



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Otonom Dozer İçin Küreme Algoritması Geliştirilmesi

Adem YILDIRIM^a, Önder Halis BETTEMİR^{b*}

^a İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, TÜRKİYE

^b İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: onder.bettemir@inonu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada insan müdahalesi olmadan küreme işleminin gerçekleştirilebilmesi için yeni bir küreme algoritması geliştirilmiştir. Algoritmaya uygun biçimde küreme ve tesviye işlemlerini gerçekleştirmesi için küçük ölçekli bir otonom iş makinesinin yapması gereken hareketler hesaplanmıştır. Küreme algoritması arazi şekline bağımsız olarak programlanmıştır. Arazi modeline ve kazı projesine bağlı olarak dozer üzerindeki küreme bıçağının yapacağı hareketler hesaplanmıştır. Bıçak hareketleri hesaplanırken iş makinesinin motor gücü, hidrolik aksamın uygulayabileceği kuvvet ve bıçak boyutları göz önünde bulunduruldu. Arazi ızgara biçiminde satır ve sütunlara ayrılarak gerekli küreme işlemini kuzey güney doğrultusu boyunca yapacak biçimde dozerin hareketleri belirlenmiştir. İş makinesinin, küreme alanı koordinatları ve yüksekliğinin tanımlanması durumunda dışarıdan hiçbir müdahale ve komut almadan küreme işini gerçekleştirebilecek biçimde küreme algoritması oluşturulmuştur. Dikdörtgen bir arazi modeli oluşturulmuş ve bu arazi modeli üzerinde geliştirilen algoritma başarıyla uygulanmıştır. Geliştirilen algoritma yokuş yukarı kazı ve küreme yapmadan tesviye işini gerçekleştirir. Geliştirilen algoritma otonom iş makinesinin ihtiyaç duyduğu yapay zekânın geliştirilmesinde önemli bir adımdır.

Anahtar Kelimeler: Otonom kontrol, Küreme aracı, Makine kontrolü, Yapay zekâ

Development of Grading Algorithm for Autonomous Dozer

ABSTRACT

In this study, a new grading algorithm is developed for the execution of grading and finishing tasks without human intervention. is developed. Maneuvers of a small scale autonomous dozer which are required for shoveling and grading operations are computed. The algorithm of grading is programmed independent of the shape of the area. Movements of the dozer blade are computed by considering the elevation of the field. Restrictions on the engine power and the applicable force by the hydraulics of the dozer were also considered when computing the movements of the blade. Area is divided into grid shaped columns and rows and movement of the dozer is computed as the grading operation is performed in the direction from south to the north. The grading algorithm can perform the grading operation autonomously, if the coordinates of the area to be graded

and grade elevation are defined. A rectangular area is formed and the algorithm which autonomously performs grading operations on that area is implemented. Developed algorithm avoids excavating and grading in the upward direction. Developed grading algorithm is a significant contribution for the development of artificial intelligence for autonomous construction machines.

Keywords: Autonomous control, Grader, Machine control, Artificial Intelligence

I. GİRİŞ

İnşaat faaliyetlerinin yürütülmesi sırasında karşılaşılan zorlu çalışma koşullarında örneğin, aşırı yüksek ve düşük sıcaklarda, sürekli dikkat gerektiren işlerde ve iş kazası riskinin olduğu durumlarda en akılcı çözüm otomasyondur. Bu nedenle otomasyon ve makine kontrolü alanında birçok çalışma yürütülmüştür. İnsansız iş makinesi programlaması ve yapımı giderek yaygınlaşan bir konu haline gelmiştir. Bettemir ve Tombaloğlu [1], küçük ölçekli bir küreme aracı tasarlamış ve üretmiştir. Basit şekildeki arazi yüzeyi üzerindeki kum yığınlarını başarılı biçimde küremiştir.

Zhong vd., silindir ile sıkıştırılmış baraj inşasını katmanlar halinde analiz etmiştir. Silindir ve diğer sıkıştırma makinelerini uzay koordinat sisteminde eşleştirmiş ve otomatik olarak tanımlamıştır [2]. Lu vd., Honkong'da bir test arazisinde iş makineleri üzerinde gerçekleştirilebilecek Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi) (GPS) uygulamalarının sınırlarını belirlemiş ve uygulamayı gerçek zamanlı olarak yapmıştır [3]. GPS'in ulaşamadığı veya hata verdiği durumlarda konumu seyr-ü sefer yöntemi ile hesaplamış ve konum hassasiyetini seyr-ü sefer ile düzeltmiştir. Makineler arasındaki iletişimi *bluetooth* ile sağlamış ve cep telefonuna iletilebilir hale getirmiştir.

Vahdatikhaki vd., [4] inşaat projelerinde otomatik makine kontrolü ve otomatik makine rehberlik sistemlerinin uygulamasını incelemiştir. Üç boyutlu arazi modeli oluşturmuş ve üç boyutlu model tasarımı yapmıştır. Çalışmasında belirli bir güzergâhta çalışan hafriyat kamyonlarının ve belirli bir alan içindeki ekskavatörün çalışmasını incelemiş ve iki makine için sırası ile yüzde 86 ve 90 oranında başarı elde etmiştir. Hammad vd., [5] bir ekskavatörün konum tahminini yapmış ve gerçek zamanlı görüntülemiştir. Dört adet sensör ve bir kamera ile makinenin yerini ve gövde açısını tahmin etmiştir. Sınırlı bir alan içinde vaka çalışması yapmış ve başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Juroslaw vd., düşük maliyetli diferansiyel GPS (DGPS) alıcısının asfalt silindirler üzerinde kullanımının maliyet analizini yapmış ve verim artışı sonucu elde edilen tasarrufun DGPS maliyetinden daha düşük olduğunu belirlemiştir [6]. Hung ve Kang inşaat uygulamalarında gerçek zaman gösterimi için kümeleme metodunu kullanmış ve gerçek zamanlı görüntülemeledeki faz farkının etkisini incelemiştir. Gerçek zamanlı görüntülemenin saniyenin onda biri ile yirmide biri arasında kontrol edilmesi gerektiğini belirlemiştir [7].

Oloufa vd., kablosuz ağ, ağ teknolojileri ve DGPS'in iş makinelerinde kullanımından bahsetmiştir. Bilişim teknolojilerinin iş güvenliği için önemini vurgulamış ve çarpışma algılama analizi yapmıştır [8]. Bilişim teknolojilerinin maliyet etkin biçimde iş güvenliğini artırdığını belirtmiştir. Oloufa vd. yapı makinelerinin çarpışmasını önlemek amacı ile GPS kullanmış ve makine konumlarını kablosuz ağ ile anlık olarak merkezi sunucuya göndermiştir [9]. Makineler arasında iletişimi merkezi bir sunucu

vasıtası ile sağlamış ve çarpışmak üzere olan makinelere uyarı mesajı göndererek çarpışmayı önlemiştir. Hammad vd., büyük ölçekli inşaat projelerinin en önemli başarı kriterinin verimlilik ve güvenlik olduğuna değinmiştir. Bu iki problemi gidermek için akıllı yapı alanlarının oluşturulmasının gerektiğini vurgulamıştır. Üç boyutlu modeller ve gerçek zamanlı görüntüleme modelleri ile üretkenlik ve verimliliğin artacağını belirtmiştir. Potansiyel çarpışma durumları için uyarı mesajları veren sistemlerin kullanılabilirliğini ve üç örnek çalışmada denemiştir. Birinci çalışma da vinçlerin çarpışma analizi, ikinci çalışma da hafriyat kamyonlarının toprak set işi için üç boyutlu simülasyonunu yapmış ve üçüncü çalışmada ise köprü inşaatlarında zamansal çakışmaları gidermeye çalışmıştır [10].

Elnimr vd., dinamik değişen alanlar üzerinde mobil vinç için iki ayrı yöntemle üç boyutlu görselleştirme yapmıştır [11]. Vahdatikhaki vd., hafriyat ekipmanlarının şantiyede gerçek zamanlı simülasyonunu gerçekleştirmiş ve risk esaslı olarak tasarım yapmıştır [12]. Ölümcül kaza oranlarının %17'sinden fazlasının inşaat uygulamalarında olduğunu belirtmiş ve bu ölümlerin %75'inin ağır ekipmanlardan kaynaklandığına değinmiştir. İş güvenliğini arttırmak için gerçek zamanlı görüntüleme ve çarpışma önleme esaslı bir sistem geliştirmiştir.

Tarım ve hayvancılık uygulamalarında da otonom makineleşme ve makine iletişimi yaygın olarak kullanılmaktadır ve araştırılmaktadır. Blackmore ve Griepentrog tarım araçlarında otonom makineler ve robotik kullanımını incelemiş ve bir traktörde kullanılacak robotik elemanları tanıtmıştır [13]. Sürücü desteği, direksiyon desteği ve otomatik dümenleme konularını ele almış, Kalman filtresi ve regresyon analizi ile sürücü desteğinin nasıl olduğunu tanımlamıştır. Traktörlerde kullanılan nesne algılama sistemleri ile lazer ve ultrasonik tarayıcılar hakkında bilgi vermiştir. Çanakçı ve Yıldız, sera üretiminde kullanılan robotik uygulamaları üzerine literatür taraması yapmış ve ortam koşulları mekanizasyonu, dikim, ilaçlama ve sulama gibi konularda otonom makinelerin kullanımını incelemiştir [14]. İlaçlama gibi insan sağlığını tehdit edebilecek işlerde otomasyonun gerekli olduğuna değinmiştir. İlaçlama robotu, budama robotu, hasat robotu ve üniversal robotların kullanım alanlarından ve faydalarından bahsetmiştir. Robotların birden fazla işi uygulayabilecek biçimde tasarlanması, yapım maliyetinin azaltılması ve görüntü işleme metotları ile optimum sonucu bulması hedeflenmiştir. Auernhammer ve Speckmann, çalışmasında tarım makinelerinin birbirleri ve merkezi sunucular ile olan iletişimini ve tarımsal çalışmalar için makine iletişim standartlarını incelemiştir. Makinelerde kullanılan iletişim metotlarını, Landwirtschaftliches veriyolu sistemi ve ISO11783 standardını detaylı olarak açıklamıştır [15].

Kyriakopoulos ve Loizou çalışmasında robotun tanımını ve sınıflandırılmasında kullanılan kavramları ve robotların kinematik ve dinamik analizinin hangi ilkelere dayandığını incelemiştir. Bir robot kol için Lagrange dönüşümü ile sistemin hareket denklemlerini türetmiştir [16]. Karan vd., çalışmasında 3 boyutlu topografik veriler, uydu görüntüleri ve havadan çekilmiş fotoğraflar ile alan tanıma algoritması geliştirmiş 3 örnek çalışma üzerinde bu algoritmayı kullanmıştır. Çalışmasında 3 boyutlu topografik bilgi ve 2 boyutlu uydu görüntülerini aynı anda kullanarak hava aracının konumunu belirlemiştir [17]. 3B Nesne Bilgileri Temelli Bileşimsel Fotogrametri yöntemini arazi üzerine uygulamış, ikisi şehir merkezinde ve biri yerleşimin olmadığı yüksek bir dağda olmak üzere 3 örnek çalışma yapmıştır.

Güney ve Sayın madencilikte kullanılacak ölçmeleri yapabilecek robotlar üzerine bir çalışma yapmıştır. Açık, kapalı ve yeraltında çalışabilecek tekerlekli bir robot olan Geo-enable Robotic Surveying System (GeoRoSS) ile gerçek zamanlı olarak bulunan galeri veya boşluğun 3 boyutlu haritasının çıkarılabileceğini belirtmiştir. Robotun kendi konumunu saptayabilmesi için Eş zamanlı Konum Belirleme ve Harita Üretme (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) yöntemini

kullanmış duruş ve konum açısının hesaplanması için ise lazerli mesafe buluculardan faydalanmıştır. Ayrıca çalışmasında kapalı bir alanda gaz seviyesi ölçümü ve 3 boyutlu ısı harita uygulamalarının yapılabileceğini belirtmiştir [18].

Otonom makineler, su altı sistemleri içinde çalışılan ve araştırılan bir konudur. Eski vd., otonom bir su altı taşıtın yörüngesini yapay sinir ağı kullanarak tayin etmiştir [19]. Altı serbestlik derecesine sahip sistemin dinamik denklemlerini oluşturmuş ve PID (Proportional, Integral, Derivative) kontrolcü kıyaslama yapmıştır. Kılıç ve Kapucu OMNİMO robot modülünü tasarlayıp geliştirmiştir. Geliştirilen robot 10 farklı kenetlenme yüzeyine sahip, her uzvu bilgisayar ve başka uzuv ile iletişim kurabilmektedir [20].

Yükleyicilerin otomatik kepçe hareketlerinin oluşturulması otonom makine problemleri içinde en büyük sorunlardandır. Dadhich vd. lastik tekerlekli yükleyicinin toprak, çakıl ve parçalanmış kaya malzemelerini taşıma durumunu incelemiş ve detaylı bir literatür taraması yapmıştır. Otonom kepçe yükleme problemini yapay zekâ ve uygunluk kontrollü olmak üzere iki ayrı şekilde çözmüşlerdir [21]. Ekskavatörlerin, lastik tekerlekli yükleyicilere göre daha az hareket ettiğini ve otomasyonun daha kolay olduğunu belirtmiştir.

Alshaer vd. yol planlamasında kullanılmak üzere otonom mafsallı bir iş makinesinin modellenmesi ve simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Şantiye ve makine kısıtlarını göz önüne alarak Sheep ve Reeds Algoritmalarının bir uzantısını geliştirmiştir. Yol optimizasyon kriterleri, araç büyüklüğü ve istikrarlı dönme yarıçapını metodolojiye dahil ederek minimum mesafe ve kurp açısına göre metodolojiyi güncellemiştir. Makinenin önceden tanımlanmış bir yolda yatay konumunu yolda tutmak için PID kontrolcü kullanmıştır [22].

Robotlar ve otonom makineler birçok endüstri kolunda kullanılmaktadır. Bu çalışmada Bettemir ve Tombaloğlu tarafından geliştirilen otonom iş makinesi üzerinde çalışan küreme algoritması iyileştirilmiştir. İş makinesinin motor gücünün az olması nedeniyle yokuş yukarı küreme yapamaması ve 200 litre hacimden daha fazla kabarmış zemini itememesi nedeniyle otonom iş makinesinin üzerinde çalışan algoritma motor gücü göz önüne alınarak yenilenmiştir. Küreme bıçağı yeniden boyutlandırılmış algoritmada iyileşme sağlanmıştır.

Tesviye ve küreme işlemi özellikle havaalanı, otoyol ve demiryolu inşaatlarında yüksek hacimlerde gerçekleştirilmektedir. Yüksek hassasiyette yapılması gerektiği için inşaatın önemli bir maliyet kalemi olmasının yanı sıra oldukça uzun sürmekte ve iş uzamasına dahi neden olabilmektedir. Bu çalışmada inşaat maliyetlerinin ve süresinin azaltılması amacıyla insan müdahalesi olmadan dikdörtgen bir arazide tesviye ve küreme işlemini gerçekleştirebilecek bir algoritma geliştirilmiştir. Tesviye ve küreme işleminin otonom biçimde gerçekleştirilmesi insan kaynaklı hataları önleyip inşaat süresinin önemli ölçüde kılmasını ve maliyetlerin azalmasını sağlayacaktır. Makalenin ikinci bölümünde otonom küreme algoritması açıklanmakta, üçüncü bölümünde ise gerçekleştirilen vaka çalışmasının sonuçları sunulmuştur. Dördüncü bölümde elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve çalışmanın ileri aşamalarının neler olabileceği tartışılmıştır.

II. YÖNTEM

Otonom iş makinesinin dikdörtgen biçimindeki bir araziyi insan müdahalesi olmadan tesviyesi; küreme işlemi ve kürenen malzemenin taşınması olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamadan önce vaka analizinde kullanılmak üzere rastgele sayılar üreterek küreme işleminin yapılacağı sanal arazi modeli oluşturuldu. Rastgele sayılar kullanıldığı için özel bir arazi yapısı modellenmeyip geliştirilen algoritma genel arazi yapısı üzerinde denenmiştir. Küreme algoritmasından önce algoritmanın deneneceği arazi modelinin oluşturulma aşamaları açıklanmıştır.

A. ARAZİ MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Tesviye kazısı dikdörtgen biçimindeki bir arazide gerçekleştirilecektir. Kazı işleminin gerçekleştirildiğinin takibi için arazi kare şeklinde sonlu elemanlardan oluşacak biçimde 1 metre boyutlu satır ve sütunlara bölünerek ayrılmıştır. Arazi modeli istenilen boyutlarda olabilmekle birlikte bu çalışmada 20 m x 15 m ebatlarında bir arazi vaka çalışmasında kullanıldı. Her eleman rastgele sayılar üretilerek oluşturulan yükseklik değerine sahiptir. Rastgele sayı üretme işlemi C++ kütüphanesinde yer alan rand() komutu ile Eşitlik 1'de gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir.

$$\text{Yükseklik} = 960.0 + (\text{double})(\text{rand}()\%1000)/1000.0; \quad (1)$$

Arazinin en yüksek kotu 961, en düşük kotu ise 960 metre olacak şekilde yükseklik değerleri tayin edilmiştir. Oluşturulan yüzeyde çok ani yükseliş ve düşüşler bulunabileceği için elde edilen yükseklik değerleri Şekil 1'de gösterilen 3 x 3 boyutundaki pencere tüm arazi üzerinde gezdirilerek denklem 2'de belirtilen formül uygulanmış ve yükseklik değerleri düzeltilmiştir.

$Z_{i+1,j-1}$	$Z_{i+1,j}$	$Z_{i+1,j+1}$
$Z_{i,j-1}$	$Z_{i,j}$	$Z_{i,j+1}$
$Z_{i-1,j-1}$	$Z_{i-1,j}$	$Z_{i-1,j+1}$

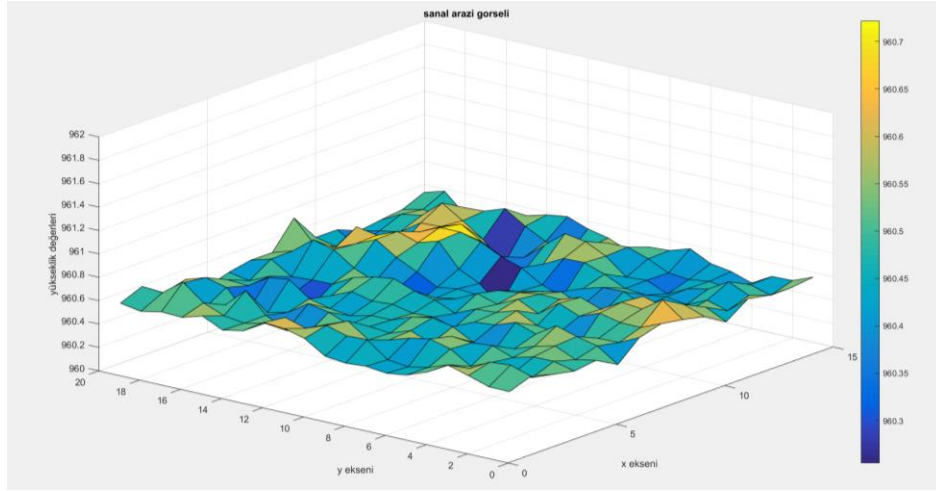
Şekil 1. Arazi modelini düzeltirmede kullanılan pencere

Eşitlik 2, dokuz noktanın eşit ağırlıklı ortalamasını almaktadır. Yüksekliği güncellenen noktalar ayrı bir parametre olarak ele alınmakta ve Eşitlik 2'de sadece ham yükseklik değerleri kullanılarak ortalama yükseklik hesaplanmaktadır.

$$Z'_{i,j} = \frac{Z_{i+1,j-1} + Z_{i,j-1} + Z_{i-1,j-1} + Z_{i+1,j} + Z_{i,j} + Z_{i-1,j} + Z_{i+1,j+1} + Z_{i,j+1} + Z_{i-1,j+1}}{9} \quad (2)$$

Yükseklik değerlerini düzeltmek için gezdirilen 3 x 3 boyutundaki pencerenin merkezinde bulunan noktanın yüksekliğini düzeltmektedir. Pencere tüm yönlerde bir birim dışarı taşıdığı için arazi modelinin sınırını oluşturan bölgelerde 9 adet noktaya ulaşamamaktadır. Bu sorunu aşmak için arazi tüm yönlerde 1 metre genişletilerek sınır bölgelerinde dahi 9 adet nokta ile yüksekliğin düzeltilmesi sağlanmıştır. Eşitlik 2'nin uygulaması ile elde edilen sanal arazi modeli Şekil 2'de sunulmuştur. Arazi

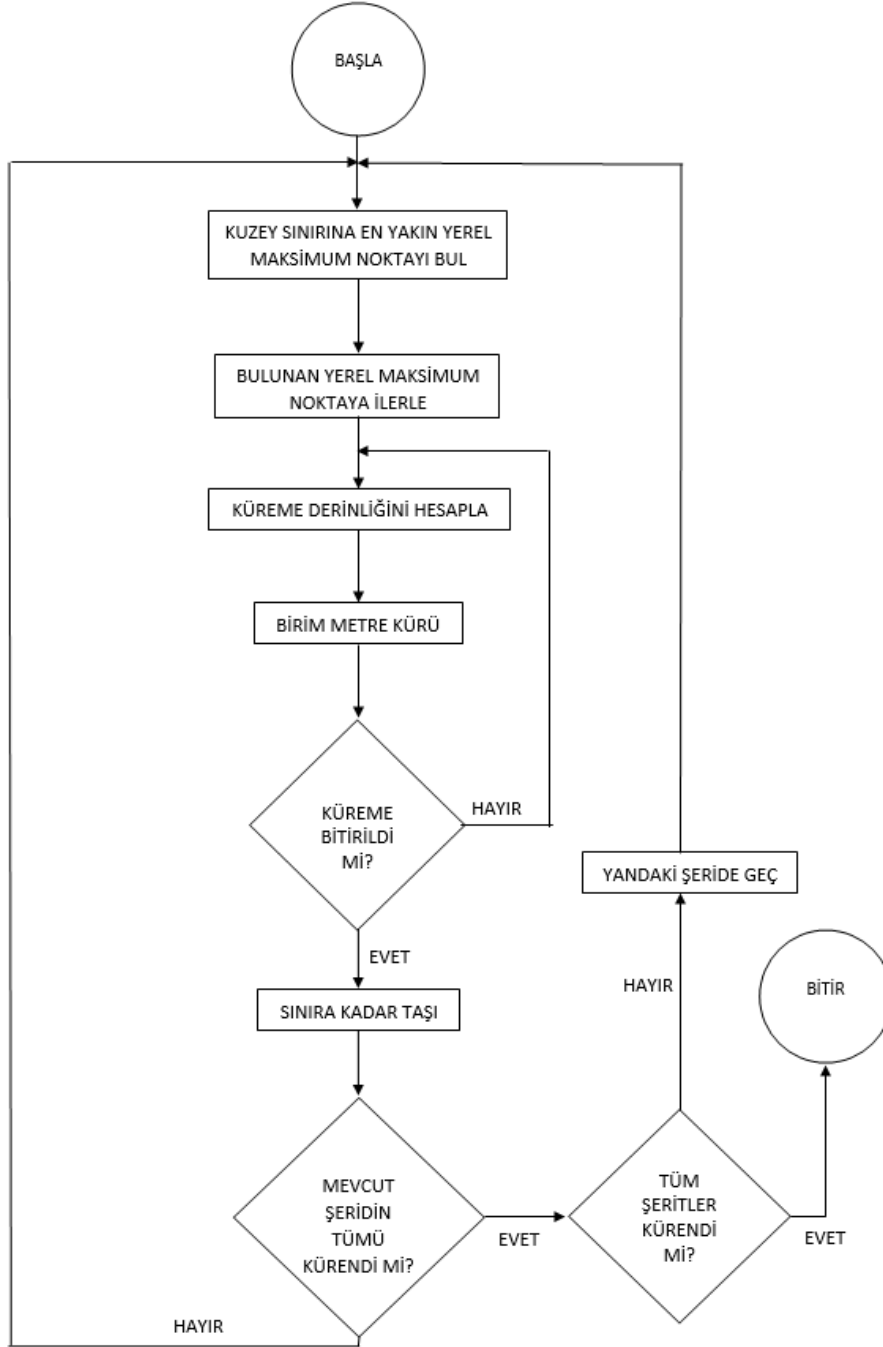
yapısının engebeli durumunun daha fazla belirgin olması için yükseklik koordinatının ölçeği yatay koordinatının ölçeğine göre 10 kat daha büyük seçilmiştir.



Şekil 2. Sanal arazinin 3-boyutlu gösterimi

B. TESVİYE ALGORİTMASI

Tesviye algoritması küreme işlemi ve kürenen malzemenin taşınması olmak üzere iki ana kısımda incelendi. Küreme işini yapacak makinenin bıçak genişliği 1 metre olduğu için arazi bıçak genişliğine eşit şekilde parçalara ayrıldı ve her bir sütun bir seferde kürenebilir duruma getirildi. Küreme işlemi kürenen şerit üzerindeki kuzey sınırına en yakın yerel maksimum noktanın belirlenmesi, bu noktaya ulaşılması, küreme derinliğinin hesaplanması ve küreme işlemlerini içermektedir. Tüm algoritma Şekil 3'te sunulan akış şemasında gösterilmiştir.



Şekil 3. Küreme işleminin akış şeması

B.1. Yerel Maksimum Noktanın Bulunması

Kazı bölgesi ile biriktirme yapılan bölge arasındaki yerel maksimum noktanın bulunmasının nedeni küreme yaparken yokuş yukarı çıkma gereğini engellemektir. Makine yerel maksimum noktayı bulurken aşağıda belirtilen dört adımı izler.

- Bulduğu sütunun en kuzeydeki noktasından aramaya başla
- Kuzeyden güneye doğru tara
- İlerlerken bulunduğu noktanın kotunu bir sonraki noktanın kotundan çıkar

Fark değerinin negatif çıktığı ilk nokta yerel maksimumdur

B.2. Küreme Derinliğinin Hesaplanması

Otonom iş makinesi küçük ölçekli olduğu için sürükleyebileceği zemin miktarı 0,2 doğal metreküptür. Geçiş esnasında 0,2 metreküp kazı yapıldığında iş makinesi kazı bıçağını yukarı kaldırarak kazı işini sonlandıracak ve ilerlerken önünde kalan arazinin yüksekliğini değiştirmeyecek sadece kazılmış zemini kuzey sınırına sürükleyecektir. İş makinesinin bulunduğu konum ile sınır arasında maksimum kazıyı yapabileceği uzaklık olmayabilir veya kazılacak arazi kotu istenilen kota çok yakın olabilir. Bu durumda kazı derinliği değişkenlik gösterebilir ve iş makinesi her durumda 0,2 m³ kazı yapamayabilir.

Maksimum derinlikte kazı yapılabilirdiği durumda kazılan malzemenin sürüklenmesi için en fazla 4 metre boyunca kazı yapabilecektir. Bu durumda tam derinlikte küreme yapılıp yapılamayacağı kontrol edilir. Eğer tam derinlikte kazı yapıldığında istenen derinliğin altına inilmiyorsa tam derinlikte kazı yapılır. İstenilen derinliğin altına iniliyorsa kazı derinliği *mevcut yükseklik - istenilen yükseklik* ifadesine eşitlenerek kazı yapılır. Kazı yapılan yerlerde yükseklik değerinden kazı derinliği çıkarılıp yükseklik değeri kazılan birim alan için yeniden güncellenmektedir. Bu işlem yükseklik değeri istenilen değere ininceye kadar devam edecektir. Arazi yüksekliğinin istenilen kottan farkı maksimum kazı derinliğinden küçük olması durumunda küreme yüksekliği arazi yüksekliğinin istenilen kottan farkına eşit olacaktır. Mevcut yükseklik ile istenilen yükseklik arasındaki fark maksimum kazı derinliğinden daha fazla ise maksimum kazı derinliği aşağıda belirtildiği gibi hesaplanır.

- En çok sürüklenebilen ile şu an sürüklenen malzeme farkını hesapla
- Kazılabilecek hacmi ve derinliği hesapla
- Maksimum kazı derinliği ve kazılabilir derinlik arasından küçük olanı seç

Mevcut yükseklik ile istenilen yükseklik arasındaki fark maksimum kazı derinliğinden daha az ise maksimum kazı derinliği aşağıda belirtildiği gibi hesaplanır.

- Maksimum kazı derinliği mevcut yükseklik - kazı derinliğine eşitle
- En çok sürüklenebilen ile şu an sürüklenen malzeme farkını hesapla
- Kazılabilecek hacmi ve derinliği hesapla
- Maksimum kazı derinliği ve kazılabilir derinlik arasından küçük olanı seç

İş makinesinin bıçağının önünde sürüklenen toprak hacmi maksimum küreme hacmine ulaştığı veya kazı kotu istenilen kota geldiği durumda otonom iş makinesi küremeyi kendisi bırakır ve kürüdüğü toprak hacmini kuzey sınırına taşır. Küreme işleminin akış şeması Şekil 4'te sunulmuştur.

Küreden toprak hacmi kazılan toprak hacmine eşit olmayacaktır. Bunun nedeni toprağın doğal halde bulunduğu yerden kazıldığı durumda içerdiği boşluk hacminin artmasıdır. Ayrıca iş makinesinin sürüklediği zemin sürekli yoğrulacağı için boşluk hacmi daha da artacaktır. Hacmin artması ağırlığı değiştirmeyeceğinden zemin miktarı kabarmış hacim olarak değil, doğal hacim olarak dikkate alınmıştır.

III. VAKA ÇALIŞMASI VE ANALİZ SONUÇLARI

Örnek çalışma için oluşturulan sanal arazinin yükseklik değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Örnek çalışmada kazı kotu 960 metre olarak belirlenmiştir. Tabloda verilen değerler arazi modelinin düzleştirilmiş hali olmasına rağmen birçok yerel maksimum ve yerel minimum değeri barındırmaktadır. Küreme algoritması yapacağı her geçişte kuzeye en yakın yerel maksimum noktayı bulmakta ve bu noktadan kuzey sınırına doğru küreme ve taşıma işi yapmaktadır.

Tablo 1. Arazi modeli yükseklik değerleri

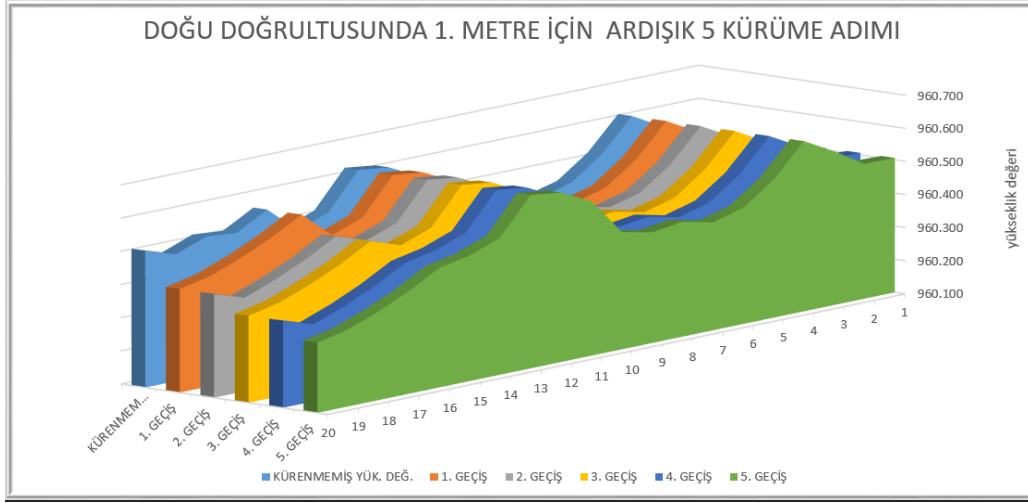
LI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	960.506	960.571	960.521	960.483	960.508	960.406	960.571	960.623	960.592	960.551	960.441	960.571	960.536	960.535	960.557
2	960.508	960.627	960.454	960.527	960.475	960.526	960.489	960.552	960.722	960.615	960.526	960.430	960.493	960.430	960.489
3	960.564	960.614	960.442	960.525	960.553	960.567	960.485	960.554	960.604	960.559	960.440	960.480	960.572	960.480	960.485
4	960.614	960.519	960.504	960.480	960.511	960.619	960.389	960.595	960.622	960.606	960.426	960.404	960.470	960.404	960.389
5	960.517	960.510	960.432	960.543	960.449	960.510	960.448	960.529	960.523	960.454	960.415	960.430	960.433	960.430	960.448
6	960.451	960.450	960.541	960.528	960.389	960.569	960.476	960.601	960.586	960.384	960.502	960.406	960.349	960.406	960.476
7	960.426	960.415	960.587	960.543	960.426	960.508	960.564	960.472	960.527	960.404	960.498	960.423	960.426	960.423	960.564
8	960.447	960.436	960.555	960.443	960.520	960.493	960.509	960.556	960.534	960.487	960.449	960.505	960.414	960.505	960.509
9	960.434	960.567	960.499	960.513	960.557	960.405	960.499	960.474	960.507	960.450	960.339	960.565	960.554	960.565	960.499
10	960.454	960.561	960.460	960.452	960.525	960.457	960.423	960.525	960.486	960.413	960.401	960.561	960.639	960.561	960.423
11	960.566	960.612	960.582	960.469	960.460	960.449	960.498	960.442	960.405	960.255	960.507	960.472	960.668	960.472	960.498
12	960.611	960.547	960.514	960.443	960.458	960.487	960.536	960.408	960.421	960.401	960.566	960.362	960.529	960.362	960.536
13	960.623	960.600	960.392	960.512	960.416	960.476	960.601	960.319	960.395	960.485	960.651	960.455	960.384	960.455	960.601
14	960.513	960.511	960.383	960.547	960.438	960.518	960.577	960.394	960.487	960.684	960.695	960.546	960.281	960.546	960.577
15	960.479	960.472	960.472	960.432	960.482	960.442	960.530	960.429	960.572	960.631	960.695	960.657	960.460	960.657	960.530
16	960.560	960.497	960.646	960.391	960.608	960.303	960.436	960.507	960.686	960.688	960.618	960.596	960.580	960.596	960.436
17	960.509	960.567	960.483	960.343	960.586	960.366	960.432	960.625	960.608	960.615	960.436	960.588	960.693	960.588	960.432
18	960.517	960.706	960.418	960.527	960.476	960.490	960.420	960.670	960.532	960.648	960.395	960.472	960.547	960.472	960.420
19	960.482	960.576	960.596	960.572	960.487	960.412	960.532	960.535	960.522	960.441	960.370	960.442	960.518	960.492	960.582
20	960.512	960.589	960.469	960.516	960.385	960.445	960.482	960.481	960.711	960.479	960.478	960.402	960.429	960.452	960.532

Tablo 2. Doğu doğrultusunda 1. metre için ardışık 5 küreme işlemi için yükseklik değerleri

METRE	DOĞU DOĞRULTUSUNDA 1. METRE İÇİN ARDIŞIK 5 KÜREME ADIMI DEĞERLERİ					
	KÜRENMEMİŞ YÜK. DEĞ.	1. GEÇİŞ	2. GEÇİŞ	3. GEÇİŞ	4. GEÇİŞ	5. GEÇİŞ
	Yerel Max Nokta 17	Yerel Max Nokta 15	Yerel Max Nokta 19	Yerel Max Nokta 15	Yerel Max Nokta 19	Yerel Max Nokta 12
1	960.506	960.506	960.506	960.506	960.506	960.506
2	960.508	960.508	960.508	960.508	960.508	960.508
3	960.564	960.564	960.564	960.564	960.564	960.564
4	960.614	960.614	960.614	960.614	960.614	960.614
5	960.517	960.517	960.517	960.517	960.517	960.517
6	960.451	960.451	960.451	960.451	960.451	960.451
7	960.426	960.426	960.426	960.426	960.426	960.426
8	960.447	960.447	960.447	960.447	960.447	960.447
9	960.434	960.434	960.434	960.434	960.434	960.434
10	960.454	960.454	960.454	960.454	960.454	960.454
11	960.566	960.566	960.566	960.566	960.566	960.566
12	960.611	960.611	960.611	960.611	960.611	960.611
13	960.623	960.623	960.623	960.623	960.623	960.623
14	960.513	960.513	960.513	960.513	960.513	960.513
15	960.479	960.479	960.479	960.479	960.479	960.479
16	960.560	960.560	960.510	960.510	960.460	960.460
17	960.509	960.509	960.459	960.459	960.409	960.409
18	960.517	960.467	960.417	960.417	960.367	960.367
19	960.482	960.432	960.382	960.382	960.332	960.332
20	960.512	960.412	960.412	960.362	960.362	960.312

Algoritma C++ dili kullanılarak programlanmıştır. Algoritmanın çıktıları Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir. Sütun sayısına bağlı olarak rastgele 3 sütunun verileri verilmiş ve küreme esnasında rastgele seçilen veriler grafik ile görsel hale getirilmiştir. Tablo 2, 3 ve 4'ün görselleştirilmiş hali sırası

ile Şekil 4, 5 ve 6'da verilmiştir. Grafik ve rakamsal veriler çalışmanın tüm detaylarının anlaşılabilmesini sağlaması açısından destekleyici olması amacıyla verilmiştir.



Şekil 4. Doğu doğrultusunda 1. metre için ardışık 5 küreme işlemi için yükseklik değerleri

Vaka çalışmasında Tablo 2 ve Şekil 4'te sunulan arazi modelinin tüm noktalarında yüksek değerinin 960 metreye getirilmesi amaçlanmıştır. Algoritma tesviye işlemine arazinin kuzey doğusundan başlamaktadır. Doğu doğrultusuna göre ilk kuzey-güney sütununun ilk hali Tablo 2'nin ilk sütununda, Şekil 4'te ise açık mavi kesit ile gösterilmiştir. Kuzey sınırına en yakın olan yerel maksimum Tablo 2'nin ilk sütununda işaretlenmiştir. İş makinesi bu konuma gidip yerel maksimumdan noktadan küreme işine başlar. İlk geçişten sonra arazinin yapısı Tablo 2'de ikinci sütunda Şekil 4'te ise turuncu kesit ile gösterilmiştir. Arazi yapısına da bağlı olarak geçişler sonrasında yerel maksimum değişebilmekte ve küreme işlemine farklı yerlerden devam edilmektedir. Tablo 2 ve Şekil 4'te ilk 5 geçiş sonucu oluşan arazi yapısı verilmiştir. Aynı kesitin tesviye işleminin ileri aşamaları Tablo 3 ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Tablo 3 ve Şekil 5'te 10 geçiş yapılmasının ardından oluşan arazi yapısı gösterilmektedir. En son sütunda ve kesitte ise küreme işleminin tamamlanmış hali sunulmuştur. Kuzey-güney ekseninde ilk kesit toplam 64 geçiş ile istenilen yükseklik değerine getirilmiştir.

Tablo 3. Doğu doğrultusunda 1. metre için küreme adımları yükseklik değerleri

METRE	DOĞU DOĞRULTUSUNDA 1.METRE İÇİN KÜREME ADIMI DEĞERLERİ									
	KÜRENMEMİŞ YÜK.DEĞ.	1.GEÇİŞ	5.GEÇİŞ	10.GEÇİŞ	20.GEÇİŞ	30.GEÇİŞ	40.GEÇİŞ	50.GEÇİŞ	60.GEÇİŞ	64.GEÇİŞ
	Yerel Max Nokta 17	Yerel Max Nokta 15	Yerel Max Nokta 19	Yerel Max Nokta 11	Yerel Max Nokta 18	Yerel Max Nokta 15	Yerel Max Nokta 15	Yerel Max Nokta 0	Yerel Max Nokta 4	
1	960.506	960.506	960.506	960.506	960.506	960.506	960.506	960.506	960.306	960.000
2	960.508	960.508	960.508	960.508	960.508	960.508	960.508	960.458	960.258	960.000
3	960.564	960.564	960.564	960.564	960.564	960.564	960.564	960.414	960.214	960.000
4	960.614	960.614	960.614	960.614	960.614	960.614	960.514	960.364	960.164	960.000
5	960.517	960.517	960.517	960.517	960.517	960.517	960.417	960.267	960.167	960.000
6	960.451	960.451	960.451	960.451	960.451	960.451	960.351	960.251	960.151	960.000
7	960.426	960.426	960.426	960.426	960.426	960.426	960.326	960.226	960.126	960.000
8	960.447	960.447	960.447	960.447	960.447	960.397	960.297	960.197	960.097	960.000
9	960.434	960.434	960.434	960.434	960.434	960.384	960.284	960.184	960.084	960.000
10	960.454	960.454	960.454	960.454	960.454	960.354	960.254	960.154	960.054	960.000
11	960.566	960.566	960.566	960.566	960.516	960.316	960.216	960.116	960.016	960.000
12	960.611	960.611	960.611	960.611	960.511	960.311	960.211	960.111	960.011	960.000
13	960.623	960.623	960.623	960.573	960.473	960.273	960.173	960.073	960.000	960.000
14	960.513	960.513	960.513	960.463	960.363	960.213	960.113	960.013	960.000	960.000
15	960.479	960.479	960.479	960.429	960.329	960.179	960.079	960.000	960.000	960.000
16	960.560	960.560	960.510	960.100	960.310	960.210	960.110	960.000	960.000	960.000
17	960.509	960.509	960.459	960.409	960.309	960.209	960.109	960.000	960.000	960.000
18	960.517	960.467	960.417	960.367	960.267	960.167	960.067	960.000	960.000	960.000
19	960.482	960.432	960.382	960.332	960.282	960.132	960.032	960.000	960.000	960.000
20	960.512	960.412	960.412	960.312	960.262	960.112	960.012	960.000	960.000	960.000

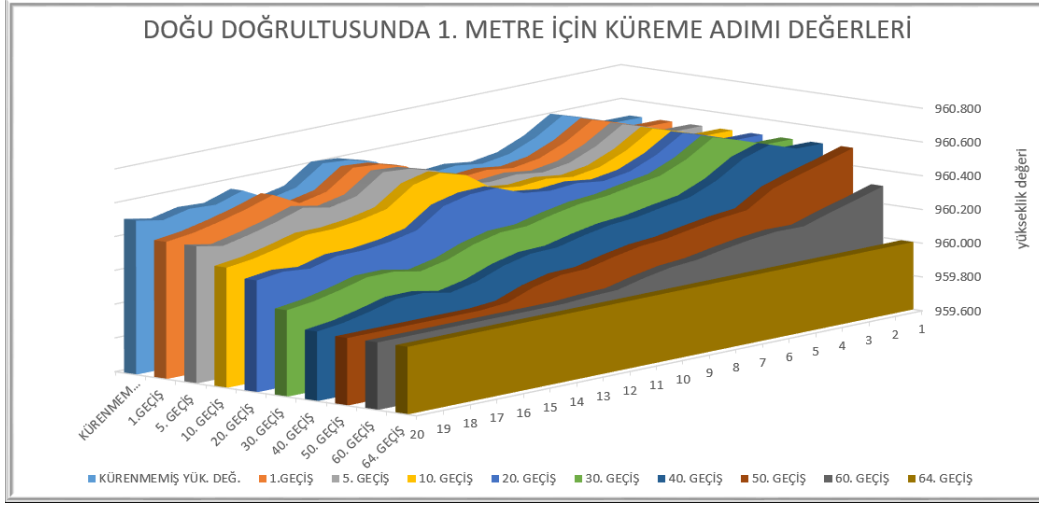
Tablo 4. Doğu doğrultusunda 7. metre için küreme adımları yükseklik değerleri

METRE	DOĞU DOĞRULTUSUNDA 7.METRE İÇİN KÜREME ADIMI DEĞERLERİ								
	KÜRENMEMİŞ YÜK.DEĞ.	1.GEÇİŞ	5.GEÇİŞ	10.GEÇİŞ	20.GEÇİŞ	30.GEÇİŞ	40.GEÇİŞ	50.GEÇİŞ	60.GEÇİŞ
	Yerel Max Nokta 18	Yerel Max Nokta 18	Yerel Max Nokta 12	Yerel Max Nokta 18	Yerel Max Nokta 14	Yerel Max Nokta 16	Yerel Max Nokta 12	Yerel Max Nokta 8	
1	960.571	960.571	960.571	960.571	960.571	960.571	960.471	960.321	960.000
2	960.489	960.489	960.489	960.489	960.489	960.489	960.389	960.239	960.000
3	960.485	960.485	960.485	960.485	960.485	960.485	960.385	960.235	960.000
4	960.389	960.389	960.389	960.389	960.389	960.389	960.289	960.139	960.000
5	960.448	960.448	960.448	960.448	960.448	960.348	960.248	960.098	960.000
6	960.476	960.476	960.476	960.476	960.476	960.326	960.226	960.076	960.000
7	960.564	960.564	960.564	960.564	960.464	960.314	960.214	960.064	960.000
8	960.509	960.509	960.509	960.509	960.409	960.259	960.159	960.009	960.000
9	960.499	960.499	960.499	960.499	960.399	960.249	960.149	960.049	960.000
10	960.423	960.423	960.423	960.423	960.323	960.223	960.123	960.023	960.000
11	960.498	960.498	960.498	960.448	960.298	960.198	960.098	960.000	960.000
12	960.536	960.536	960.536	960.436	960.286	960.186	960.086	960.000	960.000
13	960.601	960.601	960.551	960.401	960.251	960.151	960.101	960.000	960.000
14	960.577	960.577	960.527	960.377	960.227	960.127	960.077	960.000	960.000
15	960.530	960.530	960.480	960.330	960.230	960.080	960.030	960.000	960.000
16	960.436	960.436	960.386	960.286	960.186	960.036	960.000	960.000	960.000
17	960.432	960.432	960.382	960.282	960.182	960.082	960.000	960.000	960.000
18	960.420	960.420	960.370	960.270	960.170	960.070	960.000	960.000	960.000
19	960.532	960.482	960.332	960.282	960.132	960.032	960.000	960.000	960.000
20	960.482	960.432	960.282	960.232	960.082	960.000	960.000	960.000	960.000

Tablo 5. Doğu doğrultusunda 12. metre için küreme adımları yükseklik değerleri

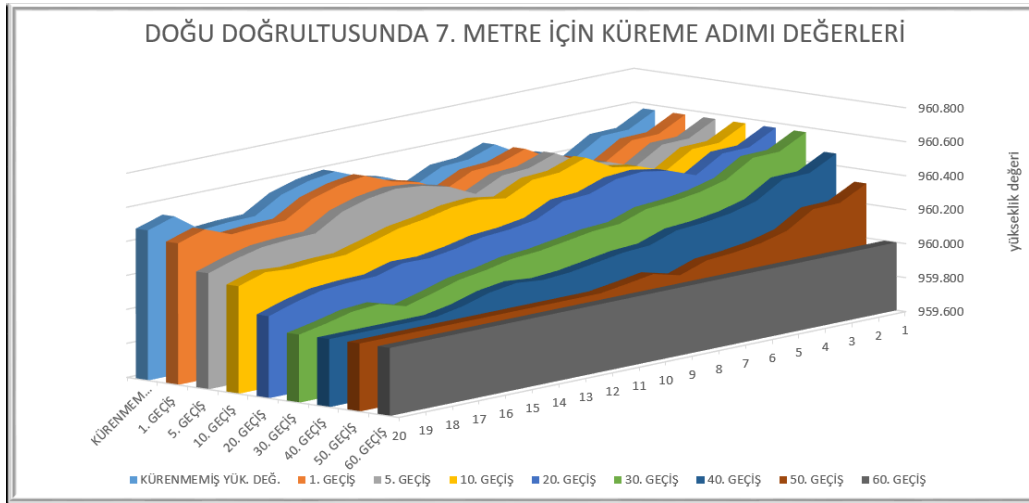
DOĞU DOĞRULTUSUNDA 7.METRE İÇİN KÜREME ADIMI DEĞERLERİ									
METRE	KÜRENMEMİŞ YÜK.DEĞ.	1.GEÇİŞ	5.GEÇİŞ	10.GEÇİŞ	20.GEÇİŞ	30.GEÇİŞ	40.GEÇİŞ	50.GEÇİŞ	60.GEÇİŞ
	<i>Yerel Max Nokta 14</i>	<i>Yerel Max Nokta 18</i>	<i>Yerel Max Nokta 18</i>	<i>Yerel Max Nokta 12</i>	<i>Yerel Max Nokta 6</i>	<i>Yerel Max Nokta 2</i>	<i>Yerel Max Nokta 8</i>	<i>Yerel Max Nokta 0</i>	
1	960.571	960.571	960.571	960.571	960.571	960.571	960.471	960.321	960.000
2	960.430	960.430	960.430	960.430	960.430	960.430	960.330	960.180	960.000
3	960.480	960.480	960.480	960.480	960.480	960.430	960.280	960.130	960.000
4	960.404	960.404	960.404	960.404	960.404	960.354	960.204	960.054	960.000
5	960.430	960.430	960.430	960.430	960.430	960.330	960.180	960.030	960.000
6	960.406	960.406	960.406	960.406	960.406	960.306	960.156	960.006	960.000
7	960.423	960.423	960.423	960.423	960.423	960.273	960.123	960.000	960.000
8	960.505	960.505	960.505	960.505	960.405	960.255	960.105	960.000	960.000
9	960.565	960.565	960.565	960.565	960.365	960.215	960.115	960.000	960.000
10	960.561	960.561	960.561	960.561	960.361	960.211	960.111	960.000	960.000
11	960.472	960.472	960.472	960.472	960.272	960.172	960.072	960.000	960.000
12	960.362	960.362	960.362	960.362	960.262	960.162	960.062	960.000	960.000
13	960.455	960.455	960.455	960.405	960.255	960.155	960.055	960.000	960.000
14	960.546	960.546	960.546	960.396	960.246	960.146	960.046	960.000	960.000
15	960.657	960.607	960.507	960.357	960.207	960.107	960.007	960.000	960.000
16	960.596	960.546	960.446	960.296	960.146	960.046	960.000	960.000	960.000
17	960.588	960.538	960.438	960.288	960.138	960.038	960.000	960.000	960.000
18	960.472	960.422	960.322	960.272	960.122	960.022	960.000	960.000	960.000
19	960.442	960.442	960.342	960.242	960.092	960.000	960.000	960.000	960.000
20	960.402	960.402	960.302	960.202	960.052	960.000	960.000	960.000	960.000

Tablo 4 ve Şekil 6'da ise doğu ekseninde 7. metrede bulunan şerdin küreme adımları gösterilmiştir. Arazi toplam 60 geçişte istenilen yükseklik değerine getirilmiştir.

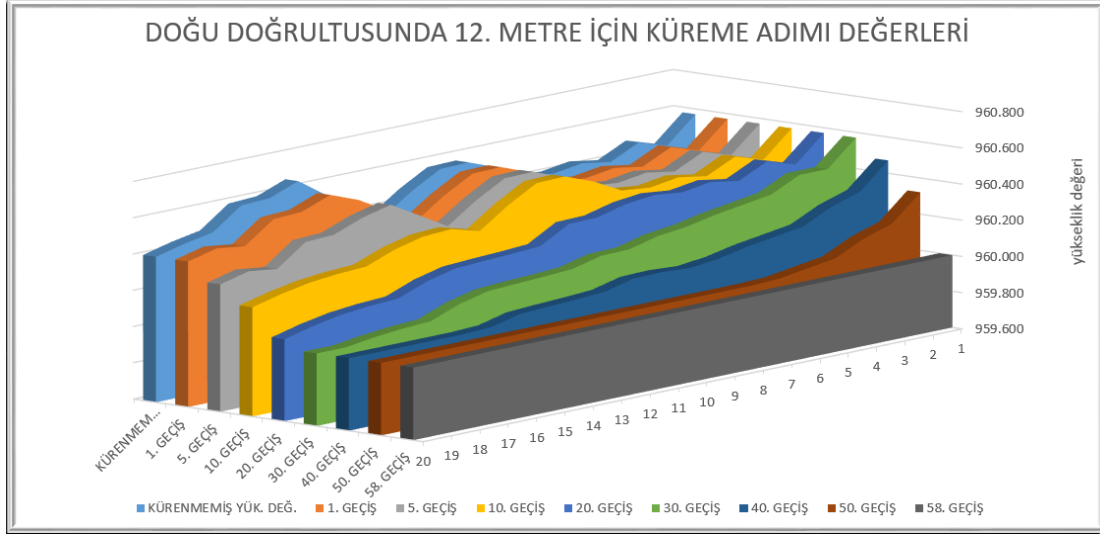


Şekil 5. Doğu doğrultusunda 1. metre için küreme adımları yükseklik değerleri

Tablo 5 ve Şekil 7'de doğu ekseninde 12. metrede bulunan şerdin küreme adımları gösterilmiştir. Arazi toplam 58 geçişte istenilen yükseklik değerine getirilmiştir. Tüm geçişlerde iş makinesi kazı ve kazılan malzemenin sürüklenmesi işlemlerini yokuş yukarı çıkmadan gerçekleştirmiştir. Bu sayede iş makinesinin güç gereksinimi azaltılmış ve enerji tasarrufu elde edilmiştir.



Şekil 6. Doğu doğrultusunda 7. metre için küreme adımları yükseklik değerleri



Şekil 7. Doğu doğrultusunda 12. metre için küreme adımları yükseklik değerleri

IV. SONUÇ

Bu çalışmada insan müdahalesi olmadan dikdörtgen biçimindeki bir arazinin tesviye işlemini gerçekleştirebilen bir algoritma geliştirilmiş ve denenmiştir. Vaka çalışması sonucu elde edilen sonuçlar algoritmanın başarılı biçimde çalıştığını göstermiştir. Küreme algoritmasının daha karmaşık arazi şekli ve yapısına uygun hale getirilmesi ve çarpışma tespit ve önleme sistemleri ile desteklenmesi durumunda insansız iş makinelerinin geliştirilmesi hususunda önemli bir yol alınacaktır.

Geliştirilen algoritma arazinin kuzey sınırına en yakın yerel maksimumu bulup küremeye bu noktadan başlamaktadır. Sonuç değerleri incelendiğinde geliştirilen algoritmanın yokuş yukarı kazılması ve kazılan malzemenin sürüklenmesinin önüne geçildiği belirlenmiştir. Bu sayede geliştirilen algoritma mümkün olan en düşük motor gücü ile küreme işlemini gerçekleştirebilmektedir. Bu özellik iş makinesi gücünün yetersiz kalabileceği eğimin saptanması gerekliliğini ortadan kaldırmakta ve otonom küremeyi kolaylaştırmaktadır.

İş makinesinin kısıtları ihlal edilmeden küreme işi yapılabilen ve arazi istenilen kota geldiğinde kazı işi sonlandırılmaktadır. Arazi boyutları kullanıcı tarafından programa girilebileceği için her boyuttaki araziye uygulanması mümkündür, ancak arazinin dikdörtgen biçiminde olması gereklidir. Makine üzerindeki kısıtlar makinenin boyutları düşünülerek belirlenmiştir. Daha büyük iş makineleri için bu kısıtlar gevşeyeceği için geçiş sayısı azalacak ve kazı süresi de kısıllanacaktır.

Bu çalışma ile sanal olarak oluşturulan arazi otonom bir şekilde kürenmektedir. Çalışma şartlarının güç olduğu durumlarda makine insan müdahalesi olmadan küreme ve taşıma yeteneği kazandırılmıştır. Nükleer sızıntı ve doğal afet bölgeleri gibi yüksek risk bulunduran yerlerde kazı ve taşıma işlemlerinin yapılabilmesi mümkün olmuştur. İş makinesinin otonom olmasından dolayı risk etkenleri azalacak ve işçi sağlığı ve güvenliği daha düşük maliyetlerle sağlanacaktır.

Uygulamada yüksek hassasiyet gerektiren küreme işleri insan müdahalesi olmadan yapılması sağlanmıştır. Yüksek hassasiyet isteyen işler deneme yanılma ile yapıldığında yüksek yakıt gideri gerektireceği için geliştirilen küreme algoritması önemli ölçüde yakıt tasarrufu elde etme imkânı

sunmuştur. Ayrıca yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda kazı süresi daha düşük hassasiyet gerektiren işlere göre daha uzun sürmektedir. Otonom iş makinesi, tesviye işlerinde oluşabilecek süre artışını engelleme potansiyeline sahiptir. Belirlenen kazı işleminin gerçekleştirilebilmesi için iş makinesinin motor hareketleri ve motorlarına gönderilecek komutların hesabı bu çalışmanın devamı niteliğindedir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma FYL-2017-592 kod numaralı proje kapsamında İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] Ö. H. Bettemir ve Burak Tombaloğlu. "Kürüme İçin Küçük Ölçekli Otonom İş Makinesi Tasarımı ve Üretimi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 28, no.3, 2013.
- [2] D. Zhong, Z. Ping ve W. KangXin, "Theory and practice of construction simulation for high rockfill dam." *Science in China Series E: Technological Sciences*, vol. 50, no. 1, pp. 51-61, 2007.
- [3] M. Lu, W. Chen, X. Shen, H. C. Lam, J. Liu et al, "Positioning and tracking construction vehicles in highly dense urban areas and building construction site,." *Automation in construction* vol. 16, no. 5, pp. 647-656, 2007.
- [4] F. Vahdatikhaki, H. Amin ve H. Siddiqui, "Optimization-based excavator pose estimation using real-time location systems." *Automation in Construction*, vol. 56, pp. 76-92, 2015.
- [5] A. Hammad, F. Vahdatikhaki and C. Zhang, "A novel integrated approach to project-level automated machine control/guidance systems in construction projects," *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, vol. 18, no. 9, pp. 162-181, 2013.
- [6] J. Jurasz, Jaroslaw, ve K. Kley, "A Cost-Effective Positioning Solution For Asphalt Rollers Based On Low-Cost DGPS Receiver," *Nist Special Publication Sp*, pp. 403-408, 2003.
- [7] Hung, Wei-Han, ve Shih-Chung Jessy Kang, "Automatic clustering method for real-time construction simulation," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 28, no.2, pp. 138-152, 2014.
- [8] A. A. Oloufa, M. Ikeda, H. Oda, "Situational awareness of construction equipment using GPS, wireless and web Technologies," *Automation in Construction*, vol. 12, no. 6 pp. 737-748, 2003.
- [9] A. Oloufa, M. Ikeda, H. Oda. "GPS-based wireless collision detection of construction equipment," *NIST Special Publication sp*, pp. 461-466, 2003.
- [10] A. Hammad, et al, "Towards the smart construction site: improving productivity and safety of construction projects using multi-agent systems, real-time simulation and automated machine control." *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2012 Winter, IEEE*, 2012.

- [11] ElNimr, Amr, Muaz Fagiar, ve Yasser Mohamed. "Two-way integration of 3D visualization and discrete event simulation for modeling mobile crane movement under dynamically changing site layout." *Automation in Construction*, vol. 68, pp. 235-248, 2016.
- [12] F. Vahdatikhaki, A. Hammad, "Risk-based look-ahead workspace generation for earthwork equipment using near real-time simulation," *Automation in Construction* 58, pp. 207-220, 2015.
- [13] B. S. Blackmore, H. W. Griepentrog, "Autonomous vehicles and robots," *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006.
- [14] Ç. Murad, ve E. Yıldız, "Sera Üretim Mekanizasyonunda Robotik Uygulamalar: Literatür Çalışması," *28. Ulusal Tarımsal Mekanizasyon Kongresi*, Konya, Türkiye 2013.
- [15] H. Auernhammer, H. Speckmann. "7 Communication Issues and Internet Use," vol. 435, 2006.
- [16] K. J. Kyriakopoulos, S. G. Loizou. "2.4 Robotics: Fundamentals and Prospects," vol. 93, 2006.
- [17] H. A. Eraslan, S. Kurnaz, "Topografik Bilgiler Ve Uydu Görüntü Verilerini Kullanarak 3 Boyutlu Alan Tanıma Sistemi," *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, vol. 4, no. 4, pp. 31-40, 2010.
- [18] C. Güney, S. B. Sayın. "Jeodezik Ölçme Ve Mekansal Karar Destek İçin Robotik Bir Yaklaşım," XVIII. Akademik Bilişim Konferansı, 2016.
- [19] İ. Eski, vd. "Otonom Sualtı Taşıtların Yörünge Kontrolü için Yapay Sinir Ağı Kontrol Sistemi Tasarımı."
- [20] A. Kılıç, K. Sadettin, "Modüler Yeniden Yapılandırılabilir Robot Modülü Omnimo'nun Tasarımı ve Üretimi." *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 31, no. 3, 2016.
- [21] S. Dadhich, U. Bodin, U. Andersson, "Key challenges in automation of earth-moving machines," *Automation in Construction*, vol. 68, pp. 212-222, 2006.
- [22] Alshaer, B. J., T. T. Darabseh, and M. A. Alhanouti. "Path planning, modeling and simulation of an autonomous articulated heavy construction machine performing a loading cycle." *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, no. 7, pp. 5315-5325, 2003.