

# Çift Bomlu Ekskavatörlerde Kepçe Pozisyonunun Belirli Limitasyonlar Altında Tahmini

## Excavator Two Boom Pieces Mechanism Bucket Edge Position Estimation with Digital Constraints

Ufuk Akpınarlı<sup>1</sup>, Ekin Cansu Özkan Öztürk<sup>1</sup>, İlhan Varol<sup>1</sup>, Yavuz Samim Ünlüsoy<sup>2</sup>, Klaus Werner Schmidt<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hidromek-Hidrolik ve Mekanik Makine İmalat Sanayi ve Ticaret A.Ş., Ankara

[ufuk.akpinarli@hidromek.com.tr](mailto:ufuk.akpinarli@hidromek.com.tr)

[ekin.ozkan@hidromek.com.tr](mailto:ekin.ozkan@hidromek.com.tr)

[ilhan.varol@hidromek.com.tr](mailto:ilhan.varol@hidromek.com.tr)

<sup>2</sup>Makina Mühendisliği Bölümü

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

[unlusoy@metu.edu.tr](mailto:unlusoy@metu.edu.tr)

<sup>3</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

[schmidt@metu.edu.tr](mailto:schmidt@metu.edu.tr)

### Özetçe

Operatör yardımcı sistemleri, otomatik mekanizma kontrolü ve makine yönlendirme sistemleri, şantiyelerde operatör ve çevre güvenliğini ve verimliliği artırmak için geniş kullanım alanına sahiptir. Bu çalışmada çift bomlu ekskavatör mekanizması ileri kinematik analiz yöntemi ile geometrik teoremlerle incelenmiştir. Ayrıca, bu ekskavatör mekanizması MATLAB programında modellenmiş ve simüle edilmiştir. Gövdelerin açısını ölçmek için araç ve mekanizma üzerine pozisyon/eğim sensörleri monte edilmiştir. Kinematik hesaplama pozisyon/eğim sensörlerine entegre edilmiştir ve kepçe kenarı konumu araç kontrolöründe hesaplanmıştır. Ayrıca araç gövdesine göre operatör tarafından belirlenen kısıt değerleri ile yükseklik değeri kontrol edilmektedir. Bu işlemler bir ekskavatör üzerinde doğrulanmıştır.

### Abstract

Operator assist systems, automatic mechanism control and machine guidance systems have widely area of usage to increase safety for operators and environment and efficiency in construction work sites. In this study, two boom pieces excavator mechanism is analyzed in terms of forward kinematic analysis method with geometrical theorems. Also, this excavator mechanism is modeled and simulated in MATLAB script. Position/Inclination sensors are mounted on vehicle and mechanism to measure angle of bodies. Kinematic calculation is integrated into position sensors and bucket edge position is calculated in vehicle controller. Moreover, height value is controlled with constraint values determined by operator according to vehicle body. These operations are verified in excavator vehicle.

### 1. Giriş

Ekskavatörler, inşaat, ormancılık ve madencilik alanlarında yaygın olarak kullanılan, kazma, hendek açma ve tesviye işlemlerini gerçekleştiren hafriyat makineleridir. Başlıca iki tip ekskavatör vardır: tekerlekli ve paletli ekskavatör. Bu makinelerin direksiyon davranışları ve alt şasileri birbirinden farklıdır. Buna karşılık kullanım açısından çok işlevli mekanizmaya ve birden fazla işleve sahiptirler. Ekskavatörlerin mekanizma tipleri, uygulamalarda yaygın olan tek bomlu ve çift bomlu mekanizma olarak sınıflandırılır. Ayrıca ekskavatörler, hidrolik tahrik motorlarının yer aldığı rijit alt şaseye sahiptir, ancak ekskavatörlerin üst tarafı 360 derece dönebilir ve kabin, mekanizma ve motor, hidrolik pompalar vb. diğer mekanik parçaları içerir.

Bu bildiride çift bom mekanizmasına sahip ekskavatörde ataşman kontrol sistemi uygulanmaktadır. Bu sistem, araca göre kepçe ucunun konumunu belirler. Operatör, referans çalışma düzlemine göre makine konumunu takip edebilir ve işi daha hassas bir şekilde gerçekleştirebilir. Bu ortam ve veriler kinematik hesaplamalar sayesinde operatöre sunulur. Simülasyon ve yazılım için iki farklı kinematik yaklaşım uygulanmaktadır. Bu sistemde, yükseklik, referans çalışma yörüngesi ve çalışma bölgesi kısıtlamalarını belirlemek için araçtaki sensörlerle kinematik konumlandırma değerlendirilir ve doğrulanır.

Son zamanlarda ekskavatör uygulamalarının gereklilikleri inşaat alanında trend haline gelmiştir. Bu gereksinimler aynı zamanda bu alanda araştırma çalışmalarını da beraberinde getirmektedir. Otonom mekanizma işlemleri, otomatik tesviye

kontrolleri, operatör destek sistemleri en popüler olanlardır ve endüstrinin ilgisini çekmektedir. Bu nedenle, bu uygulamalarda çevre, makine ve operatör güvenliği, iş makineleri için fonksiyonel kontrol vizyonunda daha fazla verimlilikle önemli bir yer edinmektedir. Birçok operatör, inşaat planlarına rağmen yanlış iş döngüleri veya hareketleri uygulamaktadır. Bu sorunlar işgücü ve makinelerde verimsizliğe neden olmuştur. Ataşman kontrol sistemi, kinematik hesaplamalar ve kullanıcı kısıtlamaları ile yönetilen algoritmalar ile bu sorunları önler. Bu algoritmalar, sensör ham verilerinin kinematik hesaplamalarla birlikte işlenmesi ve bunların sensör kalibrasyonu ile bu kinematik hesaplamalara entegrasyonunu içerir. Bu hesaplamalar ekskavatör uygulamasına göre ileri veya ters kinematik analiz olabilir. Ekskavatör çalışma döngülerini çalıştırmak veya yönlendirmek için birçok konum sensörü kullanılabilir. Bunlar, eğim sensörleri, doğrusal değişken yer değiştirme transdüseri (LVDT), ipli enkoder veya eklemlere yerleştirilen açı ölçer olabilir.

Literatüre bakıldığında tek bom mekanizmasına kıyasla çift bom mekanizması için yapılan çalışmalara rastlanmamıştır.

Sun ve arkadaşlarına göre. [1], mekanizmanın konum tahmini dört adımda sınıflandırılır; (1) silindirlerin uzunluğunun ölçülmesi; (2) açı yer değiştirmelerini dolaylı olarak tahmin etmek için bağlantı hareketinin yapılması; (3) açı yer değiştirmelerini doğrudan bilmek; ve (4) hidrolik sistemi dikkate almak. Çalışma, döner mafsal ve silindir uzunluğu olarak iki ileri kinematik analizi tanımlar. Sensör sistemi, hidrolik silindirlerin bağlantı dönüşünü ve uzunluğunu ölçmek için IMU ve ipli enkoder gibi sensörleri içerir. Konum tahmini Yanmar Excavator'da doğrulanır ve bu sensörler doğruluk açısından karşılaştırılır.

Haga ve ark. [2] çalışmalarında, ekskavatör makinesini ve kazma uygulama görevlerini açıklar. Derinlik kontrol sistemi, yumuşak hareketlerle hedef derinliğe ulaşmayı amaçlayan kararlı geliştirme konseptinde geliştirilmiştir. Kontrol sisteminde bom açısı sensörü, kol açısı sensörü, kepçe silindiri strok sensörü ve araç gövdesine monte edilmiş eğim sensörü bulunur. Kontrol ünitesi, kumanda kolu ve sensörlerden gelen değerleri değerlendirir. Sinyallere göre kontrol ünitesi, yükseklik seviyesini kontrol etmek için oransal solenoid valf için sinyal oluşturur.

Zang ve ark. [3] yörünge planlama yöntemi (3) ile ekskavatör kepeçsinin konumunu kontrol eden Autodig'i oluşturmuştur. Çalışmada, ekskavatör mekanizmasının farklı kinematik çözümlerinden bahsedilmiş ve analiz edilmiştir. Üç temel yörünge planlama yöntemi kullanılır: noktadan noktaya hareket, bir dizi noktadan hareket ve operasyonel uzay yörüngeleri (3). Bu bildiriye yörünge planlamasının fonksiyon elde etmesi için zamana ve hıza bağlı vektörler belirlenmiştir. Bu fonksiyon kontrol noktalarına iletilir ve ayrı fonksiyonlar oluşturulur (3). Bu fonksiyonlar kinematik hesaplamalarla birleştirilir. Son adım, aktüatörlerin yer değiştirmelerini ve hızlarını elde etmektir.

Feng ve ark. [4], ekskavatörün (4) yörünge kontrolü için PID kazançlı geliştirilmiş genetik algoritma denetleyicisi tasarlamıştır. Kapalı döngü geri bildirim mekanizması için iki tip sensör vardır. Bunlar, ipli enkoder ve hidrolik silindirler için basınç sensörüdür. Pilot valf sinyali, valfi harekete geçirmek için elektronik sinyale göre değiştirilir. Yörünge kontrolü için ileri ve ters kinematik analizler incelenir. Elektro-hidrolik

sistemin tüm hidrolik parametrelerle matematiksel modeli oluşturulmuş ve Ziegler-Nichols Yöntemi, Cohen-Coon Yöntemi, belirtilen faz ve genlik payları (SPAM) yöntemi, frekans tepkisi (FR) yöntemi, röle geri besleme yöntemi ve kritik oran yöntemi (4) dahil olmak üzere PID kontrolörü tasarlanmıştır. Standart ve Geliştirilmiş Genetik algoritma anlatılmaktadır. Çalışmada, Geliştirilmiş Genetik Algoritma, gerçek zamanlı denetleyici gereksinimlerini karşılamak üzere yörünge kontrolü için PID denetleyici parametrelerini ayarlamakta daha etkilidir (4). Tüm simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve tasarlanan kontrolörleri test etmek ve karşılaştırmak için deney platformu kurulmuştur.

Wind ve ark. [5] yörünge üretimi için model tahminine dayalı kontrolcü geliştirmiştir. Konum ve hidrolik davranış için kinematik ve dinamik modelleri analiz etmişlerdir. Kontrolör, ileri besleme ve geri besleme parçaları içerecek şekilde tasarlanmıştır. Geri besleme kısmı, hız ve konum için bir P denetleyicisidir (5). Yörünge oluşturmada, kartezyen uzayda noktalar tanımlanır ve yörünge, mekanizma limitlerinde (5) istenen sürede düz bir hat üzerinde belirlenen iki nokta arasında hareket eder. Kontrolör için giriş ve durumlar oluşturulur; ivmeler giriş ve hızlardır, konumlar yörünge kontrolü için durumlardır. Sonuçlarda simülasyon ve referans yolu karşılaştırılır. Sonuçta bazı hatalar vardır ancak bu uygulama için kullanılabilir bir yöntemdir.

Lee ve ark. [6], ekskavatörlerin hassas hareket kontrolü için veri odaklı bir model oluşturmuştur. Bom, arm, kova konumlarını hesaplamak için IMU sensörleri kullanılır. Ayrıca hidrolik basınç sensörleri, hidrolik pompa ve silindirlerde bulunur. Yörünge planlaması için nokta bulutu verileri elde etmek üzere inşaat alanı LiDAR ile taranmaktadır [6]. Ekskavatör Modeli ve Ekskavatör Modeli Tersine Kontrol olmak üzere iki model tasarlanmışlardır. Bunlar, veriye dayalı modelin öğrenme adımlarını oluşturur. Ayrıca, çevrimdışı öğrenme süreci için doğrusal olmayan dinamikler ve zemin etkileşimlerini elde etmek için makinenin test verilerini bir araya getirmişlerdir [6]. Tüm deney sonuçları gösterilmiş ve veri odaklı ve PI kontrol yöntemleri karşılaştırılmıştır.

Bu bildirinin devamı aşağıdaki şekilde yapılandırılmıştır. Bölüm 2'de, tüm yapıdaki ekskavatör sisteminin genel tanımı ve iki kinematik yaklaşım bulunmaktadır. Bölüm 3'te ekskavatör mekanizmasının doğrulanması gösterilmektedir. Ayrıca, simülasyon ve test değerlerinin karşılaştırılması sunulmaktadır. Son bölüm ise bu çalışma ile ilgili sonucu içermektedir.

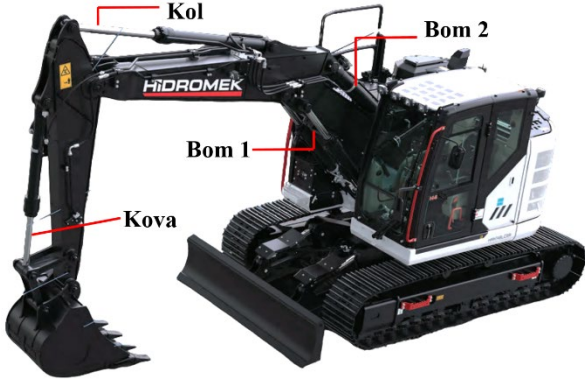
## 2. Ekskavatör Mekanizması

### 1.1. Mekanizmaya Genel Bakış

Çift bom mekanizması tek bom mekanizmasına göre daha fazla kullanım alanına ulaşmayı amaçlamaktadır. Bu mekanizmanın dört ana unsuru vardır: birinci bom aktüatörü, ikinci bom aktüatörü, kol aktüatörü ve kepçe aktüatörü. Bunlar Şekil 1'de gösterilmiştir.

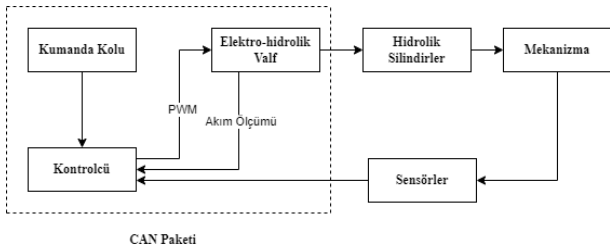
Ekskavatör mekanizmasının hidrolik sisteminde herhangi bir elektronik bileşen yoktur. Hidrolik akış, mekanizma aktüatörlerini manuel olarak çalıştırmak için pilot valflerle kontrol edilir. Ekskavatörün fonksiyonlarını elektronik sinyallerle kontrol etmek için hidrolik sisteme ilk olarak elektro-hidrolik valf bloğu eklenmiştir. Bu elektronik yapı

sağlanırken, tüm fonksiyonlar Can-Bus ağı ile iletişim kuracak şekilde Can-Bus mesajı olarak paketlenir. Ayrıca elektro-hidrolik valflerde bulunan solenoid geri besleme döngüsü ile kontrol edilmelidir. Her kumanda kolu konumu, bir valf açma konumunu temsil eder. Kontrolör, akım ölçüm devresine sahiptir ve akımı kontrol etmek için geri besleme döngüsü oluşturulmuştur. Geri besleme döngüsünde kontrolör, ölçülen akım değerine göre PWM sinyali oluşturur. Sistem genel açıklaması Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Ekskavatör Mekanizması

Mekanizma elemanlarının konumlarını ölçmek için birçok sensör çeşidi bulunmaktadır. Eğim sensörleri, mekanizmanın Can-Bus ağındaki konumunu değerlendirmek için kullanılır. Can-Bus haberleşmesine sahip bu sensörler sayesinde gerçek zamanlı kinematik konum yönlendirmesi sunar. Sensörler, aktüatörlerin mekanizmanın hareketini etkilediği eksen yönlerine göre monte edilmelidir. Mekanizmanın gövde açılarını algılamak için kullanılan tek eksenli eğim sensörleri ve iki eksenli eğim sensörü, aracın eğim ve yuvarlanma açılarını sağlar.



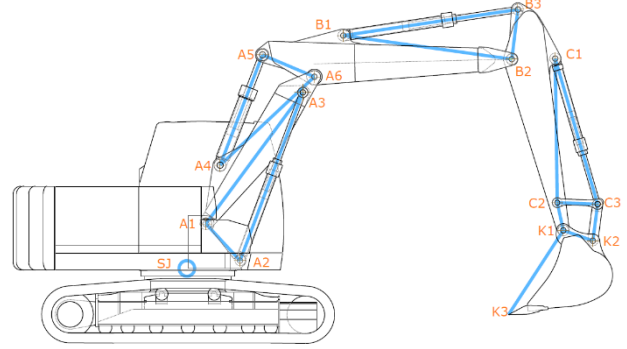
Şekil 2: Sistem Tanımı

Bu çalışmada, çift bomlu ekskavatör mekanizması konumlarına göre analiz edilmiş ve kontrol edilmiştir. İleri kinematik analiz için iki yaklaşım geliştirilmiştir. Bunlardan biri mekanizmalar için geleneksel geometrik yöntem, diğeri ise pratik gömülü yazılım çözümleri için eğim sensörleri verilerinin değerlendirilmesidir.

## 1.2. Simülasyon için İleri Kinematik Yaklaşımı

Aktüatör uzunlukları ve mekanizma açıları arasındaki ilişkiyi çözmek için ileri kinematik yaklaşım geliştirilmiştir. Şekil 3'te tüm noktalar adlandırılmıştır. Bu mekanizmada 16 nokta vardır;

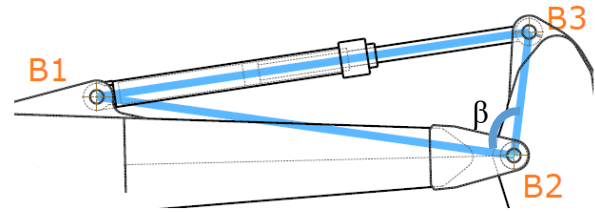
SJ dönüş eksenidir, K3 kepeç kenar noktasıdır, diğer 14 döner mafsal bom, ikinci bom, arm ve kovayı temsil eder. A1 noktası bu mekanizmanın başlangıç noktasıdır. A2'den A3'e, A4'ten A5'e, B1'den B3'e ve C1'den C3'e uzunluk, hidrolik silindirlerin büyüklüğünü temsil eder. Hidrolik silindir strokları, gerçek silindir uzunluk değeri ile tamamen kapalı büyüklük arasındaki fark olarak hesaplanır.



Şekil 3: Mekanizmanın Kinematik Analizi

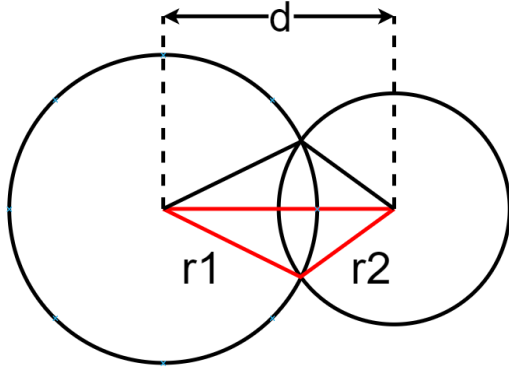
Temel olarak, kosinüs teoremi ve çemberin kesişimi teoremi, ekskavatör mekanizması kinematik analizinde kullanılan yöntemlerdir. Mekanizma, gövdeleri hareket ettirmek için dört hidrolik aktüatöre ve ayrıca kazma-yükleme iş verimliliği için kepeçiyi tamamen kapatmak için bir dört çubuk mekanizmasına sahiptir. Hidrolik aktüatörler ve gövde mafsalları, kosinüs teoremi ile hidrolik silindirlerin strokunu hesaplamak için üçgenler oluşturur, aşağıda Şekil 4 ve Denklem 1'de gösterilmektedir.

$$B1B3^2 = B1B2^2 + B2B3^2 - 2 * B1B2 * B2B3 * \cos(\beta) \quad (1)$$



Şekil 4: Kosinüs Teoremi

Başlangıç konumunun strok değerleri, kinematik hesaplamalarda koordinatları elde etmek için kritik öneme sahiptir. Bu hesaplamada, metodolojiye bağlı olarak strok veya açı uygulanabilir girdiler olabilir. Hesaplama sonucunda doğru açılar elde edilebilir ve kova mekanizmasına kadar döndürme matrisleri ile simülasyon elde edilebilir. Kova silindiri tarafından harekete geçirilen dört çubuk mekanizması ile kova kenar noktası arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Kova mekanizmasının kepeç kenar noktası K3'ü hesaplaması için dört çubuk analizi veya daire kesişimi yöntemi kullanılır. Daire kesişimi Şekil 5'te gösterilmektedir. r1, r2 ve d uzunlukları bilinen noktalar. Çember Kesişim Metodu Denklem 2, 3 ve 4'te belirlenir. Bu yöntemde iki eklem bilinen koordinatları ile yeni bir eklem hesaplanır.

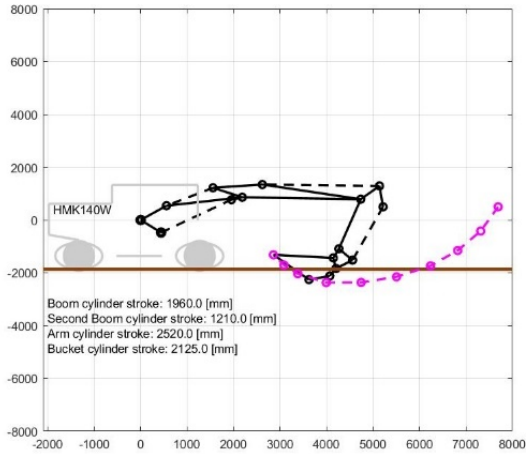


Şekil 5: Çember Kesişim Metodu

$$f = \frac{\sqrt{(d+r_1+r_2)*(d+r_1-r_2)*(d-r_1+r_2)*(r_1-d+r_2)}}{4} \quad (2)$$

$$p_x = \frac{(x_1+x_2)}{2} + \frac{(x_1-x_2)*(r_1^2-r_2^2)}{2*d^2} \mp 2 \frac{(y_2-y_1)}{d^2} * f \quad (3)$$

$$p_y = \frac{(y_1+y_2)}{2} + \frac{(y_1-y_2)*(r_1^2-r_2^2)}{2*d^2} \mp 2 \frac{(x_2-x_1)}{d^2} * f \quad (4)$$



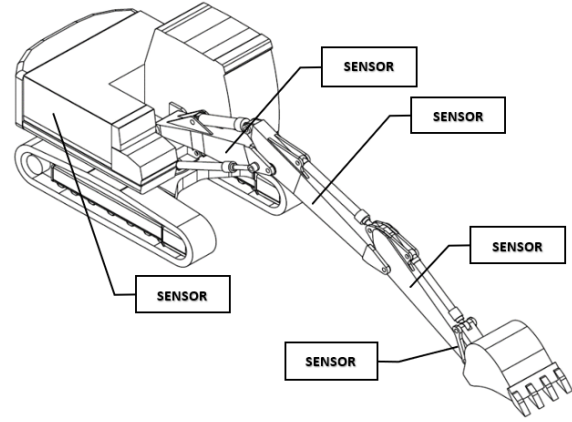
Şekil 6: Simülasyon Çıktısı

MATLAB simülasyonu, dönme matrisleri ve daire kesişim teoremi ile kosinüs teoremlerini içerir. Her bir hidrolik aktüatörü tanımlayan dört giriş vektörü vardır. Tüm eklemler koordinatları ve kova kenarı yörünge noktaları, çizim fonksiyonu aracılığıyla şekilde izlenir. Simülasyon çıktısı Şekil 6'da gösterilmiştir.

## 1.2. Eğim Sensörleri için İleri Kinematik Yaklaşımı

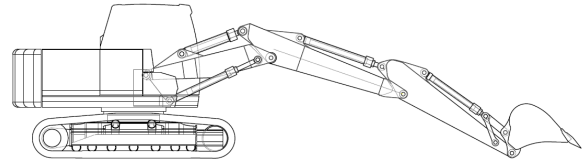
Eğim sensörleri, mekanizma gövdesi ile zemin arasındaki açıları ölçer. Bu nedenle, sensörlerin monte edildiği konum önemlidir. Şekil 7'de monte edilmiş beş sensör gösterilmektedir. Önceki kısımdaki hesaplamalar, gömülü yazılımlar için karmaşık matematiksel işlemleri içerir. Simülasyon girdileri açı ölçümünden farklıdır ve bu hesaplamalar MATLAB simülasyonunda gerçekleşir; ancak gömülü denetleyici, işlem gücü nedeniyle basit bir yazılım

yapısına sahip olmalıdır. Bu nedenle, kontrolörün hesaplama gücüne göre sensör verilerinin hesaplanması için kinematik hesaplamaların basitleştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, bu yaklaşım oluşturulmuştur.



Şekil 7: Mekanizma Üzerine Yerleştirilmiş Eğim Sensörleri

Kalibrasyon, mekanizmanın doğru konumunu hesaplamak için önemli bir işlemdir. Operatörler açısından kalibrasyon pozisyonu geçerli olmalıdır. Düz yüzeyde kalibrasyon için Şekil 8'de gösterilen konum belirlenmiştir. Kalibrasyon pozisyonunun seçiminde en az hata payı oluşturacak durumlara dikkat edilmiştir. Bu nedenle Şekil 8'de görüldüğü gibi 3 adet hidrolik silindirin minimum strot değerine sahiptir.



Şekil 8: Kalibrasyon Pozisyonu Gösterimi

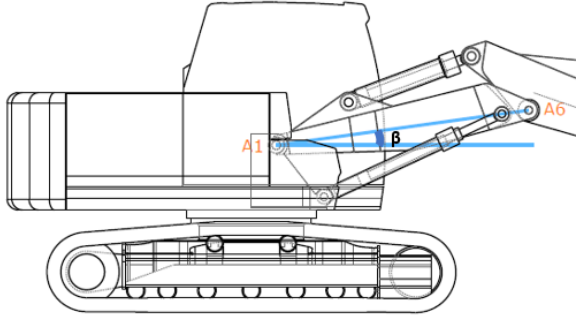
Bu yaklaşım Şekil 9'da gösterilmiştir. Buna göre,

$$A1 = [x_1 \ y_1] \quad (5)$$

$$A6 = [x_6 \ y_6] \quad (6)$$

$$x_6 = x_1 + |A_1 A_6| * \cos(\beta) \quad (7)$$

$$y_6 = y_1 + |A_1 A_6| * \sin(\beta) \quad (8)$$

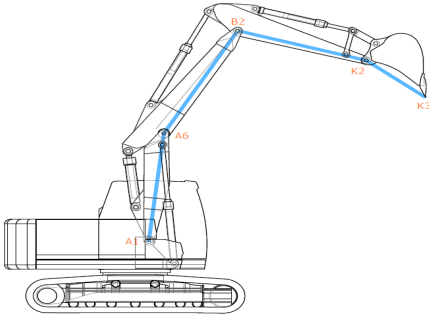
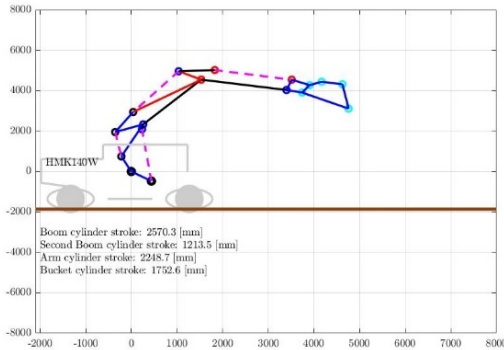


Şekil 9: Örnek Hesaplama için Gösterim

Bu yöntemde önceki yaklaşımdaki gibi tüm mekanizma eklemleri K2 noktasına kadar hesaplanabilmektedir. Kova kenarını hesaplamak için kovadan önce dört çubuk mekanizması analizi veya daire kesişimi uygulanmalıdır. Diğer bir seçenek de nihai bağlantı açısını ve kepçe kenarı konumunu ölçmek ve aralarında ilişki oluşturmaktır.

### 3. Sistem Tanımı ve Doğrulama

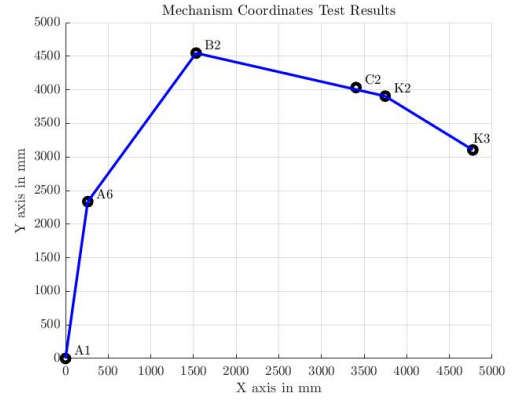
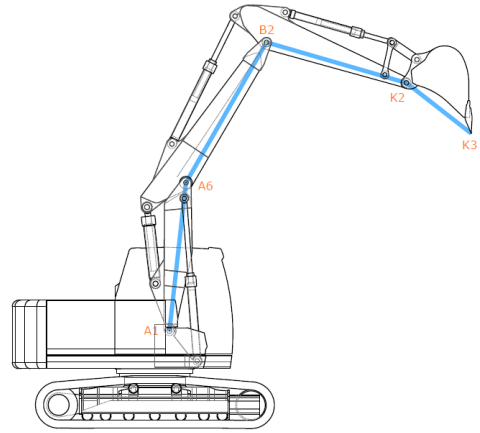
Gömülü yazılımlar için de yaklaşım aynı mantığa dayandığından, öncelikle MATLAB'de geliştirilen simülasyonun CAD verileri ile doğrulanması gerekmektedir. Simülasyonun mekanizma konumu ve CAD modeli Şekil 10'da gösterilmektedir. Tablo 1, mekanizma koordinatları için iki eksende simülasyon çıktıları ve CAD verileri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Değerler arasında küçük bir fark vardır.



Şekil 10: Mekanizma Pozisyonu

Tablo 1: Simülasyon ve CAD Data Sonuçları

	A6	B2	K2	K3
Creo X	261.14	1531.89	3741.24	4761.18
Creo Y	2335.45	4546.25	3906.88	3112.01
Simulation X	261.16	1531.94	3741.24	4761.07
Simulation Y	2335.44	4546.24	3906.71	3111.68
Difference X	0.02	0.05	0.0	0.11
Difference Y	0.01	0.01	0.17	0.33



Şekil 11: Sonuçların Doğrulaması

Belirli durumlar için kalibrasyon uygulandıktan sonra, tüm kalibrasyon parametreleri yazılımda işlenir. Sensör çalışma aralığı, ofset ve çözünürlük dahil olmak üzere sensör veri yapısına göre düzenlenmelidir. Ayrıca her gövde, bir önceki gövdelerin hareketlerinden etkilenir. Bu durum sensör çalışma aralığını etkiler. Sensör aralığını tamamlarken bu etkiyi ortadan kaldırmak için eski değerlerin üzerine yeni değerler eklenerek çalışma aralığı oluşturulmalıdır. Diğer bir yöntem,

önceki gövdeye göre gövdenin açı değişimini ortadan kaldırmaktır. Yani, her gövdenin yalnızca kendi dönüş açısı olmalıdır.

Şekil 11'de, konum doğrulaması için herhangi bir konum seçilmiştir. Sonuçlar CAD verileriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen açılar Creo'da mekanizmaya uygulanır. Test sonuçları MATLAB'da değerlendirilir. Tablo 2, CAD verilerinin ve hesaplanan mekanizma koordinatlarının sensörlerle karşılaştırılmasını göstermektedir. X ve Y eksenindeki değerler arasındaki farklar 12,25 mm ve 7,45 mm'dir. Bunun gibi çeşitli pozisyonlar aynı şekilde değerlendirilmiş ve benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

Tablo 2: Mekanizma Koordinatlarının Karşılaştırılması

	A6	B2	K2	K3
Creo X	261.14	1531.89	3741.24	4761.18
Creo Y	2335.45	4546.25	3906.88	3112.01
Test X	260.82	1531.24	3746.57	4773.43
Test Y	2335.48	4546.29	3904.92	3104.56
Difference X	0.32	0.65	5.33	12.25
Difference Y	0.03	0.04	1.96	7.45

Ayrıca A1 noktası araçta sabit eklem olarak kabul edilmektedir ve bu noktanın koordinatları araca göre bilinmektedir. Böylece keçe kenarı araca göre hesaplanmıştır. Ayrıca aracın yalpalama ve yalpalama açılarını ölçmek için eğim sensörü bulunmaktadır. Dönüş matrisleri ile hesaplanan araç açısı ve mekanizma koordinatları arasındaki ilişki aşağıda gösterilmektedir.

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Operatör, çalışma bölgesi kısıtlamalarını bilinen araç ve mekanizma noktalarında iki eksende girer. Kısıtlamalar tespit edildiğinde operatör mekanizmayı hareket ettirmek istese dahi mekanizma hareketine izin verilmeyecektir. Böylece bu uygulama ile operatör ve çevre güvenliği sağlanmaktadır.

Ataşman kontrol sisteminde operatör istenilen inşaat planını belirlemelidir. Örneğin tesviye açısı sisteme girilir. Tesviye yörünge referansına göre, iş verimliliğini artırmak için uygulama sırasında sistem operatörü yönlendirir.

### 3. Sonuç

Sonuçlara bakıldığında Tablo1 ve Tablo2'deki değerlerde bazı farklılıklar görülmektedir. Farklar Tablo 1'deki farklar Tablo 2'deki değerlere kıyasla daha azdır ve ihmal edilebilir. Tablo 2'de X ekseninde 1,0-1,5 cm, Y ekseninde 0,5-1,0 cm fark bulunmaktadır. Bunlar, sensörlerin doğruluğuna, mekanik uyumsuzluğa ve kalibrasyon koşullarına vb. bağlı olabilir. Farklılıklar, atasman kontrol sistemi için beklenen mekanizma aralıdır. Keçe kenarı tahmini için strok veya açıyı ölçmek üzere diğer konum sensörleri denenebilir.

Bu sistem, şantiyede operatör ve çevre güvenliğini ve iş verimliliğini destekler. Ayrıca otonom ekskavatör sistemleri için altyapı oluşturur. Bu model, daha fazla sensör eklenerek ve yeni hesaplama yöntemleri uygulanarak yörünge kontrol sistemi, otomatik kazma, tesviye veya hendek açma sistemleri olarak geliştirilebilir. Ayrıca Gerçek Zamanlı Kinematik GNSS sensörü ile ekskavatörün konumu algılanır. Böylece ekskavatör yürüyüş sistemi kontrol edilebilir. Bu, çalışma görevlerin temelini oluşturmaktadır.

### Teşekkür

Bu çalışma Tubitak Teydeb kapsamında, Hidromek A.Ş. tarafından desteklenmektedir.

### Kaynakça

- [1] M. Haga., W. Hiroshi, K. Fujishima, *Digging Control System for Hydraulic Excavator*, Mechatronics 11, s. 665-676, 2001.
- [2] B. Zhang, S. Wang, Y. Liu, H. Yang, *Research on Trajectory Planning and Autodig of Hydraulic Excavator*, Mathematical Problems in Engineering, 2017.
- [3] H. Feng, C. Yin, W. Weng, W. Maa, J. Zhou, W. Jia, Z. Zhang, *Robotic excavator trajectory control using an improved GA based PID controller*, Mechanical Systems and Signal Processing 105, s. 153-168, 2018.
- [4] H. Wind, A. Renner, F.A. Bender, O. Sawodny, *Trajectory Generation for a Hydraulic Mini Excavator using Nonlinear Model Predictive Control*, IEEE, 2020.
- [5] M. Lee, H. Choi, C. Kim, J. Moon, D. Kim, D. Lee, *Precision Motion Control of Robotized Industrial Hydarulic Excavators via Data-Driven Model Inversion*, IEEE Robotics and Automation, 2021.