

KÜRÜME İÇİN KÜÇÜK ÖLÇEKLİ OTONOM İŞ MAKİNESİ TASARIMI VE ÜRETİMİ

Önder Halis BETTEMİR*, Burak TOMBALOĞLU**

*Yüzüncü Yıl Üniversitesi, İnş. Müh. Böl., Van, Türkiye

**Başkent Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Ankara, Türkiye

ohbettehir@yvu.edu.tr, buraktombaloglu@hotmail.com

(Geliş/Received: 03.01.2012; Kabul/Accepted: 04.07.2013)

ÖZET

Kürüme ve tesviye işlemlerini yapabilen küçük ölçekli otonom iş makinesinin tasarım ve üretim aşamaları açıklanmıştır. İş makinesi, tesviye alanı koordinatları ve yüksekliğinin tanımlanması halinde dışarıdan herhangi bir komut almadan tesviye işlemini yapar. Üzerindeki hassas konum belirleyicisi ile bıçağın konumunu belirleyip kürüme işleminin bir sonraki zaman adımı için yapması gereken manevraları sahip olduğu yapay zeka ile hesaplar. Yapay zeka yazılımı belirlediği manevranın gerçekleştirilebilmesi için hangi motorların ne sürede çalışması gerektiğini hesaplayıp bu bilgiyi ana kontrol ünitesine gönderir. Ana kontrol ünitesi aldığı komutları gerekli motorları çalıştırarak uygular.

Anahtar kelimeler: Makine kontrolü, otonom iş makinesi, yapay zeka

DESIGN AND MANUFACTURE OF A SMALL SCALE AUTONOMOUS CONSTRUCTION MACHINE FOR GRADING

ABSTRACT

Design and manufacture phases of a small scale construction machine developed for shoveling and grading operations are described. Once the coordinates and height of the field are defined, the machine executes grading operation without needing any additional command. The machine detects position of its dozer blade by a situated precise positioning receiver and determines the necessary maneuvers to fulfill the next time step of the grading operation with its artificial intelligence algorithm. Artificial intelligence software computes the operation duration of electric motors to execute the maneuvers and sends this information to the main control unit. Main control unit executes the received commands by operating the corresponding electric motors.

Keywords: Machine control, autonomous construction machine, artificial intelligence

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bu makalede ilk nesil küçük ölçekli kürüme işlemini gerçekleştirebilen otonom bir iş makinesinin tasarım ve üretim aşamaları ele alınmıştır. Otonom iş makinesinin aküleri, elektrik motorları, mekanik ve elektrik aksamı tamamen Türkiye de üretilen parçalar kullanılarak yapılmış, sadece elektronik parçaları ile üzerinde bulunan Taşıyıcı Faz Diferansiyel Küresel Konumlandırma Sistemi (TFDKKS) alıcısı yurt dışından alınmıştır.

Açık alanda çalışan iş makinelerine uygulanan makine kontrolü yapım maliyetlerini önemli ölçüde azaltır. Maliyeti azalan algılayıcılarla kapasitesi ve hızı artan bilgisayarlar otonom iş makinesi geliştirimi konusunda teknik olanakları genişletmektedir. Otonom iş makinesi geliştiriminin ilk adımı operatöre destek olması amacı ile operatörü uyaran sistemlerdir. Hatalı geçişleri önlemeye yönelik ilk otomasyon sistemleri operatöre düşey yükseklik bilgisi veren lazer güdümlü sistemler oldu [1,2]. İş makinesinin üzerine yerleştirilen alıcı, lazerli nivonun gönderdiği

lazer ışını ile temasın kesildiği anda operatörü bıçak konumunu düzeltmesi için uyarılmaktadır. Bu sistem sayesinde bir greyderin günlük kürüme kapasitesi ortalama 3000 m² den 20000 m² ye kadar çıkarılmıştır [1,2]. Uydu tabanlı konumlandırma sistemleri lazerli nivonun yetersiz kaldığı alanlarda devreye girdi. Taşıyıcı Faz Diferansiyel Küresel Konumlandırma Sistemi (TFDKKS) tabanlı konum belirleyen alıcılar, uydu sinyali ve düzeltme bilgisini alabildiği her ortamda konumu hassas belirleyebilmektedir.

İş makineleri kinematik özelliklerinin modellenmesi ile tam anlamıyla kontrol edilebilir duruma geldiler. Koivo [3] iş makinelerinin kazı dinamiğini modellemiş ve tanımlanmış kazı planını uygulatabilecek bir kontrol sistemi sunmuştur. Plonecki [4] ve Althoefer [5] ekskavatör ve zemin koşullarını göz önünde bulundurup en az enerji harcayarak kazı işlemini gerçekleştiren kova hareketlerini hesaplayan bir model geliştirdiler. Araya ve Kagoshima [6] ise kazıcılar için operatörü konumsal ve açılabilir olarak yönlendirerek iş makinesinin verimini artıran yarı otomatik bir sistem geliştirdiler. Roberts [7] TFDKKS kullanarak iş makinelerinin kontrolünü sağlayarak önemli ölçüde zaman ve para tasarrufu sağlanabileceğini gösterdi. Retscher ve Mok [8] küresel konumlandırma sistemini açıklayıp bu sistemin inşaat makinelerinin kontrolünde sağlayacağı yararları vurguladı. Saedi vd. [9] iş makinesinin görüş tabanlı kontrol sistemi sayesinde kaymasını da izleyerek otonom kontrol sağlamışlardır.

Lee [10] ilk örnek robot kazı ve boru döşeme makinesi geliştirdi. Sistem sayesinde boru döşenirken işçilerin kanalın içine girmelerine gerek kalmayıp, olası iş kazaları önlenmektedir. Lee ve Chang [11] şevli kanal kazılarında yapılan son düzeltme işleminin otomasyonu için bir sistem geliştirdi. Kim ve Russell [12] kazı ve hafriyat işlerinde verimliliği arttıracak bütünleşmiş bir sistem önerisinde bulundular. Navon [13] toprak işlerinin kontrolü için geliştirilen sistemin inşaat şantiyesindeki performans takibine olan yararlarını incelediler. Geliştirilen bu sistem kazı ve hafriyat makinelerinin konumlarını üzerlerine yerleştirilen DKKS alıcısı ile belirleyip merkezi bilgisayara aktarmak ve bu veriler ışığında iş programının kontrolünü yapmaktadır. Bock[14] inşaat sektöründe robot kullanımını incelemiş ve robot kullanımının prekast beton panel üretimi, prefabrik tuğla duvar inşası, plywood kalıp imalatı, donatı hazırlama, delme ve yük taşıma amaçlı olduğunu belirtmişlerdir. Zaman ve para tasarrufunun yanı sıra robot kullanımının iş güvenliği ve işçi sağlığı açısından önemli yararlarının olduğu vurgulanmıştır.

Lytle [15] ve Chu vd. [16] çelik yapı inşaatlarının yapım süresini kısaltmak amacı ile uzaktan yönetilebilir veya önceden programlanarak verilen görevleri otomatik olarak yerine getiren bir robot vinç

geliştirdiler. Tateyama [17] kazı yapılacak zeminin cinsi ve özelliklerine göre otonom biçimde en uygun inşaat yöntemini makine zemin etkileşimine göre belirleyen bir sistem tasarladı. Kolera ve Bernold [18] kazı makinelerine yerleştirilen bir alıcı yardımıyla yer altındaki altyapıları tespit edip kazı esnasında bu yapılara zarar verilmesini önleyen bir sistem ürettiler.

İş makinesi otomasyonu incelendiğinde özellikle yol inşaatlarında otomasyona gidilmesiyle büyük yarar sağlandığı gözlenmiştir. Yol yapım maliyetlerinin düşmesinin yanı sıra planlama alanında da önemli yararlar sağlamaktadır. Ayrıca insansız iş makinesi kullanımı radyo-aktif veya sağlıklı zararlı kimyasal madde sızıntısı bulunan ortamlar ile aşırı sıcak veya soğuk iklimin görüldüğü durumlarda işçi sağlığını koruması ile de öne çıkmaktadır.

Makine kontrolünün iş makineleri üzerinde sağladığı verim artışından yola çıkarak kürüme yapabilen küçük ölçekli ilk örnek iş makinesinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Otonom iş makinesinin oldukça gelişmiş yapay zekaya sahip olması gerekeceği için geliştirilen sistemin basit haldeki yapay zekası arazi testleri sırasında ortaya çıkan eksik ve aksaklıkların belirlenip yazılımın uygun biçimde terfi ettirilmesi ile yapay zekanın uzun vadede tam olarak geliştirilmesi amaçlanmıştır.

2. ÖN TASARIM (PRELIMINARY DESIGN)

Küçük ölçekli iş makinesi hareketini ve bıçak manevralarını elektrik motorları ile yapacak şekilde tasarlandı. İş makinesinin enerji ihtiyacını karşılayabilmek için yeterli miktarda elektrik enerjisini depo edecek akülere ihtiyaç duyulmaktadır. Ucuz ve ağır olması nedeni ile kurşundioksit aküler tercih edildi. Kürüme yapan bir aracın ağırlığının fazla olması kürüme sırasında tekerleklerin boşa dönmesini engellemektedir. Yeterli itme kuvveti uygulayabilen doğru akım motorları en az 24V gerilimle çalıştığı için 2 adet 12V akü seri bağlanarak 24V gerilim elde edilmiştir. Buna karşın akülerin toplam kütlesi 150 kg'a yaklaşmıştır [19].

Küçük ölçekli iş makinesinin boyutları elektrik motorları, akü ve bilgisayar sisteminin yerleştirilmesine olanak sağlayacak şekilde genişliği 50 cm, uzunluğu ise 130 cm olarak tasarlanmıştır. Üzerindeki bütün yükler dikkate alındığında iş makinesinin kütlesi yaklaşık 300 kg olmaktadır. Kürüme işleminde kullanılacak bir aracın paletli olması daha avantajlı olsa da kullanılan elektrik motorlarının itme gücü paletli bir aracı ilerletmek için yeterli olamayacağından lastik tekerlekle itiş gücünün sağlanması tercih edildi. Lastik tekerlekler 25 cm çapında ve 150 kg taşıyabilmektedir. Böylece aracın yükü bütün tekerleklere eşit dağıldığında toplamda 600 kg'lık kütleyi taşıyabilecektir.

İtici güç için kullanılan elektrik motorları saniyede 2 tur dönecek şekilde indirgen (redüktör) kullanılmıştır. Bu şekilde tekerlek milinin dönüş hızı azaltılıp uygulayabildiği kuvvet artırılmıştır. 4 adet 300 watt gücünde 24V doğru akım gerilimle çalışan motorlar kullanılarak toplam 1200 watt itici güç elde edilmiştir. Elektrik motorlarının çevirdiği mil saniyede 2 tur döneceği için aracın hızı 1.5 m/s olacaktır. Bu durumda motorların uygulayacağı kuvvet;

$$P = F * v, \quad F = 800 N \quad (1)$$

Olarak hesaplanır. İndirgen kullanıldığı için motorların verimi düşecektir. Kullanılan indirgen ve sürtünmeden ötürü %50 kuvvet kaybı olduğu varsayılırsa iş makinesinin uygulayabileceği kuvvet 400N olacaktır.

Küçük ölçekli iş makinesinin toplam kütesinin 300 kg ağırlığının 3000 N olduğu varsayıldığında 400 N kuvveti patinaj yapmadan uygulayabilmesi için yatay yüzeyde zeminle tekerlekler arasında olması gereken statik sürtünme katsayısı, k_{min} ;

$$F = k_{min} \times N, \quad k_{min} = 0,133 \quad (2)$$

olarak hesaplanmıştır. k_{min} ortalama kuru zeminde sağlanabilecek bir değerdir ancak ıslak kil ve kumda sağlanması çok güçtür. Ön tasarımda, kuru zeminde lastik tekerlekle hem gerekli itiş gücünün sağlanabileceği hem de tekerleklerin boşa dönüş yapmadan ilerlenebileceği belirlenmiştir.

İş makinesinin kürüme işlemi sırasında 300 N luk bir kuvveti koparma işlemine harcayacağı kabul edilirse 100 N luk kuvveti de kopardığı parçaları süpürmeye harcayabilecektir. Zemin ile koparılan parçaların sürüklenmesi ve parçacıkların bir birine çarpmaları sırasında sönmülenen enerjinin sürüklenen parçaların ağırlığının %20'si kadar olduğu kabul edilirse sürüklenilecek maddenin ağırlığı 500 N (50 kg) olacaktır. Bu değerler küçük ölçekli bir iş makinesi için uygun kabul edilebilir değerlerdir.

3. TEMEL TASARIM (FUNDAMENTAL DESIGN)

Küçük ölçekli iş makinesinin geliştirilmesi mekanik ve elektronik aksam ile yapay zeka geliştirilmesi olmak üzere üç ana başlıktan oluşmaktadır.

3.1. Mekanik Aksam (Mechanical Components)

Mekanik aksam hareket yeteneğinin yanında kürüme ve tesviye işlemini yapabilecek bir sisteme de sahip olmalıdır. Tesviye işlemi gerçek boyutlu iş makinelerinde iş makinesinin orta kısmına yerleştirilen bıçak vasıtası ile yapılır. Geliştirilen iş makinesi küçük ölçekli olarak tasarlandığı için bıçak ön kısma yerleştirilmiştir. Bıçağı 6mm kalınlıkta, 45cm yükseklikte ve 90cm genişliktedir. Sıyırma

işlemi sırasında zemine 45° yatay açı ile kuvvet uygulayabilmesi için iş makinesinin bıçağı otomatik baskı (pres) tezgahı kullanılarak 25° eğilmiştir. Sıyırma sırasında iş makinesi bıçağı 20° çevirebilmektedir bu şekilde 45°lik açı elde edilerek daha az enerji harcayarak sıyırma yapılması sağlanmıştır.

İş makinesi bıçağının düşey yönde hareket edebilmesi, sağ-sol ekseninde dönmesi ve öne-arkaya kaykılabilmesi için bıçak mekanizması özel olarak tasarlanmıştır. Düşey ekseninde hareket edebilmesi iş makinesine iki adet büyük mafsala bağlı döner sistem tasarımı ile sağlanmıştır.

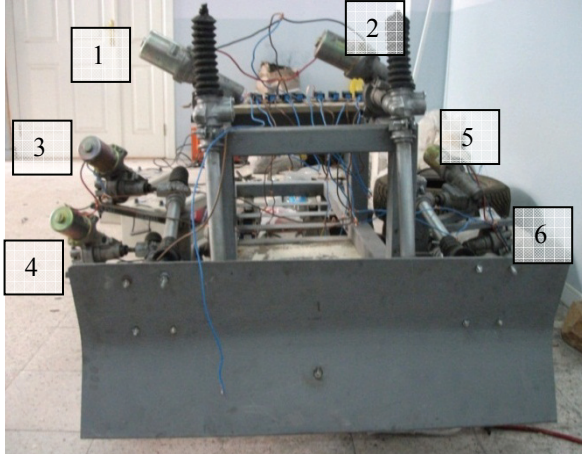


Şekil 1 a-b. Bıçak ve bıçağın yerleştirildiği mekanizma (Blade and the mechanism the blade is situated)

Şekil 1a da gösterilen sistemin ön kısmında bir mafsal yer almaktadır. Bıçak bu mafsalla hareketli sisteme monte edilmiştir. Şekil 1b de iş makinesi ters durmakta ve arka kısmı yakındır. Mavi halka ile işaretlenen kaynakla sabitlenmiş mafsallar sistemin hareket edebilir biçimde monte edilmesine olanak sağlamaktadır. Bıçağın düşey hareketini sağlamakla görevli iki adet 12V doğru akımla çalışan elektrik motoru iş makinesinin üzerine yerleştirilmiştir. Düşey hareketi sağlayan motorların yerleştirilebilmesi için iş makinesinin ön kısmında rijit bir kafes inşa edilmiştir.

Sağ-sol ve öne-arkaya dönüşler için 4 adet 12V doğru akımla çalışan elektrik motoru kullanılmıştır. Bu motorlar şekil 2 de 3, 4, 5 ve 6 nolu motorlar olarak adlandırılmıştır. Bıçağın sağa-sola dönme ve öne-arkaya eğilme hareketleri bu motorlar sayesinde yapılmaktadır. Bu hareketlerin yapılabilmesi için 4 motorunda aynı anda çalışması gerekmektedir. Bıçağın sol tarafa doğru kürünen malzemeyi boşaltmasını sağlanabilmesi için 3 ve 4 nolu motorların aynı anda ileri, 5 ve 6 nolu motorların ise aynı anda geri hareket etmesi,

sağakürümenin sağlanabilmesi için ise 3 ve 4 nolu motorların geriye, 5 ve 6 nolu motorların ileriye doğru hareket etmesi gerekmektedir.



Şekil 2. Bıçak hareketini sağlayan elektrik motorları (Electric motors providing the movement of the blade)

Bıçağın öne doğru eğilebilmesi için 3 ve 5 nolu motorların aynı anda ileri, 4 ve 6 nolu motorların ise aynı anda geri hareket etmelidir. Bıçak yüzünün yukarı çevrilebilmesi için 3 ve 5 nolu motorların aynı anda geri, 4 ve 6 nolu motorların ise aynı anda ileri hareket etmelidir.

Motorlar çiftler halinde yerleştirildiği için bıçak mekanizmasının uygulayabileceği kuvvet 800 N dur.



Şekil 3. Rack-and-pinion mekanizması (Rack-and-pinion mechanism)

Bıçak mekanizmasını hareket ettiren kollar 15 cm uzayıp kısalabilmektedir. Bu sistem kullanılarak bıçak yüksekliği 15 cm genlikte hareket ettirilebilmektedir.

Sağa-sola dönüş hareketi yaklaşık 10 derece, öne-arkaya eğilme ise 20 derece genişindedir. Elektrik motorlarının dairesel hareketini doğrusal harekete *rack-and-pinion* mekanizması çevirmektedir. *Rack-and-pinion* mekanizması olarak otomobiller için üretilen kuru direksiyon sistemi kullanıldı (Şekil 3).

Hareketi sağlayan 12V DC motorunun mili şekil 3 te sağ tarafta gösterildiği gibi kuru direksiyon sistemine kaynatıldı. Bu sayede elektrik motorunun mili döndüğünde direksiyon çevrilmiş gibi kuru direksiyon sistemi hareket etmektedir. Bıçak hareketini sağlayan motorların her biri 100 watt gücündedir. *Rack-and-pinion* mekanizmasının hızı ise 0,1 m/s dir. Dairesel hareketin doğrusal harekete çevrilmesi sırasında ve *rack-and-pinion* sistemindeki sürtünmeden ötürü %60 güç kaybı olduğu varsayılırsa bir motorun uygulayabileceği itme-çekme kuvveti 400 N olacaktır.

3.2. Elektronik Devre (Electronic Circuit)

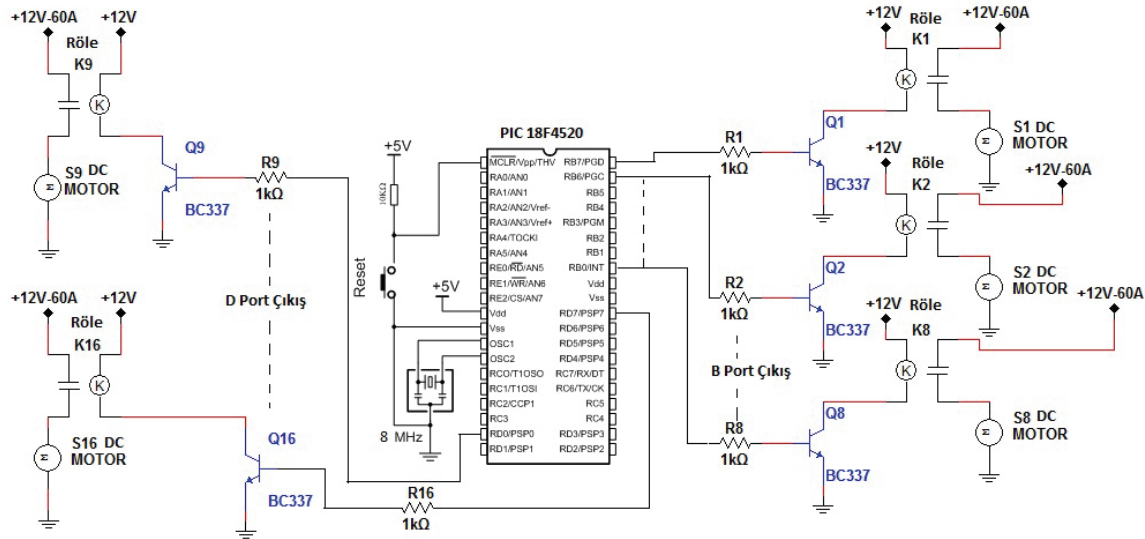
Elektronik devre yapay zeka yazılımını hafızasında saklayıp, iş makinesinin manevralarını ve bıçak hareketlerini gerçek zamanlı hesaplamaktadır. Bilgisayar tarafından hesaplanan manevra ve bıçak hareketleri ana kontrol ünitesine RS232 portu üzerinden gönderilmektedir. Veri alış verişini sağlayan devre ve yazılım uygulama içeren kitap ve dokümanlardan yararlanılarak geliştirilmiştir [20,21]. Ana kontrol ünitesi 40 adet giriş-çıkış portu bulunan PIC18F4520 mikroişlemci tarafından komuta edilmektedir.

Otonom kontrolün sağlanabilmesi için elektrik motorlarına gücün verilip kesilmesi bir anahtar yerine mikrokontrolör tarafından yapılması gereklidir. Mikrokontrolör çıkış olarak sadece 0,020 amperlik akım verebilir. Daha yüksek akım elde edilebilmesi için ana kontrol ünitesi tarafından komuta edilen bir motor kontrol devresi geliştirildi (Şekil 4). Elektrik motorlarının dördü 24V altısı ise 12V gerilimle çalıştığı için hem 24V hem de 12V gerilim sağlayan güç kaynaklarına ihtiyaç duyulmuştur.

R_l direncini hesaplamak için röle kapalı iken iç direnci ölçülmüş ve $R_{in\ röle} = 10\Omega$ olduğu belirlenmiştir. I_c akımın en büyük değere ulaştığı, doyum bölgesini sınır olarak kabul edilerek,

$$V_{ce} \cong 0,2V \quad I_c \leq \frac{V_{cc} - V_{ce}}{R_{in\ röle}} \leq \frac{12 - 0,2}{10} \leq 1,18 A \quad (3)$$

$$I_c = hfe \times I_b \quad hfe \times I_b \leq 1,18 \quad (4)$$



Şekil 4. Kontrol devresi (Control circuit)

Denklem 4'te V_{be} transistör kısa devre akım kazancıdır ve kazanç değeri BC337 transistör için yaklaşık 270 dir (Katalog değerlerinden alınmıştır). Elde edilen değer yerine konularak $270 \times I_b \leq 1,18$ koşulundan $I_b \leq 4,37$ mA bulunur.

$$I_b = \frac{V_{pic} - V_{be}}{R_1} = \frac{5 - 0,6}{R_1}, \quad R_1 \leq \frac{5 - 0,6}{4,37 \times 10^{-3}} \quad (5)$$

Denklem 5 de V_{be} eşik değeri 0,6 V yerine konularak $R_1 \leq 1023 \Omega$ bulunur ve $R_1 = 1k \Omega$ alınmıştır.

Bıçak motorları ve hareketi sağlayan motorların hem ileri hem de geri hareketi için 4 anahtarlı H köprü devresi kullanılmıştır. Anahtar görevini röleler yaptığı için motor kontrolünde 4 adet röleye ihtiyaç duyulmaktadır. İleri-geri hareketi sağlamak için 4 röle gereksinimi kontrol devresinin röle ve mikrokontrolördeki giriş-çıkış port ihtiyacında artışa neden olmaktadır. Bunun önüne geçebilmek için beraber hareket etmesi gereken motorlar paralel bağlanarak aynı köprü devresi tarafından kontrol edilmiştir. Böylece hareketi sağlayan aynı tarafta kalan iki motorun hareketi beraber yapılarak röle ve çıkış portu ihtiyacı yarıya indirilmiştir.

İş makinesinin dönüşü, hareketi sağlayan motorlardan dönüş merkezine uzak kenarda olanların ileri, diğer kenardakilerin ise geri hareket ettirilmesi ile sağlanır. Bu sayede iş makinesinin bulunduğu yerde dönüş gerçekleşir. Dönüş sadece tek taraftaki motorların geri veya ileri hareketi ile de sağlanabilir ancak bu durumda dönüş süresi daha uzun sürede tamamlanır. Tam dönüş 16 saniyede yapılmaktadır.

3. 3. Yapay Zeka (Artificial Intelligence)

Geliştirilen otonom sistemin en önemli kısmı üzerinde çalışacak yapay zeka yazılımıdır. Yapay zeka yazılımı

karmaşık hesaplar yapması gerektiği için iş makinesine monte edilen taşınabilir bilgisayarda çalışmaktadır. Yazılıma kürüme işleminin yapılacağı alan, kürüme yüksekliği, sayısal yükseklik modeli ve makine özellikleri girilmelidir.

Girilen verileri Karar Verme Sistemi değerlendirerek tesviye işlemi için yapılması gereken manevraları belirler. Karar verme sisteminin oluşturduğu iş programı Ana Kontrol Ünitesine aktarılır ve ana kontrol ünitesi iş programını gerçekleştirilmesi için motorlara gerekli komutları gönderir. Konum doğrulama sistemi düzenli zaman aralığında iş makinesinin olması gereken konumda olup olmadığını, bir başka deyişle iş programının tam olarak yerine getirilip getirilemediğini kontrol etmektedir. Konuma düzeltme yapılması gerekiyorsa durum Karar Verme Sistemine bildirilir. Karar Verme Sistemi düzeltmeleri hesaplayıp konum düzeltme sistemi aracılığı ile ana kontrol ünitesine gönderir. Ana kontrol ünitesi ileri-geri hareketi, sağa-sola dönüşü ve bıçak hareketlerini yapmak için hangi motorun ne sürede çalıştırılması gerektiğini belirler ve ilgili motorları çalıştıracak komutları gönderir.

TFDKKS alıcısı hem küresel konum belirleme sistemi uydularından hem de yerel düzeltme ağlarından aldığı verilerle hassas bir şekilde iş makinesinin konumunu belirleyen bir alıcıdır. Sistemde kullanılan MagellanPromark 500 LiteTFDKKS alıcısı gerçek zamanlı kinematik konumlandırma işlemini 3 cm hassasiyette yapmaktadır[22].

Yapay zeka algoritması tesviye edilecek alan, tesviye yüksekliği ve iş makinesinin teknik özelliklerini dikkate alarak iş programını oluşturur. İş programı 1 saniyelik zaman aralıklarında iş makinesinin konumu, bıçak yüksekliği ve gidiş doğrultusundan oluşur. Oluşturulan iş programı bilgisayardan ana kontrol ünitesine RS232 iletişim portu üzerinden bilgisayara

aktarılır. Bu işlem başlamadan önce iş makinesinin kürüme alanı içinde olup olmadığı point-in-polygon (poligon içindeki nokta) algoritması ile kontrol edilir. İş makinesinin konumu ile tesviye işlemi yapılacak alanın ardışık iki köşe kenarının oluşturduğu açı hesaplanır. Poligon kenarlarının tamamı taranarak elde edilen açılar toplamı 360° ise iş makinesi poligonun içinde, 0° ise poligonun dışındadır.

Araçta tek TFDKKS bulunduğu için ilk çalışma anında doğrultu çok düşük hassasiyette elde edilebilmektedir. Doğrultunun hassas olarak elde edilebilmesi için aracın ilerlemesi gerekmektedir. Aracın ilk hareketinden sonra doğrultusu hassas biçimde elde edilir ve bulunduğu yere gidebilmesi için yapması gereken dönüş manevrasını yapay zeka yazılımı hesaplar. İş makinesinin hangi doğrultuda ilerlediği Eşitlik 6'dan hesaplanır.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}\right) \quad (6)$$

İş makinesinin t_1 anındaki yatay düzlemdeki konumu X_1, Y_1 ; t_2 anındaki yatay düzlemdeki konumu X_2, Y_2 'dir. Doğrultu açısı olarak belirtilen α , azimut (semt) açısıdır. Doğrultu açısı dolaylı olarak hesaplandığı için standart hatası hata yayılma kanunu ile tahmin edilir. Doğrultu açısının radyan birimindeki hata miktarı Eşitlik 7 ile bulunur.

$$\sigma_\alpha^2 = \sigma_{x_1}^2 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x_1}\right)^2 + \sigma_{x_2}^2 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x_2}\right)^2 + \sigma_{y_1}^2 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial y_1}\right)^2 + \sigma_{y_2}^2 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial y_2}\right)^2 \quad (7)$$

Eşitlik 7 de;

$$\frac{\partial \alpha}{\partial x_1} = \frac{1}{1 + \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)^2} \frac{y_2 - y_1}{(x_2 - x_1)^2}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial x_2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)^2} \frac{-(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^2}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial y_1} = \frac{1}{1 + \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)^2} \frac{-1}{(x_2 - x_1)}$$

$$\sigma_\alpha^2 = \sigma \left(\frac{(x_2 - x_1)^2}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \right)^2 \left(\frac{(y_2 - y_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}{(x_2 - x_1)^4} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial y_2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)^2} \frac{1}{(x_2 - x_1)}$$

dir. Genel durum için her konum bilgisinin aynı hassasiyette elde edildiği varsayılarak

$$\sigma = \sigma_{x_1} = \sigma_{x_2} = \sigma_{y_1} = \sigma_{y_2}$$

yazılır. Burada yatay düzlemdeki koordinatların aynı hassasiyette ölçüldüğü ve zamanla ölçüm hassasiyetinin değişmediği kabulleri yapılmıştır. Elde edilen kısmi türev ve standart sapma değerleri denklemde yerine konulduğunda sayfanın alt kısmında gösterilen denklem 8 elde edilir.

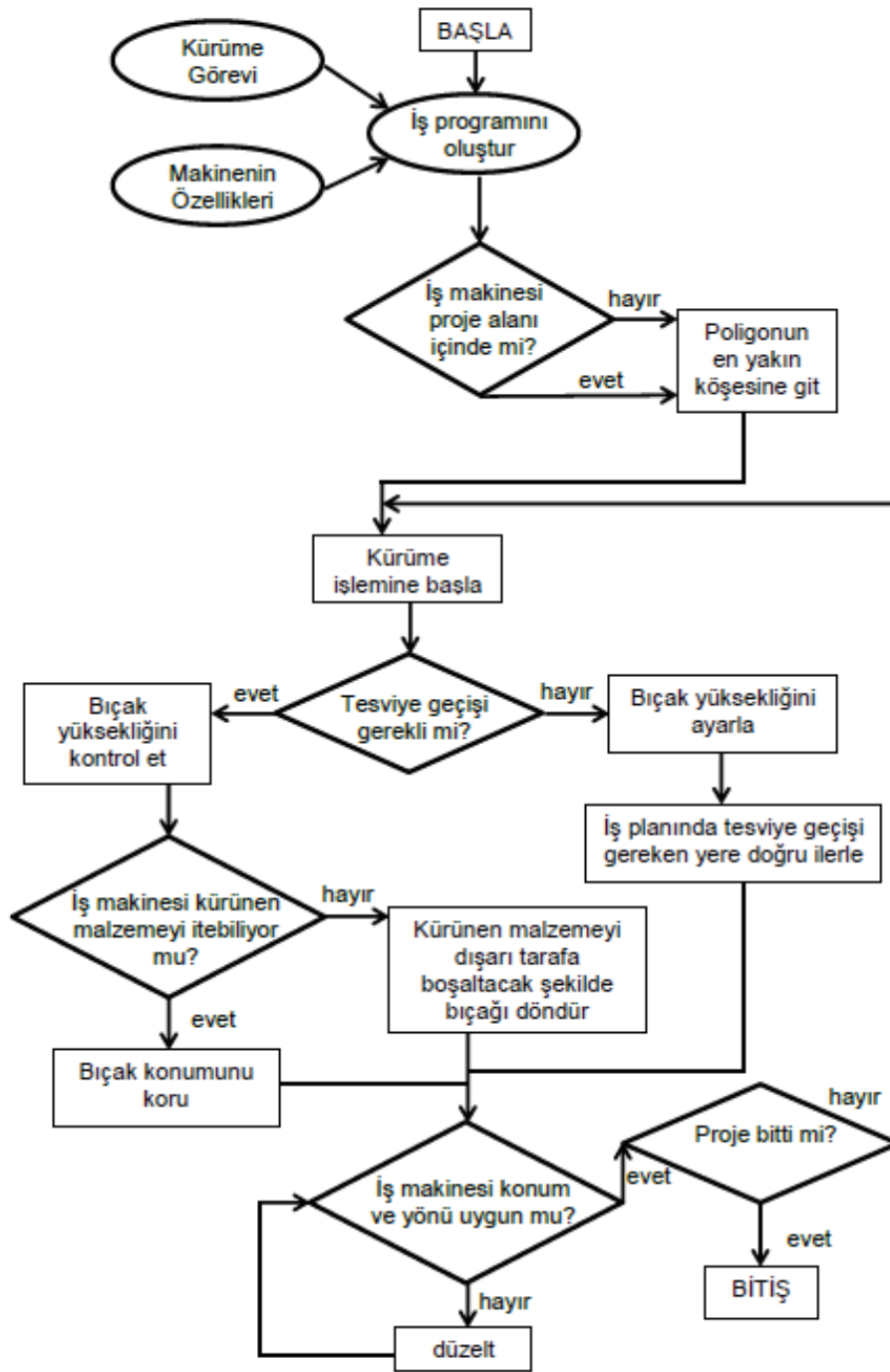
Denklem 8 de $(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 = S^2$ ile yer değiştirilir ve gereken sadeleştirmeler yapılarak

$$\sigma_\alpha^2 = \sigma^2 \frac{2}{S^2}$$

elde edilir. Doğrultu hassasiyetinin %5 den daha iyi olması amaçlanmıştır. Çok küçük açılar için $\sin(\alpha) \approx \alpha$ olarak kabul edilebilir ve standart sapmasının 0,005 radyandan daha az olması gerektiği bulunur. Yatay koordinatların her biri ± 1 cm hassasiyetle ölçüldüğü için istenilen doğrultu hassasiyetini ancak $S^2 > 8$ koşulu sağlar. Bu nedenle doğrultunun hesaplanırken 3 metre yatay uzaklıktaki noktalar kullanılmıştır.

İş makinesi poligonun köşe noktasına ulaştığı anda kürüme işine başlar. Tesviye projesinde belirtilen yükseklikle bıçağın yüksekliği kıyaslanarak gerekli bıçak hareketleri yapılır. Yapay zeka yazılımı bıçağın inebileceği en alt derinliği dikkate alarak istenilen derinliğe kaç geçişte ulaşabileceğini hesaplar ve geçiş yapıldıktan sonra gereken geçiş sayısını bir azaltır.

Geliştirilen sistemin normal yük altındaki hızı 1,5 m/s dir. Bu hızın altında ilerliyorsa iş makinesi zorlanıyor demektir. Tesviye işlemi yapılırken oluşan zorlanmanın ana nedeninin iş makinesinin bıçağının önünde biriken kürülmüş malzemenin sürüklenmesi sırasında oluşan sürtünme kuvvetidir. Bu kuvveti azaltmanın yolu greyder bıçağını yana doğru çevirerek biriken malzemenin yana akmasını sağlamaktır. Bıçağın çevrilme yönü iş makinesinin poligon sınırına en yakın olduğu kenara doğru olacaktır. En yakın kenarı belirlemek için iş makinesinin konumu ile tesviye alanını oluşturan poligonun kenarları arasındaki dik mesafe Eş. 9'dan hesaplanmaktadır.



Şekil 5. Yapay zeka algoritma şeması (Schema of artificial intelligence algorithm)

$$d = \frac{(x_2 - x_1)(y_1 - y_0) - (x_1 - x_0)(y_2 - y_1)}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (9)$$

[23]. Eş, 9'dax₀, y₀ iş makinesinin bulunduğu konumu, x₁, y₁ ve x₂, y₂ kenarın başlangıç ve bitiş noktalarını belirtir.

Kürüme işlemi sırasında iş makinesinin doğrultusu arazi koşullarından ötürü değişebilmektedir. Tekerleklerden herhangi birinin sürtünme kuvveti az

olan zeminle teması sonucu boşa dönüp, diğer tekerleklerin normal hızda hareketini sürdürmeleri iş makinesinin doğrultusunda sapmaya neden olmaktadır. Buna ilaveten bıçağın sağa-sola dönüşü sonucu bıçağın önünde sürüklenen malzemenin ağırlık merkezinin değişmesi de iş makinesinin doğrultusunda sapmaya neden olabilmektedir. Bu nedenle Şekil 5 te gösterilen yapay zeka algoritmasında sıklıkla doğrultu kontrolü yapılmaktadır.



Şekil 6. Kürüme geçişlerinin örtüşmesi (Overlap of the grading passes)

Şekil 6 da 1 ve 2, iş makinesinin bir geçişte kürüyeceği alanı belirtmektedir. 1 ve 2 nolu bölümlerde çarpı ile taranmış kısımda üst üste binme vardır. Bu alan normal şartlarda her iki geçişte de tesviye edilecektir Kontrol mekanizmasının görevi iş makinesinin bıçak ucunun ortak alanın dışına çıkmasını engellemektir.

Tablo 1. İş makinesinin özellikleri (Specifications of the construction machine)

Akü Kapasitesi	24V 190 Ah
İtici Motor Gücü	1200 watt
Hız	1,5 m/s
Kürüme Kuvveti	300 N
Süpürme Kapasitesi	50 kg
Bıçak Genişliği	90 cm
Kullanım Süresi	1,5 - 2 Saat
Kürüme Hassasiyeti	± 3 cm (1σ)



Şekil 7. Küçük ölçekli otonom iş makinesi (Small scale autonomous construction machine)

Tablo 1 de belirtilen kürüme hassasiyeti düz arazinin tesviye edilmesi sırasında elde edilen düşey hassasiyettir. Araçta tek TFDKKS alıcısı olduğu için yatay hassasiyet daha bozuktur. Buna ek olarak eğimli biçimde kürüme yapılması durumunda düşey kürüme hassasiyeti daha düşük olacaktır.

İş makinesinin kürüme genişliği 90 cm ve hızı 1,5 m/s dir. Orta sert zeminde 2 cm derinlikte kürüme yapabilmektedir. Bu durumda iş makinesi saniyede $1,35 \text{ m}^2$ alanı veya $0,027 \text{ m}^3$ lük hacmi sıyrabilecek kapasitededir. Bir saat içinde 4860 m^2 alanı veya 97 m^3 hacmi sıyrılmış olacaktır. İş makinesinin bir saatlik

çalışması için akülere 6 kWh enerji verilmesi gerekmektedir. Aküleri şarj eden redresörün verimi ortalama %75 alındığında 9 kWh elektrik enerjisi harcanarak 97 m^3 toprağı kürüyebildiği ve $0,33 \text{ TL/kWh}$ birim enerji fiyatı ile 3,00 TL enerji maliyeti olduğu hesaplanmıştır.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME (RESULT AND CONCLUSION)

İş makinesinin hızı, kürüyebileceği malzeme miktarı, dönüş çapı ile ilgili test değerleri teorik hesaplamalar ile hemen hemen aynı doğrultuda olmuştur. Sadece akülerin iş makinesini ne kadar süre ile besleyebileceği konusundaki ön görüşlerde önemli sapma olmuştur. Yüksek akım çekilmesi sonucu akülerin istenen akımı verememesi, motorların zorlanma altında çok yüksek akım çekmeleri, akülerin şarj oldukça kapasitelerinin düşmesi ve boşa bekleme esnasında deşarj olmaları sonucu iş makinesinin kullanım süresi hesaplanan süreden daha kısadır. Bu durumda dahi iş makinesi orta sertlikteki zeminlerde 5 geçiş yaparak yaklaşık 1 dönüm araziye kürüyebilecek durumdadır.

Konum ve doğrultusunun tek TFDKKS alıcısı tarafından sağlanması kürüme işleminin hassas yapılmasını engellemektedir. Kürüme sırasında doğrultuda oluşan değişimler ancak 3 metre ilerlendikten sonra hassas olarak tespit edilebilmektedir. Bu nedenle kürüme sırasında iş makinesi rotadan sapmakta ve tekrar geçiş yapılması gerekmektedir.

İş makinesinin dezavantajlarının giderilebilmesi için en az 2 TFDKKS alıcısının iş makinesine yerleştirilmesi gereklidir. Bu sayede daha hassas doğrultu bilgisine sahip olunacak ve rota daha kararlı biçimde izlenebilecektir. Daha güçlü akülerin kullanılması halinde daha uzun süre şarj edilmeden kullanılabilir. Buna ek olarak iş makinesinin üzerine sonar veya lidar tabanlı algılayıcıların konulması ile çevresindeki cisimleri algılama yeteneğine sahip olabilecektir. Etrafındaki cisimlerin yakınlığı ve hızını dikkate alarak çarpışma önleme ile engel tanıma algoritmaları yapay zeka yazılımına eklenebilir. Yapay zeka yazılımına ihtiyari olarak en düşük enerji tüketimi ve en hızlı iş bitirimi optimizasyonları üzerinde çalışmalar sürmektedir. Bu özelliklerin kazandırılması ile rahatlıkla insansız biçimde kürüme işlemlerinde kullanılabilir.

SEMBOLLER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

k_{min}	tekerlekle zemin arasında olabilecek en düşük statik sürtünme katsayısı
α	semt açısı (<i>azimuth</i>)

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde kullanılan tüm ekipmanların alımı ve imalatların yaptırılması TÜBİTAK MAG tarafından 110M396 kod noluhızlı destek projesi kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Tatum, C. B., Funke, A. T., "Partially Automated Grading: Construction Process Innovation", **Journal of Construction Engineering and Management**, Cilt 114, No 1, 19 – 35, 1988.
2. Tatum, C. B., Vorster, M., Klingler, M. G. ve Paulson, B. C., "Systems Analysis of Technical Advancement in Earthmoving Equipment.", **Journal of Construction Engineering and Management**, Cilt 132, No 9, 976 – 986, 2006.
3. Koivo, A. J., Thoma, M. ve Kocaoglan, E., "Modeling and Control of Excavator Dynamics During Digging Operation", **Journal of Aerospace Engineering**, Cilt 9, No 1, 10 – 18, 1996.
4. Plonecki, L., Trampeczynski, W. ve Cendrowicz, J., "A concept of digital control system to assist the operator of hydraulic excavators", **Automation in Construction**, Cilt 7, 401 – 411, 1998.
5. Althoefer K., Tan P.C., Zweiri Y.H., ve Seneviratne L.D., "Hybrid soil parameter measurement and estimation scheme for excavation automation", **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Cilt 58, No 10, 3633–3641, 2009.
6. Araya, H. ve Kagoshima, M., "Semi-automatic control system for hydraulic shovel", **Automation in Construction**, Cilt 10, 477 – 486, 2001.
7. Roberts, G. W., Dodson, A. H. ve Ashkenazi, V., "Global Positioning System aided autonomous construction plant control and guidance", **Automation in Construction**, Cilt 8, 589 – 595, 1999.
8. Retscher, G. ve Mok, E., "GPS navigation and guidance systems for construction industry", **Advances in Building Technology**, Cilt 2, 1645 – 1652, 2002.
9. Saeedi, P., Lawrence, P. D., Lowe, D. G., Jacobsen, P., Kusalovic, D., Ardron, K., ve Sorensen, P. H., "An autonomous excavator with vision-based track-slippage control.", **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, Cilt 13, No. 1, 67 – 84, 2005.
10. Lee, J., Lorenc, S. J. ve Bernold, L. E., "Comparative Performance Evaluation of Tele-Operated Pipe Laying", **Journal of Construction Engineering and Management**, Cilt 129, No 1, 32 – 40, 2003.
11. Lee, S. U. ve Chang, P. H., "Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface", **Control Engineering Practice**, Cilt 10, 697 – 711, 2002.
12. Kim, S. K. ve Russell, J. S., "Framework for an intelligent earthwork system Part I. System architecture", **Automation in Construction**, Cilt 12, 1 – 13, 2003.
13. Navon, R., "Automated project performance control of construction projects", **Automation in Construction**, Cilt 14, No 4, 467 – 476, 2005.
14. Bock, T., "Construction Robotics", **Autonomous Robots**, Cilt 22 No 3, 201 – 209, 2007.
15. Lytle, A. M., Saidi, K. S., Bostelman, R. V., Stone, W. C. ve Scott, N. A., "Adapting a teleoperated device for autonomous control using three-dimensional positioning sensors: experiences with the NIST RoboCrane", **Automation in Construction**, Cilt 13, 101 – 118, 2004.
16. Chu, B., Jung, K., Lim, M. T., & Hong, D. "Robot-based construction automation: An application to steel beam assembly (Part I)" **Automation in Construction**, Cilt 32, 46 – 61, 2013.
17. Tateyama, K., Ashida, S., Fukagawa, R. ve Takahashi, H., "Geomechanics – Interaction between ground and construction machinery and its application to construction robotics", **Journal of Terramechanics**, Cilt 43, 341 – 353, 2006.
18. Kolera, B. T., Bernold, L. E., "Intelligent Utility Locating Tool for Excavators", **Journal of Construction Engineering and Management**, Cilt 132, No 9, 919 – 927, 2006.
19. http://www.mutlu.com.tr/get_content.cfm?id=17
20. Altınbaş, O., **Mikrodenetleyiciler ve PIC Programlama**, Altas yayıncılık ve Elektronik, İstanbul, 2008.
21. Kissell T. E., **Industrial Electronics**, PrenticeHall, New Jersey, 1997.
22. <http://www.gpsturk.net/profesyonel-jeodezik-ashtech-magellan-profex-lite.aspx>
23. Kimberling, C. "Triangle Centers and Central Triangles." **Congr. Numer.**, Cilt 129, 1-295, 1998.

