleransa gerek duyulmazken şekildeki gibi parçalarda yüzeye sürülecek yarı akışkan malzemelerin tutunmasını kolaylaştırmak amacıyla minimum bir toleransa da gerek duyulmaktadır. Şekilde yüzey pürüzlülük toleransının belirtildiği bölümde yer alan daire içerisinde 4 sembolü bu ölçünün istatistiksel olarak kontrol edilmesi ve istenilen proses yeterliliğinin sağlanamaması durumunda yüzde yüz olarak kontrol edilmesi gerekliliğini belirtir.

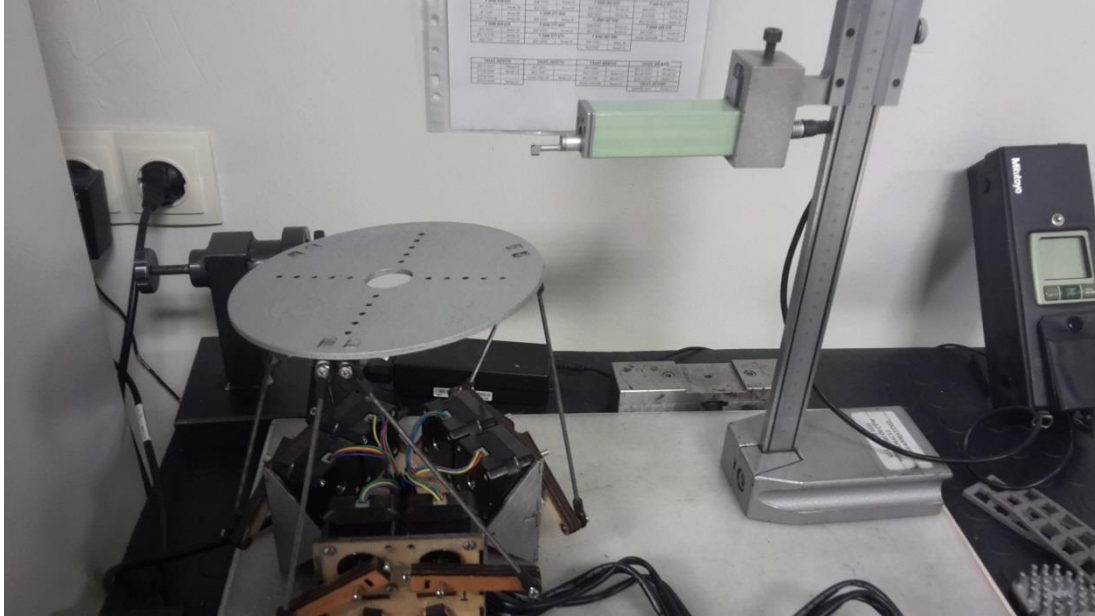


Şekil 6.1: Deney parçasının yüzey pürüzlülük tolerans değeri.

Üründe ilgili yüzeyin elde edilmesinde talaş kaldırma işlemlerinden yararlanılamayacağına belirten yüzey sembolü bulunduğundan bölgenin yüzey pürüzlülük değerleri istenilen limitler dahilinde değişkenlik göstermeye daha eğilimli olacaktır. Bu durum istatistiksel proses kontrolde yapılacak ölçümlerin çok daha dikkatli ve doğru yapılması gerekliliğini arttırmaktadır.

6.1 Ölçümler ve İstatistiksel Hesaplamalar

Teknik şartnamesinde yüzey pürüzlülük değeri kritik olarak belirlenmiş ve dolayısıyla istatistiksel çalışmalarla proses yeterliliği kanıtlanmak zorunda olan ürünlerin konumlandırılmasında kullanılacak stewart platformu şekil 6.2’de görülen Mitutoya 178-601 mekanik profilometre ile yapılacak ölçümlerde kullanılmıştır.



Şekil 6.2: Mitutoya 178-601 mekanik profilometre ve üretilen SPM.

Ölçümler başlamadan şekil 6.1’de görülen soğutucu parçasından bir üretim saatinde rasgele olarak 30 adet ayrılmıştır. 30 adet ürün yine rasgele olarak 10’arlı 3 grup halinde dağıtılmış ve ölçüm yapılacak alana getirilmiştir. Her bir grup ayrı bir operatör tarafından konumlandırma platformu kullanılarak ve kullanılmadan ölçülmüştür.

6.1.1 Durum 1: Manuel Konumlandırma

İlk durumda ölçümler mevcut durumda olduğu gibi SPM kullanılmadan ölçüm parçası bir mengene ile manuel olarak sabitlenerek yapılmıştır. Bu durumda ölçüm sonuçları çizelge 6.1'deki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 6.1: Manuel konumlandırma ile elde edilen ölçüm sonuçları.

PARÇA NO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. GRUP	8,50	8,12	7,56	8,10	8,82	8,03	7,56	8,72	8,45	7,98
2. GRUP	8,09	8,45	8,22	9,42	6,55	6,98	8,17	7,56	8,98	8,09
3. GRUP	8,17	7,56	9,89	4,75	8,33	6,56	6,53	9,46	8,45	8,51

Elde edilen her bir sonucun minimum Rz4 maksimum Rz10 yüzey pürüzlülük tolerans limitleriyle uyumluluk gösterdiği görülmektedir. Ancak prosesin ileriye dönük güvenilirliği ve yeterliliği ancak yapılacak hesaplamalardan sonra anlaşılacaktır.

Yapılan ölçümlerden sonra bölüm 3'de anlatılan hesaplamalarla standart sapma, kontrol limitleri ve yeterlilik indisleri hesaplanmalıdır.

Denklem 3.2'yi kullanarak $\bar{x}$ değeri:

$$x_1 = \frac{8,5 + 8,12 + 7,56 + \dots + 7,98}{10} = 8,184$$

$$x_2 = \frac{8,09 + 8,45 + 8,22 + \dots + 8,09}{10} = 8,051$$

$$x_3 = \frac{8,17 + 7,56 + 9,89 + \dots + 8,51}{10} = 7,821$$

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} = 8,019$$

olarak bulunur.

Toleranslar haricinde prosesin güvenilirliği açısından bulunan alt ve üst kontrol limitleri hesaplamak için öncelikle standart sapma hesaplanmalıdır.

Standart sapma değeri denklem 3.8 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(8,019 - 8,5)^2 + (8,019 - 8,12)^2 + \dots + (8,019 - 8,51)^2}{30 - 1}}$$

$\sigma = 1,0162$ olarak bulunur.

Alt ve üst kontrol limitleri örneklem sayısının 5’den küçük olduğu durumlarda standart sapma ya da ortalama aralık kullanılarak hesaplanabilir. Standart sapma kullanılarak alt ve üst kontrol limitleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$AKL = \bar{x} - A_3\sigma = 8,019 - 1,954 \times 1,0162 = 6,033$$

$$\dot{ÜKL} = \bar{x} + A_3\sigma = 8,019 + 1,954 \times 1,0162 = 10$$

Hesaplama da kullanılan A_3 değeri kontrol grafiği sabitidir ve örneklem boyutuna göre değışiklik gösterir. Her bir örneklem boyutu için kullanılan sabitler EK A.2’de verilmiştir. Bulunan kontrol limitleri incelendiğinde hataların üst tolerans limitine doğru yönelme gösterdiği görülmektedir. Bu durum prosesin daha dar bir alanda değışim göstermesine ve daha büyük risk içermesine sebep olur.

Tüm bu hesaplamalar yapıldıktan sonra prosesin mevcut durumdaki yeterliliğini gösteren C_p değeri denklem 3.18 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$C_p = \frac{\dot{ÜT} - AT}{6\sigma} = \frac{10 - 4}{6 \times 1,0162} = 0,98$$

Bulunan 0,98 C_p değeri üretilen 1.000.000 adet üründen 66.800 ürünün hatalı olarak üretileceğini gösterir. Bu oldukça yüksek bir orandır.

C_p değeri ürünün istatistiksel olarak yeterliliğini incelerken üründeki hataların dağılımını hesaba katmadığından ürünün geleceğine yönelik tahminlerde geçerliliğini yitirir. Bu durumda C_{pk} değeri hesaplanmalıdır. C_{pk} değeri denklem 3.19 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

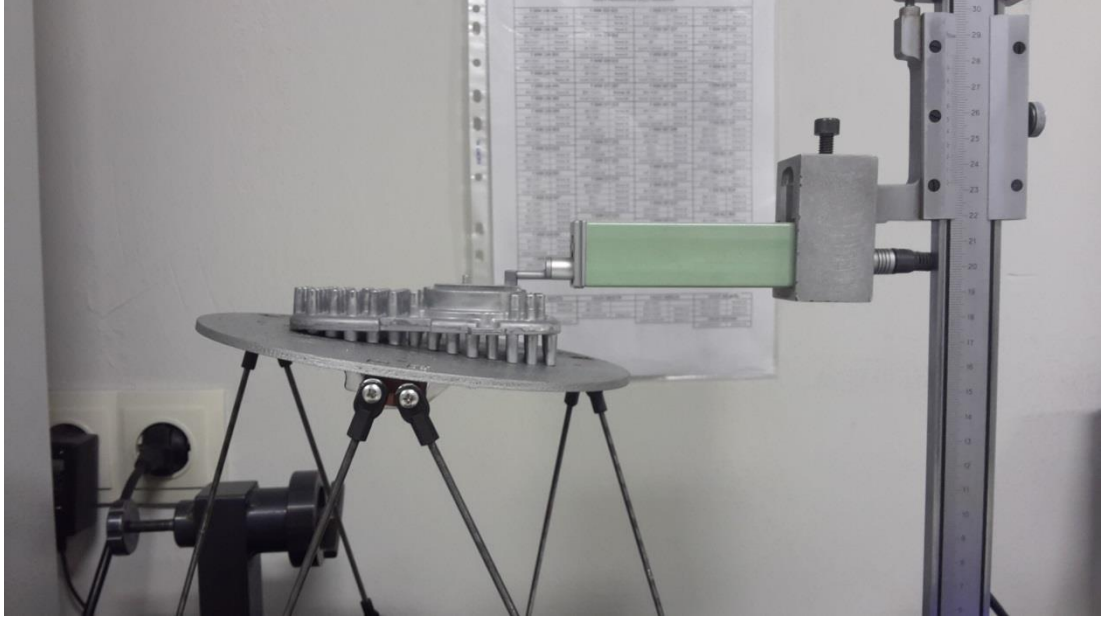
$$C_{pk} = \min\left(\left(\frac{\bar{x} - AT}{3\sigma}\right), \left(\frac{\dot{ÜT} - \bar{x}}{3\sigma}\right)\right) = \left(\frac{10 - 8,019}{3 \times 1,0162}\right) = 0,65$$

Bulunan C_{pk} değeri prosesin uzun vadede üretilen 1.000.000 parçada yaklaşık 320.000 hatalı ürün üreteceğini göstermektedir. Prosesin devamına izin verebilmek

için en az $C_{pk} > 1$ yeterliliğine sahip olması gerekmektedir. Bu ölçü özellikle bir kritik karakteristik olduğundan yüzde yüz kontrol yapılmadan güvenli olarak üretilebilmesi için $C_{pk} > 1,33$ değerine ulaşılmalıdır. Mevcut durumda proses yetersiz olarak bulunmuştur.

6.1.2 Durum 2: SPM ile Konumlandırma

İkinci durumda ölçümler mevcut durumdan farkı olarak üretilen SPM ile profilometrenin altında konumlandırma yaparak yapılmıştır. Şekil 6.3’de görüldüğü gibi ürünü SPM hareketli platformuna yerleştirildikten sonra ölçüm yapılacak yüzey üzerine eğim sensörü getirilmiş ve robotun hareket butonuna basılarak eğim sıfırlanacak şekilde robot hareketini tamamlamıştır.



Şekil 6.3: SPM hareketinden sonra elde edilen ölçüm ucu-ölçüm yüzeyi dikliği.

Bu durumda ölçüm sonuçları çizelge 6.2’deki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 6.2: SPM konumlandırması ile elde edilen ölçüm sonuçları.

PARÇA NO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. GRUP	7,56	6,57	6,89	7,92	7,55	6,42	6,89	8,01	7,72	6,55
2. GRUP	5,89	5,38	7,05	7,47	6,47	7,32	7,95	6,95	7,22	6,77
3. GRUP	7,98	7,55	7,22	6,05	6,61	7,12	7,22	7,56	8,12	6,07

Alınan sonuçlar incelendiğinde yine sonuçların minimum Rz4 maksimum Rz10 tolerans limitlerinde olduğu görülmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre maksimum olarak ölçülen yüzey pürüzlülük değeri Rz8,12, minimum olarak ölçülen yüzey

pürüzlülük değeri Rz5,38 olarak elde edilmiştir. Bu değerler ilk bakışta ölçüm aralığının manuel olarak yapılan ölçüme göre ciddi oranda azaldığını göstermektedir. Ancak proses yeterliliği yapılan detaylı hesaplamalardan sonra görülecektir.

Denklem 3.2'yi kullanarak $\bar{x}$ değeri:

$$x_1 = \frac{7,56 + 6,57 + 6,89 + \dots + 6,55}{10} = 7,21$$

$$x_2 = \frac{5,89 + 5,38 + 7,05 + \dots + 6,77}{10} = 6,85$$

$$x_3 = \frac{7,98 + 7,55 + 7,22 + \dots + 6,07}{10} = 7,15$$

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} = 7,068$$

olarak bulunur.

Standart sapma değeri denklem 3.8 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(7,068 - 7,56)^2 + (7,068 - 6,57)^2 + \dots + (7,068 - 6,07)^2}{30 - 1}}$$

$\sigma = 0,6933$ olarak bulunur.

Standart sapma kullanılarak alt ve üst kontrol limitleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$AKL = \bar{x} - A_3\sigma = 7,068 - 1,954 \times 0,6933 = 5,713$$

$$\bar{ÜKL} = \bar{x} + A_3\sigma = 7,068 + 1,954 \times 0,6933 = 8,422$$

Bulunan kontrol limitleri incelendiğinde hataların önceki ölçüme oranla nominal değer olan Rz7 değerine daha yakın dağılım gösterdiği görülmektedir.

Prosesin mevcut durumdaki yeterliliğinin görülmesi için C_p değeri denklem 3.18 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$C_p = \frac{\bar{ÜT} - AT}{6\sigma} = \frac{10 - 4}{6 \times 0,6933} = 1,44$$

Ölçüm yapılmadan ürünün SPM kullanılarak konumlandırıldığı durumda C_p değeri 1,44 olarak bulunmuştur. Bu değer mevcut durumda prosesin 1.000.000 ürün üretiminde yalnızca yaklaşık 2200 adet hatalı ürün üreteceğini belirtmektedir.

Üründeki hataların dağılımı hesaba katılarak geleceğe yönelik prosesin güvenilirlik değeri olan C_{pk} denklem 3.19 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$C_{pk} = \min\left(\left(\frac{\bar{x} - AT}{3\sigma}\right), \left(\frac{ÜT - \bar{x}}{3\sigma}\right)\right) = \left(\frac{10 - 7,068}{3 \times 0,6933}\right) = 1,41$$

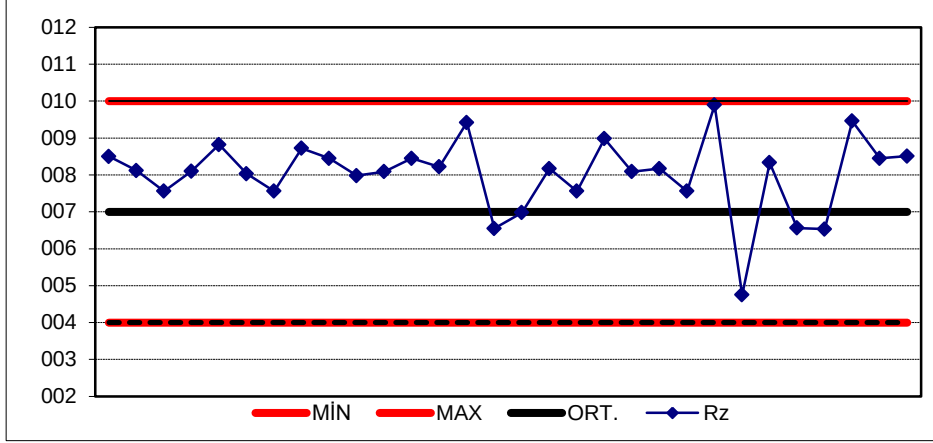
Hesaplanan C_{pk} değeri 1,41 prosesin üretilecek 1.000.000 adet üründe yalnızca 3000 adet hatalı ürün üreteceğini belirtmektedir. Bu durum özellikle insan hayatı için risk taşıyabilecek nitelikte kritik karakteristiklere sahip ölçüleri bulunan ürünlerin ilgili ölçülerinin üretim proseslerinin güvenliği açısından oldukça önemlidir. Proses devam ederken rutin olarak yapılan istatistiksel proses control ölçümlerinde bulunan sonuçlar analiz edilerek oluşturulan kontrol kartlarındaki değişimler sürekli olarak incelenerek prosesin güvenliği kolayca sağlanabilir. Bulunan C_{pk} değeri prosesin olası değişimlere karşı çok daha güvenilir bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Prosesin bu güvenilirliği ileri bölümlerde anlatılan sigma dağılımlarında daha net olarak gösterilecektir.

6.2 Deney Sonuçları ve Karşılaştırma

Manuel ve SPM otomasyonu kullanılarak yapılan ölçümler Ishikawa kontrol grafikleri ve altı sigma dağılımları ile bu bölümde gösterilmiştir. Özellikle Ishikawa kontrol grafikleri prosesin güvenilirliğinin gözlemlenebilmesi açısından çok önemlidir. Hatalı ölçülerin dağılımlarının görülmesi ve elde edilen ölçüm sonuçlarının bir çan eğrisi dağılımı göstermesi açısından da 6-sigma grafiği kullanılmıştır.

6.2.1 Durum 1: Manuel Konumlandırma Sonuçları

Manuel olarak yapılan ölçümlerden sonra çizelge 6.1’de gösterilen ölçüm sonuçları Ishikawa kontrol grafiğinde izlendiğinde sonuçlar Şekil 6.4’de görüldüğü gibi olmuştur. Sonuçlar incelendiğinde ölçüm sonuçlarının nominal değer olan Rz7



Şekil 6.4: Manuel olarak konumlandırarak yapılan ölçümlerin kontrol grafiği

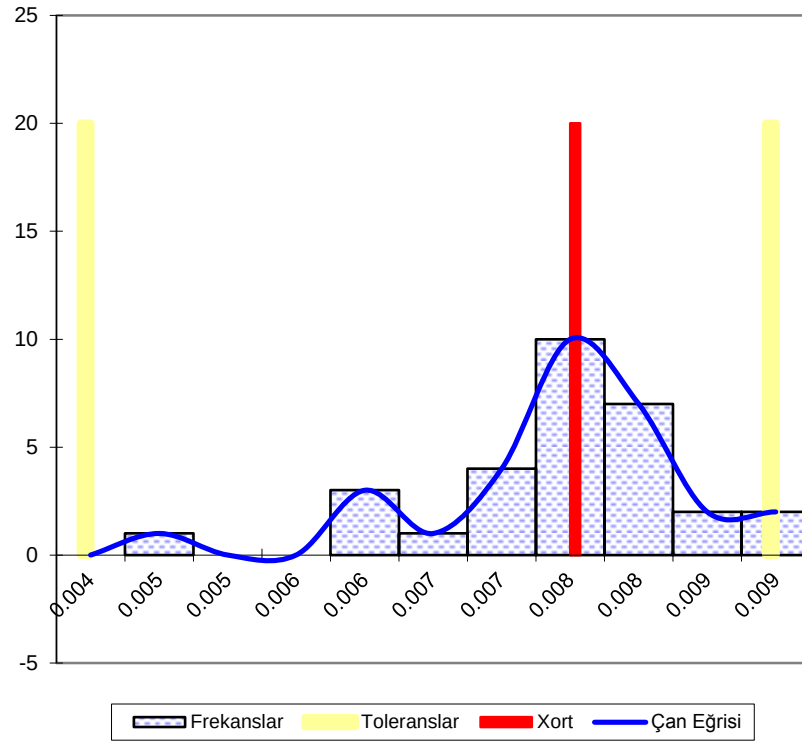
değerinin çoğunlukla üzerinde dağılım gösterdiği ve birkaç ölçüm bölgesinde neredeyse tolerans değerinde sonuç verdiği görülmektedir. Bu durum prosesin mevcut durumda zaten güvenilir olmadığını ve ilerleyen zamanlarda tolerans dışı sonuçların çok yüksek ihtimalle alınacağını göstermektedir.

Çizelge 6.3: Manuel konumlandırılan ölçümlerdeki dağılım

Sınıf Aralığı	4 4,55	4,55 5,09	5,09 5,64	5,64 6,18	6,18 6,73	6,73 7,27	7,27 7,82	7,82 8,36	8,36 8,91	8,91 9,45	9,45 10
Frekans	0,00	1,00	0,00	0,00	3,00	1,00	4,00	10,00	7,00	2,00	2,00

Ürünün manuel konumlandırılarak ölçümlerin yapıldığı durumda ölçülen 30 adet numuneden 25 adetinin nominal değer olan Rz7 değerinin üzerinde bulunduğu çizelge 6.3’de gösterilmektedir. Çizelge 6.3’e göre 2 adet ölçüm 9,45-10 sınıf aralığında ölçülmüştür. Bu değerler üst tolerans limitine çok yakın değerlerdir. Manuel konumlandırmada yapılan ölçümlerde ölçüm sapmalarının tek bir yöne göre yönelim göstermesi özellikle talaş kaldırma işlemi yapılmayan yüzeylerde ölçüm hatasının olma ihtimalinin yüksek olduğuna işaret etmektedir. Şekil 6.5’de manuel konumlandırma ile yapılan ölçümlerin dağılımını gösteren sigma grafiği verilmiştir.

Burada prosesin 6-sigma dağılımı çizilerek sigma seviyesi incelenmiştir. Prosesin hesaplanan sigma seviyesi özellikle gelecek üretimlerde olası hatalara karşı kritik karakteristik ölçüsünün tolerans sınırını aşma ihtimalini değerlendirmekte kullanılır.



Şekil 6.5: Manuel konumlandırma ile yapılan ölçümlerin sigma grafiği.

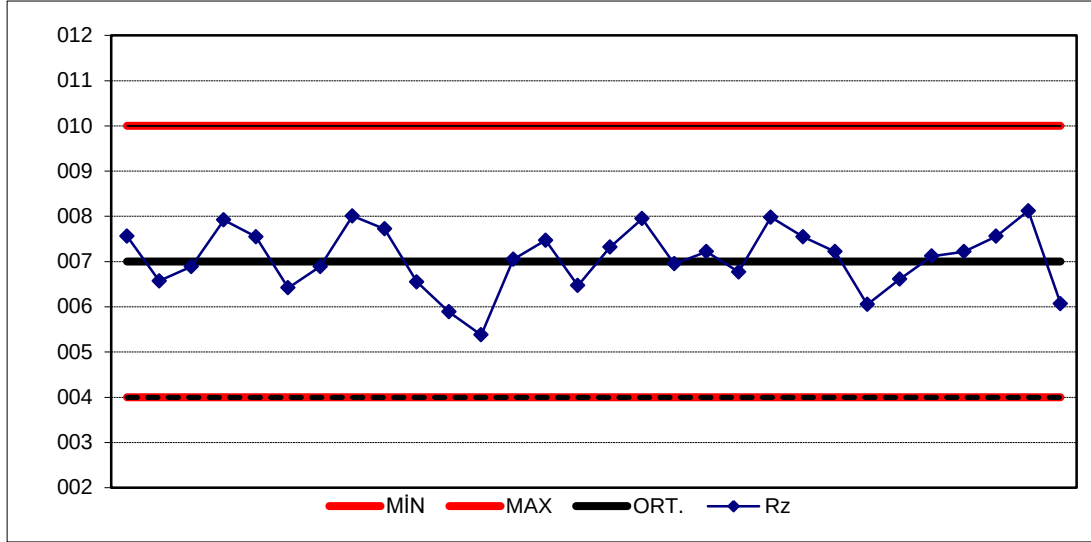
6 sigma tekniği proses ortalamasının üst ve alt kontrol ya da tolerans limitleriyle olan uzaklığını tanımlayan bir tekniktir. Bir prosesin 6 sigmada çalışması proses ortalamasının üst ve alt toleranslara 6 sigma yani standart sapmanın 6 katı kadar uzakta olduğunu gösterir. Bu durumda prosesteki tüm değerler belirlenen spesifikasyonların içerisinde kalacaktır.

Şekil 6.5 incelendiğinde prosesin ideal çan eğrisi grafiğinden oldukça uzak bir profilde olduğu ve prosesin sigma seviyesinin 1.9 sigma seviyesinde olduğu görülmektedir. Bu da proses ortalamasının grafikte sarı renklerle belirtilen tolerans limitlerinden üst toleransa olan yakınlığından kaynaklanmaktadır. Bu durum prosesin yetersizliğini göstermektedir.

Burada prosesin yetersizliği dağılımların çok fazla belirsiz olmasından değil ortalama değer nominal yüzey pürüzlülük değerinden ötelenmiş bir şekilde dağılım göstermesinden kaynaklandığından ölçümün en doğru koşullar altında yapılmadığı düşünülebilir.

6.2.2 Durum 2: SPM ile Konumlandırma Sonuçları

SPM ile ölçüm numunesi konumlandırılarak yapılan ölçümlerden sonra çizelge 6.2’de gösterilen ölçüm sonuçları Ishikawa kontrol grafiğinde izlendiğinde sonuçlar şekil 6.6’da görüldüğü gibi olmuştur.



Şekil 6.6: SPM ile konumlandırılarak yapılan ölçümlerin kontrol grafiği

Şekil 6.6 incelendiğinde prosesin nominal değer olan Rz7 değeri etrafında bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Prosesin sahip olduğu tolerans değeri olan $\pm 3\mu\text{m}$ aralığının $\pm 1\mu\text{m}$ bandını kullandığı ve oluşan ağırlığın bu frekans aralığına yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum prosesin yeterliliğini ve gelecek üretimlerdeki potansiyel başarısını göstermektedir.

Çizelge 6.4 ölçülen numunelerin sınıf aralığında sahip olduğu frekansları ve dağılımları göstermektedir.

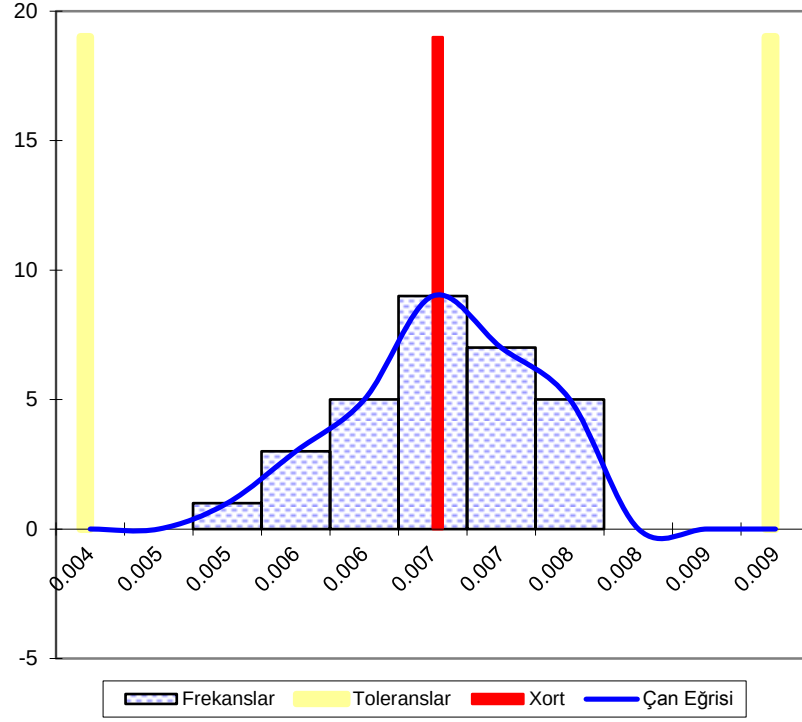
Çizelge 6.4: SPM ile konumlandırılan ölçümlerdeki dağılım.

Sınıf Aralığı	4	4,54	5,09	5,64	6,18	6,73	7,27	7,82	8,36	8,91	9,45
	4,54	5,09	5,64	6,18	6,73	7,27	7,82	8,36	8,91	9,45	10
Frekans	0,00	0,00	1,00	3,00	5,00	9,00	7,00	5,00	0,00	0,00	0,00

Çizelge 6.4 incelendiğinde en yoğun dağılım 9 adet numune ile 6,73-7,27 aralığında gözlemlenmektedir. Bu durum en yoğun dağılımın nominal değer etrafında

gerçekleştiğini gösterir. Ölçümü yapılan 30 adet numuneden 28 tanesi Rz6, Rz8 aralığında ölçülmüştür.

Şekil 6.7 SPM kullanılarak konumlandırılan ürünlerin ölçüm sonuçlarının sigma grafiğini göstermektedir.



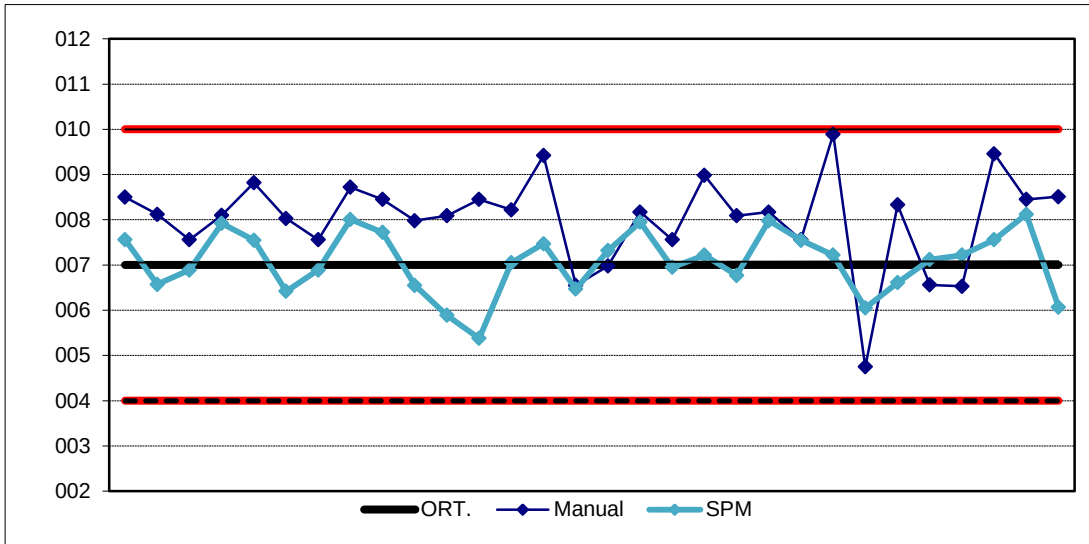
Şekil 6.7: SPM ile konumlandırılarak yapılan ölçümlerin sigma grafiği.

Şekil 6.7 incelendiğinde görülen çan eğrisi ideal çan eğrisine oldukça benzer bir yönelim göstermektedir. Ölçüm sonuçlarının ortalama değerinin üst ve alt tolerans limitlerine neredeyse eşit mesafede olması ölçümlerin nominal değere yakın dağılımlar gösterdiğini ve dolayısıyla prosesin mevcut durumda sahip olduğu güvenilirliği göstermektedir. Prosesin sigma seviyesi incelendiğinde prosesin sahip olduğu ortalama değer üst ve alt tolerans limitlerine standart sapmanın 4,25 katı kadar uzak bir mesafede olduğu görülmektedir. Proses 4,25 sigma seviyesinde ürünler üretmekte olduğundan yeterlidir.

6.2.3 Durum 1 ve Durum 2'nin Karşılaştırılması ve Sonuçlar

Manuel ve SPM kullanılarak konumlandırılan numunlerle yapılan ölçümlerde amaç hassas yüzey pürüzlülük ölçümlerinde ölçüm ucu ile ölçüm numunesi yüzeyinin dik olmamasından kaynaklanan ölçüm hatalarının, tolerans dışı olmasa bile düşük proses yeterlilik indislerine sebep olmasını engellemektir. Düşük proses yeterlilik indisleri toleranslar dahilinde üretilen parçalarda dahi sürekli kontrol gerektirdiğinden yüksek maliyetlerde üretilmelerine ve geleceğe yönelik prosesin denetim dışı kalmasına neden olmaktadır.

Şekil 6.8 manuel olarak ve SPM kullanılarak konumlandırıldıktan sonra ölçümü yapılan 30'ar adet numunenin kontrol grafiklerinin karşılaştırılmasını göstermektedir.



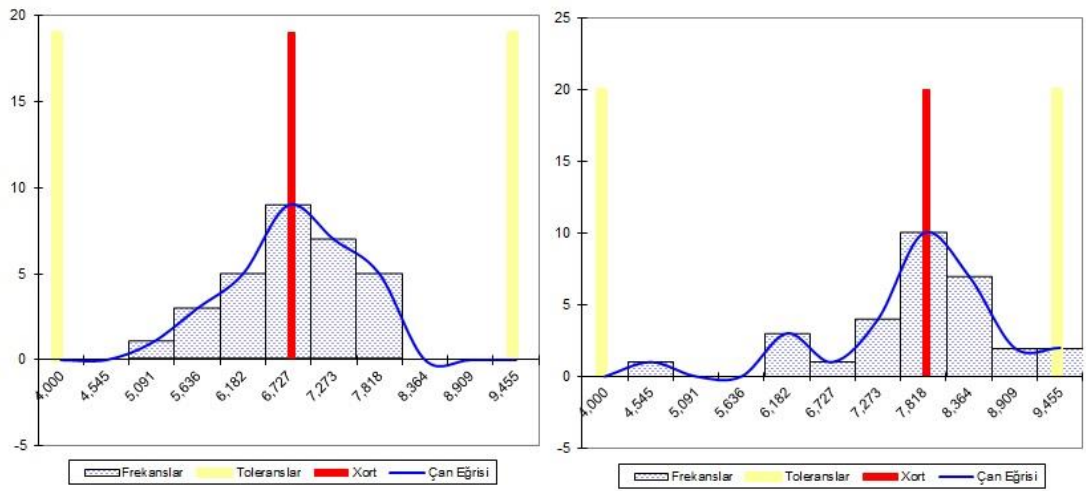
Şekil 6.8: Manuel ve SPM konumlandırılmalı kontrol grafiklerinin karşılaştırılması.

Şekil 6.8'de görüldüğü gibi SPM ile konumlandırılma yapılarak gerçekleştirilen ölçümler nominal değerin etrafında dağılım gösterirken, manuel konumlandırılarak gerçekleştirilen ölçümlerde değerler üst tolerans ve nominal değerler arasında dağılım göstermiştir. Bu durum SPM kullanılarak gerçekleştirilen ölçümlerde sigma aralığının çok daha geniş olmasına, manuel konumlandırılarak gerçekleştirilen ölçümlerde sigma aralığının dar olmasına neden olmuştur.

Manuel olarak gerçekleştirilen ölçümler ile SPM kullanılarak gerçekleştirilen ölçümler Şekil 6.8 dikkatli incelendiğinde yönelim olarak benzerlik göstermektedir.

Manuel konumlandırma ile yapılan ölçümler SPM ile yapılan ölçümlerin üst tolerans alanına doğru ötelenmesi ile oluşmuş gibi görülmektedir. Bu durum benzer yüzey kalitesine sahip ürünlerin tam olarak ölçüm yüzeyi ölçüm ucu dikliği sağlanamadan ölçülmesinden kaynaklanmıştır. Düzgün konumlandırma SPM kullanılarak sağlandığında ölçümlerin nominal değerler etrafında dağılım gösterdiği görülmektedir.

Şekil 6.9’da soldaki grafikte SPM ile konumlandırılarak gerçekleştirilen ölçümlere ait, sağda ise manuel konumlandırılarak gerçekleştirilen ölçümlere ait sigma grafiği gösterilmektedir.



Şekil 6.9: SPM ile ve manuel konumlandırılarak ölçülen ürünlerin sigma grafikleri.

Şekil 6.9’da SPM kullanılarak yapılan ölçümler sonucu meydana gelen sigma grafiği 4,25 sigma seviyesini göstermektedir. Meydana gelen çan eğrisi ideal çan eğrisi dağılımına yakındır. Sağda ise manuel konumlandırma ile gerçekleşen ölçümlerin sigma grafiği gösterilmiştir ve sigma seviyesi 1,9 olarak görülmüştür.

Şekil 6.9 detaylı olarak incelendiğinde kontrol diyagramlarının karşılaştırılmasında anlatılan dağılım benzerliği burada daha net olarak görülmektedir. Manuel konumlandırılarak yapılan ölçümlerdeki dağılım SPM kullanılarak gerçekleştirilen ölçümlerin üst tolerans limitine doğru ötelenmiş durumu gibidir. Bu durum manuel konumlandırma esnasında yapılan hataların sonucu olarak meydana çıkmaktadır.

Yapılan ölçümler sonucunda hassas yüzey pürüzlülük ölçümlerinde kusursuz ölçüm yüzeyi ölçüm ucu dikliğinin ölçüm sonuçlarına olan etkisi incelenmiş ve önemi görülmüştür. Minimum Rz4 maksimum Rz10 yüzey pürüzlülük toleransları dahilinde

talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilmeden üretilen ürün yüzeyi doğru bir şekilde üretilmesine rağmen gerçekleştirilen hatalı ölçümler sonucu istenilen yeterlilik indisini sağlayamadığından sürekli olarak kontrol edilmektedir. Bu durum ürünün üretilmesinde harcanan maliyeti ciddi oranda arttırmakta ve bazen doğru olarak üretilen ürünün hurdaya ayrılmasına sebep olmaktadır. Eğim sensörü ile ölçüm yüzeyinin yatay eksen ile yaptığı açı ölçülerek SPM'nin hareketli platformunun bu açıyı sıfır konumuna getirmesiyle kusursuz bir ölçüm yüzeyi ölçüm ucu dikliği oluşturulmakta ve yapılan ölçümler minimum hata ile elde edilmektedir.

SPM kullanılarak elde edilen ölçümler sonucunda mevcut durumda $C_{pk}=0,65$ olan proses yeterlilik indisi müşteri isteği olan 1,33 değerinin üzerine çıkarak $C_{pk}=1,41$ olarak elde edilmiştir. Bu değer sigma 4,25 seviyesine karşılık gelmekte ve üretilen 1.000.000 adet üründen yalnızca 3000 adet hatalı ürün üretileceğini istatistiksel olarak kanıtlamaktadır.

Hesaplanan yeni yeterlilik indisinin sonucu olarak mevcut durumda yüzde yüz olarak kontrol edilen soğutucu parçasının yüzey pürüzlülük değeri 14 günde bir 30 adet parçanın istatistiksel proses kontrolü sıklığına düşürülmüştür.

Ürünlerin ölçümden önce istenilen konumlarına getirilmesi için üretilen stewart platformu mekanizmasıyla konumlama operatörün kabiliyetinden, deneyiminden ve kontrolünden çıkartılarak ölçümü yapan her operatörde aynı sonuçların alınması amaçlanmış ve sağlanmıştır. SPM'nin kullanılmasıyla konumlama yapılırken harcanan zaman kısalmakta ve mengene yardımıyla konumlarken zorluk yaşanan geometrisi bu işlem için uygun olmayan ürünler bile kolayca ve fazla zaman harcanmadan konumlandırılabilir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada paralel platformların hassas konumlandırma kabiliyetlerinden yararlanılarak yüzey pürüzlülük ölçümü yapılacak ürünlerin ölçüm yüzeylerinin profilometrenin ölçüm ucuyla tam 90°'lik açıya sahip olacak şekilde konumlandırılması gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçüm yöntemleri ve yüzey pürüzlülük teorisi araştırılmış ve hassas yüzey pürüzlülük ölçümlerinde sıklıkla karşılaşılan hatalar sunulmuştur. Bu çalışmada örneklenen yüzey pürüzlülük ölçüsü gibi krtitik karakteristiğe sahip ölçülerin tolerans limiteri dahilinde üretilebileceğini kanıtlayan ve zorunlu olarak yapılan istatistiki yöntemler ve hesaplamalar anlatılmış ve sunulan sistemin istatistiksel olarak proses yeterliliğine katkısı araştırılmıştır. Sunulan çözüm sayesinde yüzey pürüzlülük ölçüm prosesinin istatistiksel olarak yeterliliğinin artırılması sağlanmış ve kontrol sıklığı önemli ölçüde azaltılarak üretim maliyetleri düşürülmüştür.

SPM'nin hareketli platformunun alması gerektiği konum bilgisi, robotun kontrolcüsüne seri olarak bağlı olan mikrodenetleyicinin kontrol ettiği bir eğim sensörü ile sağlanmıştır. Bunun için ilk olarak mevcut eğim sensörlerinin çalışma prensipleri araştırılmış ve uygulama için uygun eğim sensörünün seçimi yapılmıştır. SPM'nin hassas konumlandırılması için gereken eyleyiciler araştırılmış ve bu eyleyicilerin mikroadımlama teorisi ile hassas bir şekilde çalışmasını sağlayacak sürücü devrelerinin ve bu sürücü devrelerine uygun elektronik devre elemanlarının seçimi yapılmıştır.

SPM'nin tasarımı için bir tasarım prosedürü oluşturulmuş ve yüzey pürüzlülük ölçümlerinde istenilen verimde kullanılabilmesi için tasarım gereklilikleri incelenmiştir. Bu tasarım gereklilikleri doğrultusunda rotasyonel SPM'nin 3 boyutlu tasarımı Solidworks yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistemin mekanik modellemesi Matlab/Simulink yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve kurulan mekanik model yine Simulink yazılımı kullanılarak ters kinematik denklemlerle kontrol edilmiş ve sonuçlar gözlenmiştir.

SPM'nin pozisyon kontrolünde ters kinematik denklemlerden yararlanılmıştır. Ters kinematik denklemler geometrik çözümleme ile elde edilmiş ve Matlab/Simulink yazılımı kullanılarak simülasyonu yapılmış ve doğrulanmıştır.

SPM'nin kontrol programı, eğim sensörünün kalibrasyon ve kontrol programı ve SPM ile eğim sensörünün seri haberleşmesini sağlayacak program C++ yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve kurulan algoritmalar AVR-ATmega2560 mikrodenetleyicisine arduino yazılımına çevrilerek aktarılmıştır.

Oluşturulan sistem ile birlikte yüzey pürüzlülük ölçümlerinde ölçüm numunelerinin rotasyonel bir RSS-SPM ile konumlandırılması ilk kez yapılmış ve bu proses operatör dikkatinden bağımsız hale getirilerek yeni sistemin katkısı incelenmiştir.

Bu aşamadan sonra yazar yüzey pürüzlülük ölçümlerinde konumlandırmada kullanılan bu otomasyon sisteminin verimini arttırmak adına aşağıda belirtilen paralel çalışmaların katkısı olacağını düşünmektedir.

Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde kullanılan mekanik profilometrenin ölçüm ucu düzgün konumlandırılmamış parçalarda dahi ölçüm yapabilmek adına esneyebilen bir manivelaya sahiptir. Ancak bu esneme ile birlikte ölçüm sonuçları gerçek değerlerini tam olarak yansıtamadığından bu çalışmada sunulan çözüm bu hatayı engellemeye yöneliktir. Ancak ölçüm yüzeyi otomasyon sistemi ile düzgün olarak konumlansa da ölçüm ucu operatör yardımıyla yüzeye yerleştirildiğinden, ölçüm ucunun konumlandırılması hala operatör dikkatine bağımlı haldedir. Ölçüm ucu gereken temastan daha fazla parçaya yaklaştırıldığında manivelanın esnemesine ve hatalı sonuçların alınmasına sebep olabilir. Yine bu durum ölçüm ucunun zamanla zarar görmesine de neden olabilir. Bu işlemin de operatörden bağımsız hale getirilmesi bu aşamada verimi arttırıcı bir çalışma olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Barlow, R. E. & Irony, T. Z.** (1992). Foundations of statistical quality control, University of California Berkeley
- [2] **Richard M. Murray, Zexiang Li, S. Shankar Sastry** (1994). A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, *CRC Press*
- [3] **A Survey Y. D. Patel1, P. M. George** (2012). Parallel Manipulators Applications, <http://dx.doi.org/10.4236/mme.2012.23008>, *Published Online*
- [4] **İbrahim Yıldız, Vasfi Emre Ömürlü, Zeynep Ekicioğlu, Alper Güney** (2011). 6 Serbestlik Dereceli Paralel Mekanizmadaki İleri Kinematik Analiz Yöntemleri, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- [5] **J.-P. MERLET,** Parallel Robots (Second Edition), ISBN-10 1-4020-4132-2 (HB)
- [6] <http://archives.sensormag.com/articles/0903/14/main.shtml> 14.02.2015 23.55
- [7] **Pınar Demircioğlu** (2011). Talaşlı imalat yöntemiyle imal edilen iş parçalarında yüzey pürüzlülüğünün yüksek hassasiyette iğne uçlu ve 3d optik ölçüm sistemleriyle değerlendirilmesi, Mühendis ve makine Cilt 52 sayı 613 sy:82-91
- [8] https://www.researchgate.net/publication/275406677_Modeling_of_Forces_During_The_Measurement_in_contact_mode_AFM
- [9] **Cem C. Olcayto** (1996). Kesici takım üretiminde ısıtma işlem aşamasının ürün kalitesine etkisi ve istatistiksel proses kontrol yardımı ile ısıtma işlem uygulamalarının gözetimi, İstanbul Technical University FBE
- [10] **Ebru Karaca** Üretim Sürecinde İstatistiksel Proses Kontrol(İPK) Uygulamaları Ve Elektronik Sektöründe Bir İnceleme, Marmara Üniversitesi FBE
- [11] **Bülent Tütmez** (2011). Cevher hazırlamada istatistiksel proses kontrol ve uygulaması, Çukurova üniversitesi FBE
- [12] **Peter Donelan.** Singularities of Robot Manipulators, School of Mathematics, Statistics and Computer Science
- [13] **Bhaskar Dasgupta, T.S. Mruthyunjaya** (2010). The Stewart Platform: A Review, Mechanism and Machine Theory 35, 15-40

- [14] **Burak Ulaş** (2009) Stewart Platformu Tasarımı, Istanbul Technical University FBE
- [15] **Özer Ulucay** (2006) Design and control of stewart platform, Sabancı University FBE
- [16] **Xiaochun Guan, Biyuan Shen** (2014) Application Research of Stepper Motor Control with TMS320F2812, Applied Mechanics and Materials Vols. 556-562 pp 2544-2548
- [17] **Milli Eğitim Bakanlığı** Step Motor Ve Sürülmesi
- [18] **Erdal Delebe** (2011) Arduino, Kodlab Yayıncılık
- [19] **Stefan Staicu** (2011) Dynamics of the 6-6 Stewart parallel manipulator, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 27 212–220 doi:10.1016/j.rcim.2010.07.011
- [20] **Rene Graf and Rüdiger Dillmann** (1999) Acceleration Compansation Using a Stewart Platform on a Mobile Robot, doi:10.1109/EURBOT.1999.827617
- [21] **Aiqiu Zuo and Q.M. Jonathan Wu, William A. Gruver** (2002) Stereo Vision Guided Control of a Stewart Platform, Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Intelligent Control Vancouver, Canada
- [22] **Tej Dallej, Nicolas Andreff, Youcef Mezouar, Philippe Martinet Gruver** (2006) 3D Pose Visual Servoing Relieves Parallel Robot Control from Joint Sensing, Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems October 9 - 15, 2006, Beijing, China
- [23] **M. Girone, G. Burdea, M. Bozuit AND V. Popescu** (2001) A Stewart Platform-Based System for Ankle Telerehabilitation, Autonomous Robots 10, 203–212 Kluwer Academic Publishers
- [24] **T. JeyapoovanM. Murugan, B. Clemend Bovas** (2012) Statistical Analysis of Surface Roughness Measurements Using Laser Speckle Images, 978-1-4673-4805-8/12 IEEE
- [25] **Andrzej W. Domanski and Tomasz R. Woliriski** (1992) Surface Roughness Measurement with Optical Fibers, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL 41, NO 6
- [26] **Bhaskar Dasgupta and T.S. Mruthyunjaya** (1998) A Newton-Euler formulation for the inversed dynamics of the stewart platform manipulator, Mech. Mach. Theory Vol. 33, No. 8, pp. 1135-1152,
- [27] **Yangmin Li and Qingsong Xu** (2007) Kinematic analysis of a 3-PRS parallel manipulator, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 23 (2007) 395–408
- [28] <http://ocw.mit.edu/courses/mathematics/18-05-introduction-to-probability-and-statistics-spring-2014/> 25.01.2015 14.22

- [29] <http://www.mmsonline.com/columns/surface-finish-measurement-errors>
11.10.2014 09.30
- [30] **Dwarakanath, T.A., Dasgupta, B. and Mruthyunjaya, T. S.,**(2001) Design and development of a Stewart platform based force-torque sensor, *Mechatronics*, v. 11 (2001) pp. 793-809.
- [31] **Nabil Simaan,**(1999) Analysis and Synthesis of Parallel Robots for Medical Applications, Faculty of Mechanical Engineering Technion Israel Institute of Technology.
- [32] <http://biotsavart.tripod.com/hexapod.htm> 05.02.2015

EKLER

EK A1: Sigma Dönüşüm Tablosu

EK A2: İPK Sabitleri

EK B: Robot Parametreleri

EK C: Ters Kinematik Algoritması

EK D: Inverse Kinematics Module Detayları

EK E: Eyleyici Teknik Şeması

EK F: Polulu A4988 sürücü devre şeması

EK G:Rumba Mikrodenetleyici Eyleyici ve Anahtar Şeması

EK A

EK A.1

Çizelge A.1: Sigma Dönüşüm Tablosu

1 Milyon Üretimde		
Hata	Sigma Seviyesi	Cpk
933200	0,000	0,000
915450	0,125	0,042
894400	0,250	0,083
869700	0,375	0,125
841300	0,500	0,167
809200	0,625	0,208
773400	0,750	0,250
734050	0,875	0,292
691500	1,000	0,333
645650	1,125	0,375
598700	1,250	0,417
549750	1,375	0,458
500000	1,500	0,500
450250	1,625	0,542
401300	1,750	0,583
354350	1,875	0,625
308500	2,000	0,667
265950	2,125	0,708
226600	2,250	0,750
190800	2,375	0,792
158700	2,500	0,833
130300	2,625	0,875
105600	2,750	0,917
84550	2,875	0,958
66800	3,000	1,000
52100	3,125	1,042
40100	3,250	1,083
30400	3,375	1,125
22700	3,500	1,167
16800	3,625	1,208
12200	3,750	1,250
8800	3,875	1,292
6200	4,000	1,333
4350	4,125	1,375
3000	4,250	1,417
2050	4,375	1,458
1300	4,500	1,500
900	4,625	1,542

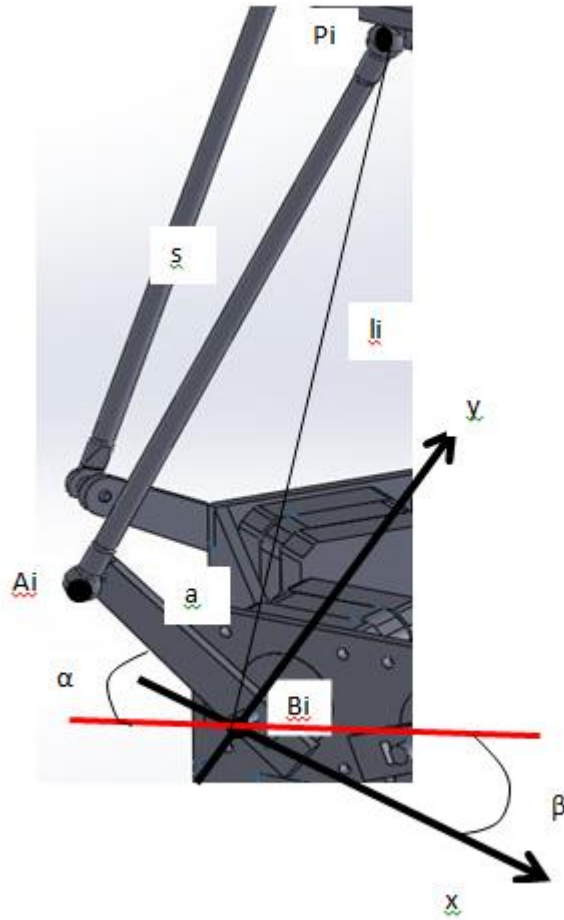
600	4,750	1,583
400	4,875	1,625
230	5,000	1,667
180	5,125	1,708
130	5,250	1,750
80	5,375	1,792
30	5,500	1,833
23,4	5,625	1,875
16	5,750	1,917
10,1	5,875	1,958
3,4	6,000	2,000

EK A.2

Çizelge A.2: İPK sabitleri

Subgroup	X-bar chart		S-chart		R-chart	
	Using Ra	Using Sa				
<i>n</i>	A2	A3	B3	B4	D3	D4
2	1.886	2.659	0	3.267	0	3.268
3	1.023	1.954	0	2.568	0	2.574
4	0.729	1.628	0	2.266	0	2.282
5	0.577	1.427	0	2.089	0	2.114
6	0.483	1.287	0.03	1.97	0	2.004
7	0.419	1.182	0.118	1.882	0.076	1.924
8	0.373	1.099	0.185	1.815	0.136	1.864
9	0.337	1.032	0.239	1.761	0.184	1.816
10	0.308	0.975	0.284	1.716	0.223	1.777
11	0.285	0.927	0.322	1.678	0.256	1.744
12	0.266	0.886	0.354	1.646	0.283	1.717
13	0.249	0.85	0.382	1.619	0.307	1.693
14	0.235	0.817	0.407	1.593	0.328	1.672
15	0.223	0.789	0.428	1.572	0.347	1.653

EK B



Şekil B1: Stewart platformu uzuvlarının boyutlandırılması

Robot Parametreleri

$s=167.5$

$a=50;$

$P_{1,2}=[0;-82.5;-10];$

$P_{3,4}=[-71.4471;41.29;-10]$

$P_{5,6}=[71.4471;41.29;-10]$

$B_1=[23.48648;-79.08625;0]$

$B_2=[-23.48648;-79.08625;0]$

$B_3=[-80.23394;19.20323;0]$

$B_4=[-56.74746;59.88301;0]$

$B_5=[56.74746;59.88301;0]$

$B_6=[80.23394;19.20323;0]$

$\beta_1=0, \beta_2=-120, \beta_3=-240$

EK C

Ters kinematik denklemlerin doğrulunun ispatlandığı simulink modelinde kullanılmak üzere geliştirilen algoritma aynı zamanda m-file olarak yazılarak bu bölümde verilmiştir.

```
%Robot parametreleri
s=167.5;a=50;
p_12=[0;-82.5;-10];
p_34=[-71.4471;41.29;-10];
p_56=[71.4471;41.29;-10];
b1=[23.48648;-79.08625;0];b2=[-23.48648;-79.08625;0];b3=[-
80.23394;19.20323;0];
b4=[-
56.74746;59.88301;0];b5=[56.74746;59.88301;0];b6=[80.23394;19.20323;
0];
beta1=0;beta2=-120;beta3=-240;
%-----%
%Değişken girişleri
U=input('Roll açısı değerini giriniz: ');
V=input('Pitch açısı değerini giriniz: ');
W=input('Yaw açısı değerini giriniz: ');
Tx=input('X eksenindeki yer değiştirmeyi giriniz: ');
Ty=input('Y eksenindeki yer değiştirmeyi giriniz: ');
Tz=input('Z eksenindeki yer değiştirmeyi giriniz: ');
T=[Tx;Ty;Tz+160];
R=[cosd(W)*cosd(V) -sind(W)*cosd(U)+cosd(W)*sind(V)*sind(U)
sind(W)*sind(U)+cosd(W)*sind(V)*cosd(U)
sind(W)*cosd(V) cosd(W)*cosd(U)+sind(W)*sind(V)*sind(U) -
cosd(W)*sind(U)+sind(W)*sind(V)*cosd(U)
-sind(V) cosd(V)*sind(U) cosd(V)*cosd(U)];
%-----%
%Bacak boyları
l1=T+R*p_12 - b1;
l2=T+R*p_12 - b2;
l3=T+R*p_34 - b3;
l4=T+R*p_34 - b4;
l5=T+R*p_56 - b5;
l6=T+R*p_56 - b6;
q1=T+R*p_12;
q2=T+R*p_12;
q3=T+R*p_34;
q4=T+R*p_34;
q5=T+R*p_56;
q6=T+R*p_56;
L1=norm(l1);
L2=norm(l2);
L3=norm(l3);
L4=norm(l4);
L5=norm(l5);
L6=norm(l6);
%-----%
%ALFA açısı hesabı
K1=L1^2-(s^2-a^2);
```

```

M1=2*a*(q1(3)-b1(3));
N1=2*a*(cosd(beta1)*(q1(1)-b1(1))+sind(beta1)*(q1(2)-b1(2)));
alfa1=asind(K1/sqrt(M1^2+N1^2))-atand(N1/M1);
%-----%
K2=L2^2-(s^2-a^2);
M2=2*a*(q2(3)-b2(3));
N2=2*a*(cosd(beta1)*(q2(1)-b2(1))+sind(beta1)*(q2(2)-b2(2)));
alfa2=asind(-K2/sqrt(M2^2+N2^2))-atand(N2/M2);
%-----%
K3=L3^2-(s^2-a^2);
M3=2*a*(q3(3)-b3(3));
N3=2*a*(cosd(beta2)*(q3(1)-b3(1))+sind(beta2)*(q3(2)-b3(2)));
alfa3=asind(K3/sqrt(M3^2+N3^2))-atand(N3/M3);
%-----%
K4=L4^2-(s^2-a^2);
M4=2*a*(q4(3)-b4(3));
N4=2*a*(cosd(beta2)*(q4(1)-b4(1))+sind(beta2)*(q4(2)-b4(2)));
alfa4=asind(-K4/sqrt(M4^2+N4^2))-atand(N4/M4);
%-----%
K5=L5^2-(s^2-a^2);
M5=2*a*(q5(3)-b5(3));
N5=2*a*(cosd(beta3)*(q5(1)-b5(1))+sind(beta3)*(q5(2)-b5(2)));
alfa5=asind(K5/sqrt(M5^2+N5^2))-atand(N5/M5);
%-----%
K6=L6^2-(s^2-a^2);
M6=2*a*(q6(3)-b6(3));
N6=2*a*(cosd(beta3)*(q6(1)-b6(1))+sind(beta3)*(q6(2)-b6(2)));
alfa6=asind(-K6/sqrt(M6^2+N6^2))-atand(N6/M6);

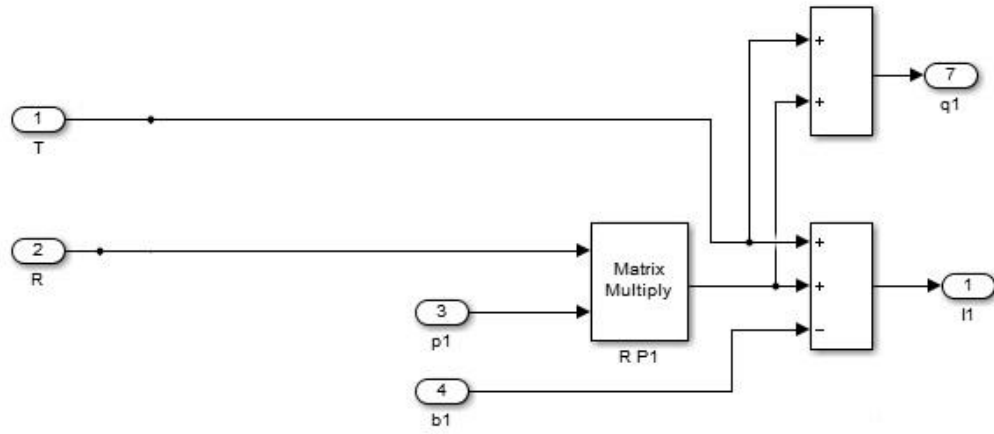
```

Bu algoritma çalıştırılıp 5 serbestlik derecesi “0” girilip yalnızca z eksenindeki hareket “+30” olarak girildiğinden eyleyici konumları aşağıdaki gibi olmaktadır.

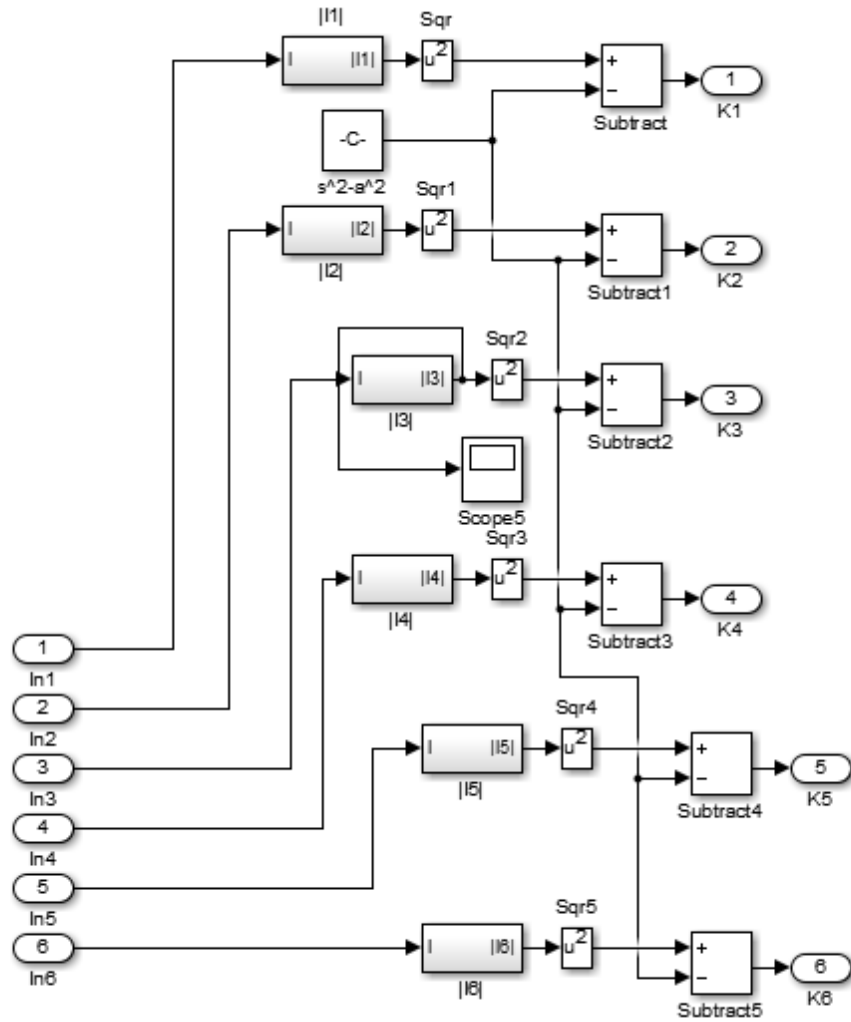
$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = 31,59^\circ$$

EK D

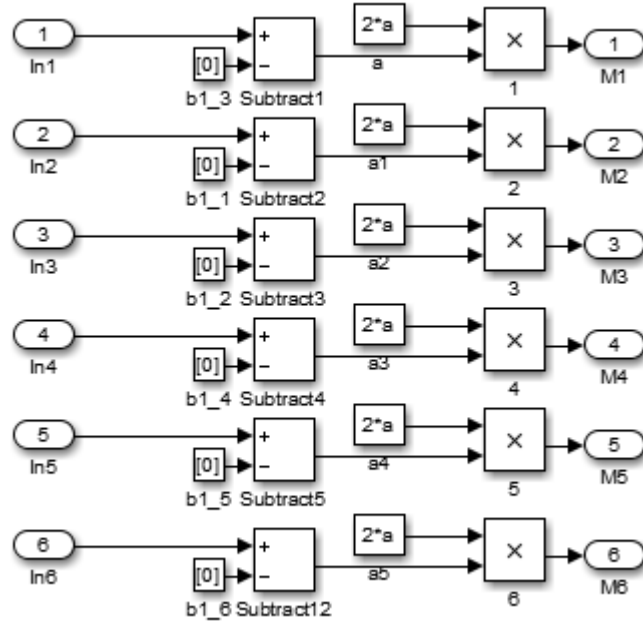
Inverse Kinematics Module bloğu elde edilmesi istenen serbestlik derecesi değerlerine göre uzuv değerlerinin hesaplandığı bloktur. Bu blok rotasyonel stewart platformunda hayali olarak hesaplanan bacak uzunluk değerinin hesaplanmasında kullanılır. K, M ve N blokları bölüm 4’de hesaplanan denklem 4.24’ün trigonometrik forma benzetilmesi ile oluşturulan değerlerin hesaplandığı bloklardır. Angle computation bloğu ise denklem 4.25’de hesaplanan ters sinus ve ters tanjant değerlerinin hesaplandığı bloklardır.



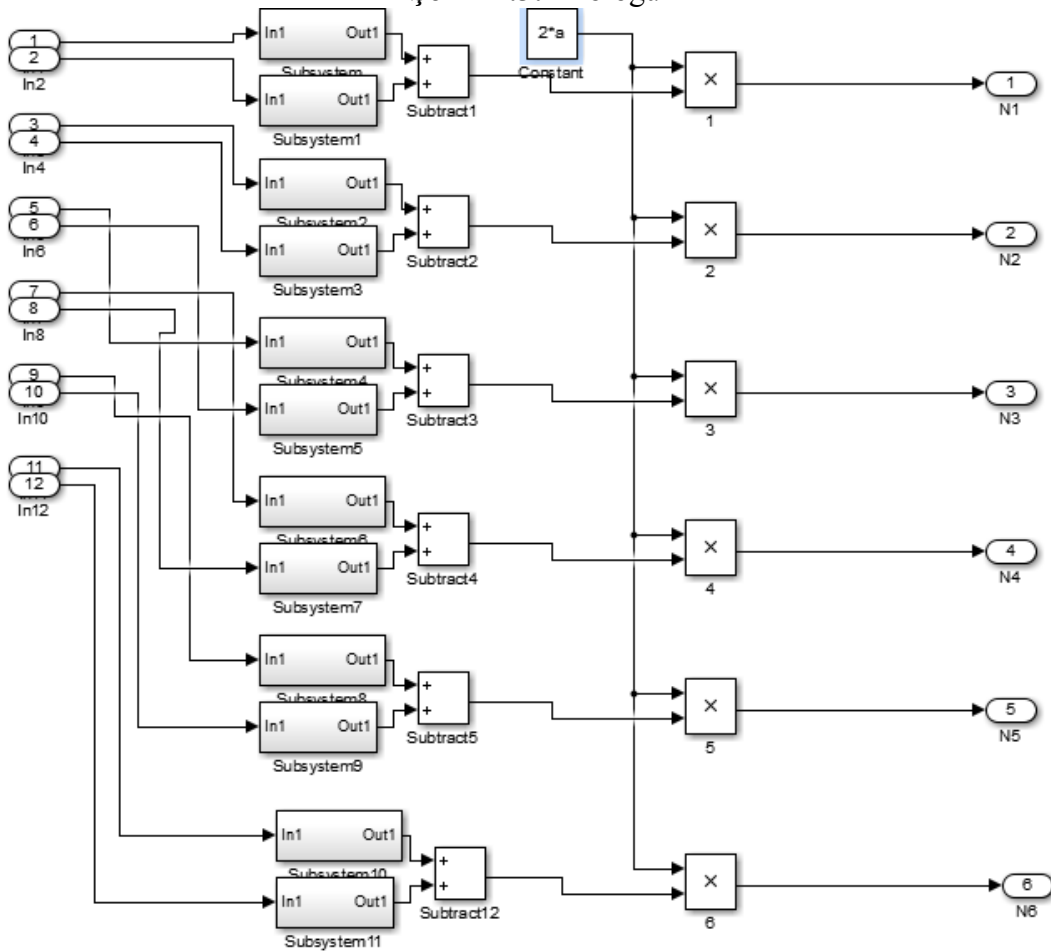
Şekil D.1: l_1 değeri için leg length computation bloğu



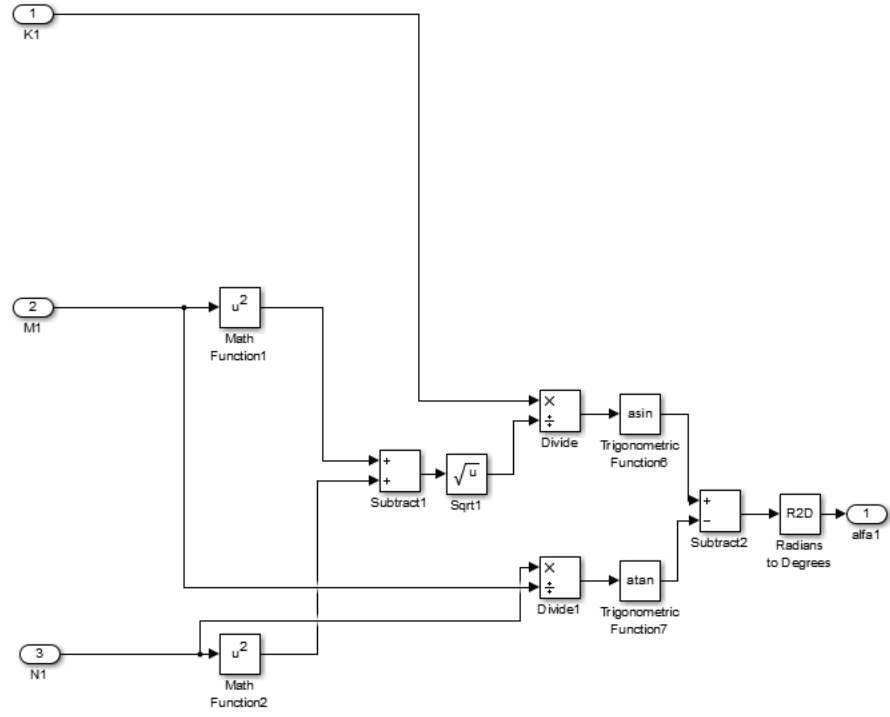
Şekil D.2: K bloğu



Şekil D.3: M bloğu

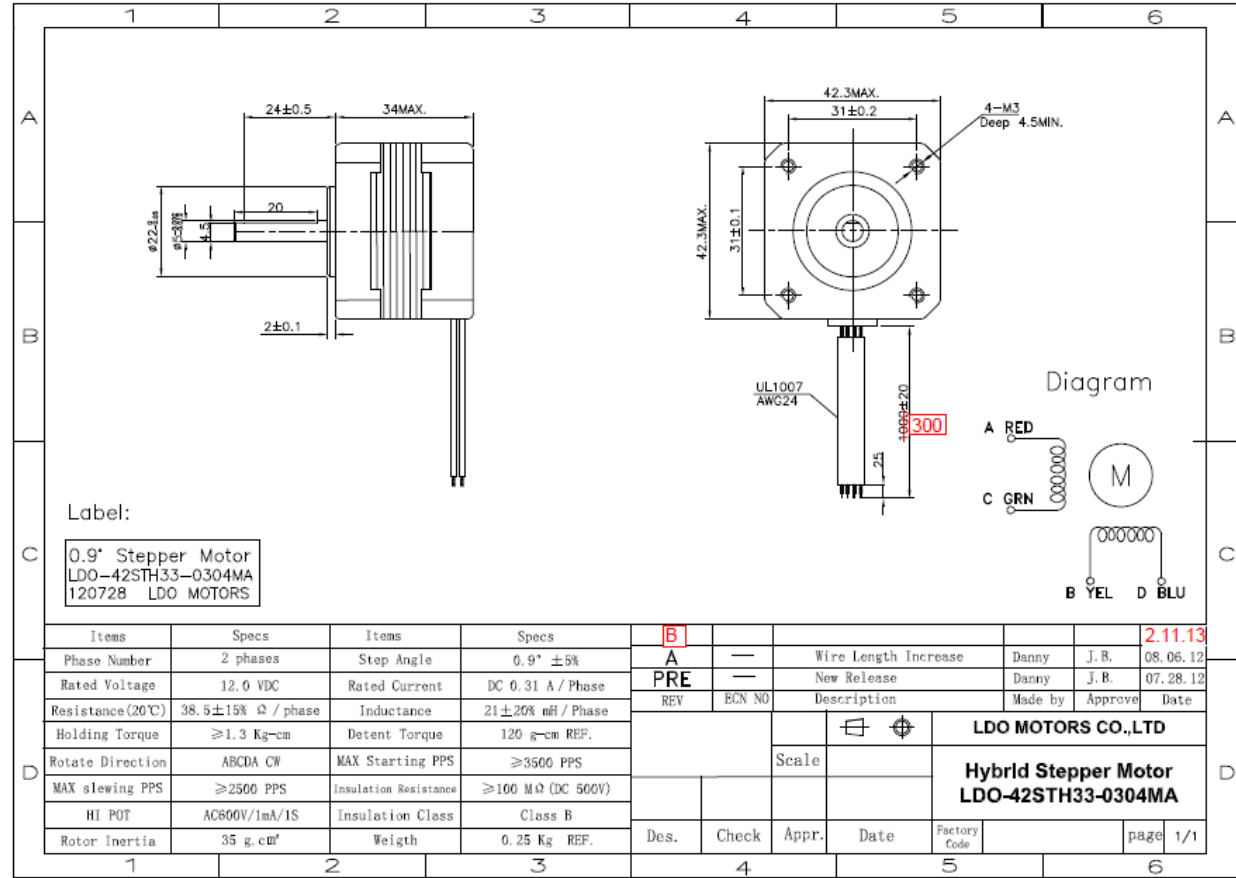


Şekil D.3: N bloğu



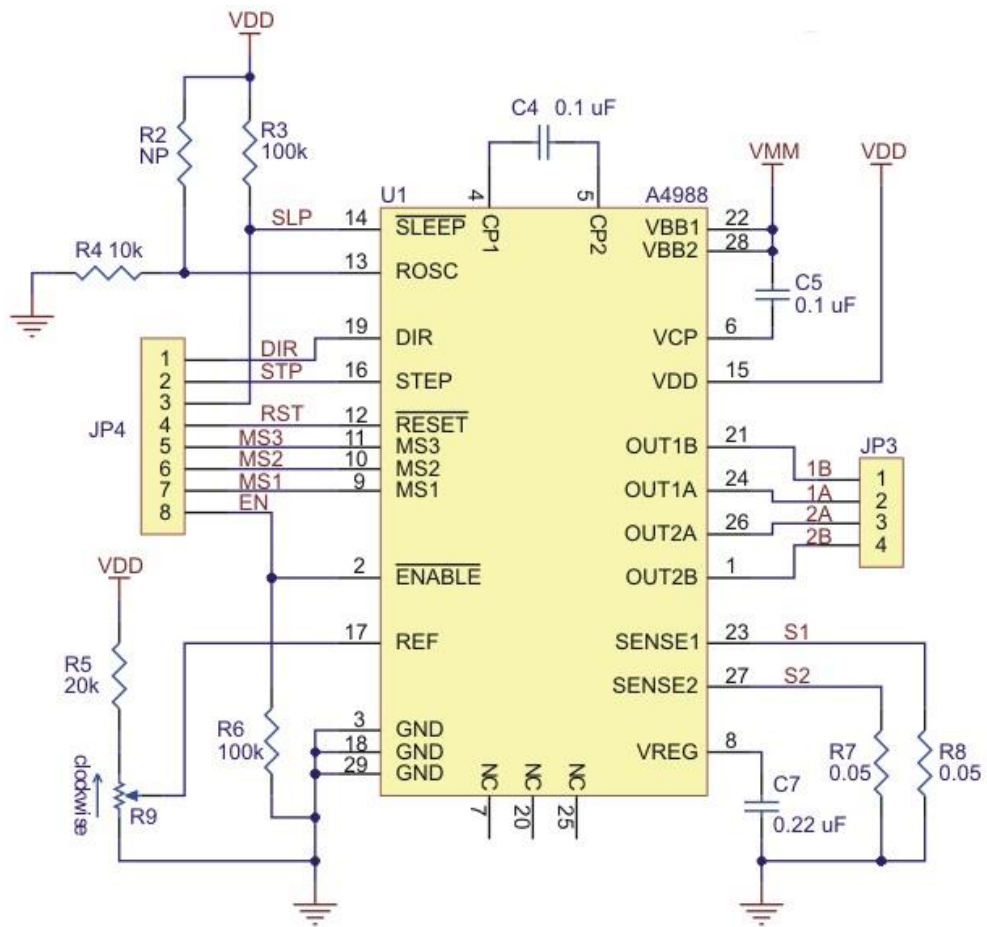
Şekil D.4: α_1 değeri için angle computation bloğu

EK E



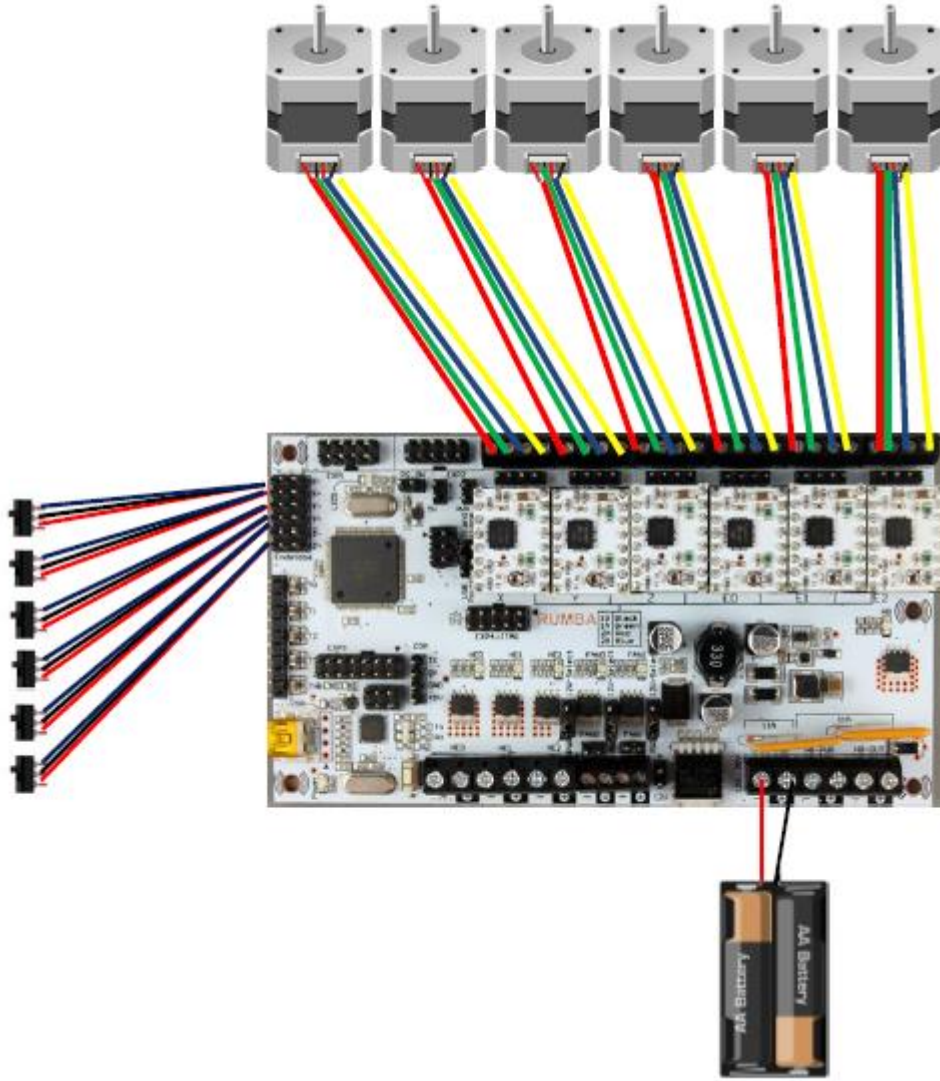
Şekil E.1: Nema 17 step motor teknik şeması

EK F



Şekil F.1: Polulu A4988 sürücü devre şeması

EK G



Şekil G.1: Rumba mikrodnetleyici eyleyici ve anahtar şeması

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad

:Enes Uğuroğlu

Doğum Yeri ve Tarihi

:Üsküdar 01.08.1988

E-Posta

:euguroglu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

• **Lisans**

: 2011, Dumlupınar Üniversitesi, Makine Mühendisliği