

Kazı ve Hafriyat Sürelerindeki Belirsizliğin Monte Carlo Analizi ile Tahmini

Önder Halis BETTEMİR¹

¹Yüzüncü Yıl Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Van

Özet: Bu çalışmada, kazı ve hafriyat işlerinin gerçekleştirilebilmesi için gereken süre ve iş makinelerinin kullanım saatlerindeki belirsizliğin tahmini Monte Carlo analizi ile yapılmıştır. İş planlamasında sıkça karşılaşılan belirsizlikler ve risklerin iş takvimine yansıtılamaması sorunu bu şekilde modellenmeye çalışılmıştır. Hava durumu, zemin koşulları ve operatör verimliliği ile ilgili belirsizlikler ve riskler Monte Carlo analizi ile modellenmiş ve bu etkenlerin iş bitirme süresine ve ekipman ihtiyacına olan etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada, iş makinelerinin verimi için sektörde yaygın olarak kullanılan makine verim tablolarından yararlanılmış, tabloların verdiği belirsizlik aralığında rastgele sayılar üretilerek verimlilik tahmin edilmiştir. Örnek çalışma olarak 50.000 m³ kazı gerektiren yol inşaatın küçük bir kısmı için yarma çalışması kullanılmış ve yöntemin performansı ve kullanılabilirliği incelenmiştir. Monte Carlo benzetimi 1000 kere tekrarlanmış ve analiz sonucunda en olası iş bitirme zamanı, toplam iş makine kullanım saati ve bunların belirsizliği hesaplanmıştır. Böylece, en olası değerler kullanılarak işin maliyetinin hesaplanması, bu değerlerdeki belirsizlikler kullanılarak ise maliyet ve süre hesabındaki riskin belirlenmesi mümkün olabilecektir. Diğer taraftan, ihale öncesi bu tür bir analiz yapılarak risklerin tahmin edilip daha tutarlı bir güvence payı eklenerek teklif hazırlanması mümkün olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Monte Carlo Analizi, Proje Planlaması, İnşaat benzetimi

Prediction of Uncertainty in Excavation and Haul Durations by Monte Carlo Analysis

Abstract: In this study, uncertainty in the duration and machine-hour requirements of excavation and haul activities are predicted by Monte Carlo analysis. Uncertainties and risks which are usually faced during the planning phase of the construction are tried to be taken into account. Uncertainties and risks related with weather and soil conditions and productivity of the operators are modeled by Monte Carlo analysis and the affect of these variables on the construction duration and machine-hours are examined. In this study, productivity of construction machines are estimated by the productivity charts of the construction machines which is a widespread method generally accepted in the construction sector. The uncertainty ranges in the productivity charts are directly used in Monte Carlo analysis by generating random numbers in the ranges obtained from the productivity charts and the productivity of the machine is estimated. As a case study a small section of a road construction which requires a cut of 50,000 m³ of earthwork is used and the performance and the usability of the method is examined. Monte Carlo simulation is performed by repeating the analysis 1000 times and most probable construction duration and total machine-hours with their uncertainties are obtained. By this means, with the most probable values cost and duration of the construction can be estimated and the risks of the construction can be determined by taking the uncertainties of the estimation into account. By executing Monte Carlo analysis it will be possible to estimate the risks properly and more precise contingency ratio can be assigned in the bid for the risks.

Keywords: Monte Carlo Analysis, Project Planning, Construction Simulation

Giriş

İnşaat projelerinin ihale öncesinde yapım sürelerinin ve maliyetlerinin doğru hesaplanması büyük önem taşır. İhale sürecinde ayrıntılı veri toplamaya yetecek zamanın olmaması nedeniyle teklif hazırlanması sırasında detaylı bilgiye sahip olunamamaktadır. Eksik verilerle hazırlanacak olan ihale dosyası ise bazı riskler içermektedir. Örneğin, bir kazı ve hafriyat işi için hazırlanacak olan ihale dosyası için ayrıntılı zemin etüdü yapacak zaman ve para yoktur. Bu nedenle genel bir zemin haritasından yararlanılarak zemin koşulları kabaca belirlenir ve buna uygun olarak inşaat süresi ve maliyeti hesaplanır.

Bu şekilde hazırlanan inşaat planının uygulanması sırasında büyük ölçüde sapmaların olacağı kesindir. Eğer güvenli tarafta kalmak için hesaplanan maliyet ve süre miktarları yüksek miktarda güvence payı kullanılarak arttırılırsa çok yüksek fiyat teklifi verilmesi nedeni ile işin alınamaması riski ortaya çıkabilecektir. Bunun yanı sıra eldeki zemin ve hava durumu verileri gerçek koşullara göre daha iyimser tahminler yapıp çok düşük fiyat ve iş bitirme süresi ile teklif hazırlanıp işin alınmasına sebep

olabilir. Bunun sonucunda iş bitirildiğinde önemli ölçüde zarar edilebilir.

Bu nedenle kullanılan verilerin deneyimli kişilerin görüşü alınarak veya geçmiş projelerdeki verilerden yararlanılarak hata aralığı belirlenip, bu hata aralığının inşaat süresine ve maliyetine olan etkisinin ölçülmesi gerekmektedir. İhale teklifi hazırlanmasında kullanılan verilerdeki belirsizliğin inşaat süresine ve maliyetine etkisi belirlenirse ihale dosyasında belirtilen teklif bedelinin ve inşaat süresinin içerdiği risk daha doğru bir şekilde belirlenebilecektir. Teklif bedelinin ve süresinin içermiş olduğu riskler göz önüne alınarak daha uygun güvence payı kullanılarak teklif bedelinde ve süresinde daha bilinçli tayin edilmiş artışlara gidilebilir.

Bu çalışmada verilerdeki belirsizliğin inşaat teklif bedeline ve inşaat süresine olan etkisi Monte Carlo hassasiyet analizi kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntemin dışında literatürde türevsel hassasiyet analizi ve Fourier Genlik Hassasiyet Testi (Fourier Amplitude Sensitivity Test) yöntemleri de vardır. Bu çalışmada Monte Carlo yöntemi diğer yöntemlere nazaran uygulama kolaylığı içerdiği için tercih edilmiştir.

Literatür Taraması

Teklif hazırlama aşamasında, inşaat aktivitelerindeki belirsizliklerinin teklif bedeli ve süresine olan etkilerini belirlemek için birçok çalışma yapılmıştır. Cheng (vd. 2005) çalışmasında, kaynakların optimum şekilde kullanılabilmesini sağlayabilmek için iş paketlerine kaynak kullanımında farklı öncelikler atanması ile elde edilen iş takvimlerinin bilgisayar ortamında benzetimini yapmıştır. Bu şekilde aktivitelerin kullandığı kaynakların önceliklerinin farklı kombinasyonlarda belirlenmesinin verimlilik ve proje maliyetine olan etkisinin planlama aşamasında belirlenmesine yönelik çalışmıştır. Ancak yazarlar çalışmalarında, verilerdeki belirsizliğin iş planına olan etkisini göz önüne almamışlardır.

Arizaga (2007) yapmış olduğu doktora çalışmasında; Monte Carlo analizini kullanarak iş paketlerindeki belirsizliğin süre ve maliyet hesabına olan etkilerini tahmin etmiş ve tezinde geliştirdiği teoriyi bir otoyol inşaatında test etmiştir. Projenin toplam süre ve maliyetinin belirsizlik hesabında kullanılan iş paketlerinin süre ve maliyetlerindeki belirsizliklerini, proje yöneticilerinin deneyimlerine dayanarak elde etmiştir. Bu yaklaşım doğru olmakla beraber, pratikte uygulanması oldukça zordur. İhale öncesindeki yoğunluk göz önüne alındığında her bir iş paketindeki belirsizliğin proje yöneticisi tarafından tahmin edilmesi oldukça güçtür. Çünkü hazırlanan her ihale dosyası kendine özgü belirsizlikler içereceği için birçok iş kalemindeki belirsizlik kendine özgü olacaktır. Arizaga (2007) önerdiği yöntemle proje planlamasına önemli bir yenilik getirmiştir.

Bu çalışmada ise proje verilerindeki belirsizlik aralığı kullanılarak planlamada kullanılan girdilerdeki belirsizliğin proje maliyeti üzerine etkisi tahmin edilmiştir. Girdi verilerine; hava durumu, zemin verilerinin belirsizliği, iş makinesinin operatörünün verimindeki belirsizlikler gibi birçok etken dahil edildiği için proje yöneticisinin daha az zamanını alacak bir analiz yöntemidir.

Lai (vd. 2008) analitik hiyerarşik işleme dayanan birden çok kriter inceleyebilen benzetim tabanlı bir maliyet hesap modeli geliştirdiler. Önerilen yöntem, proje planlamacıların yargılarını bütçe belirleme kriterlerine bağlı olarak dikkate almaktaydı. Bu yöntemde her maliyet kalemi bir değişken olarak ele alınmakta ve analiz sonucunda proje maliyetinin olasılık dağılım fonksiyonu elde edilmektedir. Önerilen yöntem belirsizliklerin anket yoluyla belirlenip bu belirsizlik aralığında rastgele sayılar üretilip proje maliyetindeki belirsizliklerin belirlenmesi temeline dayanmaktadır.

Ranasinghe (2000) çalışmasında analizde kullanılan parametrelerin kendi aralarındaki korelasyonun sonuca olan etkisini incelemiştir. Adams (2006), Chau (1995), Chou (vd. 2008) ve Yang (2005) Monte Carlo yöntemini kullanarak iş paketlerindeki maliyet belirsizliklerinin toplam proje maliyetine olan belirsizliğini incelemiştir.

Kartam ve Flood (2000) ekskavatör ve kamyon kullanılarak gerçekleştirilen kazı işlemini bilgisayar ortamında modellediler. Yazarların çalışmaları bir inşaat işine ait kazı ve hafriyat çalışmasını baştan sona bilgisayar ortamında benzetiminin yapılmasını içeriyordu. Yazarlar çalışmalarında kullanılan verilerdeki belirsizlikleri ihmal edip sadece verilerin en olası değerlerini kullanarak bütün iş prosedürünün benzetimini yapmışlardır. Benzer şekilde Shi ve Abourizk (1998) boru hattı inşaatının benzetimini yapmışlardır. Tsemg (vd. 2000) birden fazla kamyon ve silindirin yer aldığı sıkıştırma işlemini bilgisayar ortamında benzetimini yapmışlardır. Kamyon ve silindirlerin hangi yolu izleyecekleri ve ne zaman nerede olacakları yapılan inşaat benzetiminde hesaplanmıştır. Shi (vd. 1998) ev inşaatının aşamalarının benzetimini

yapmıştır. Malzemelerin vinç ile inşa edilen kata taşınmaları ve işçilerin iş paketlerini inşa etmeleri bilgisayar ortamında hesaplanmış ve işçilerin ve iş makinelerinin ne zaman hangi işi yapacakları belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar inşaat aktivitelerinin bilgisayar ortamında benzetiminin yapılması açısından önem taşımaktadır.

Literatür taramasından anlaşılabileceği üzere yapılan analizler aktivite sürelerine veya maliyetlerine belirsizlik atayıp bu belirsizliğin proje süresine veya maliyetine olan etkisi incelenmiştir. Mo (vd. 2008) bu şekilde yapılan proje süresindeki riskleri belirlemeye yönelik yöntemleri detaylı bir şekilde incelemiştir.

Bu çalışmada ise kazı ve hafriyat inşaatındaki süre ve toplam iş makinesi kullanım saat belirsizliği iş paketlerinden yararlanılarak değil direk olarak hava durumu, zemin durumu, operatörün verimliliği ve kamyonların boşaltma-manevra sürelerindeki belirsizlikler göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Bu yönüyle yapılan çalışma literatürdeki çalışmalardan farklılık göstermektedir.

Yöntem

Proje planlamasında iş makinelerinin verimleri fabrika verilerine ve proje yöneticilerinin deneyimlere dayanarak hazırlanmış tablolardan yararlanılarak tahmin edilir. Nunnally (2001) ve Caterpillar (1979) iş makinelerinin saatlik kapasitelerinin tahmini için tutarlılığı yüksek değerler vermektedir. Bu yöntemle elde edilen saatlik kapasite belirli bir aralığın içinde olmaktadır, çünkü iş makinesinin saatlik kapasitesi operatörün deneyimine, zemin durumuna ve hava koşullarına göre değişebilmektedir. Bu etkiler her zaman aynı olamayacağı için bu parametrelerin değişkenliği göz önüne alınmalıdır. Bununla beraber proje planlamasındaki genel yaklaşım hesap kolaylığı sağlamak için bu değişkenlere ortalama bir değer atamak ve analiz boyunca sabit tutmaktır.

İnşaat süresince hem çevre koşullarının hem de operatörlerin veriminin aynı kalması beklenemez. Özellikle uzun zamana yayılmış olan inşaatlarda iklim değişiklikleri nedeniyle iş veriminde önemli dalgalanmalar gözlenmektedir. Bu nedenle yapılan kabullenmelerin belirli bir hata payı içinde olacağı bilinmektedir. Kabullenmelerdeki hatalar hesaplanan günlük üretim tahminine mutlaka yansiyacaktır. Bu çalışmada hesaplanan günlük üretim tahminlerinin yapılan kabullenmelere göre nasıl değişim göstereceği Monte Carlo yöntemi ile tahmin edilmiştir.

Bu çalışma tüm kazı ve hafriyat makinelerini kapsamamaktadır, sadece ekskavatör ve damperli kamyonlar üzerine yapılmıştır. Ülkemizde gerçekleştirilen birçok kazı ve hafriyat işinde yaygın olarak ekskavatör ve damperli kamyon kullanıldığı ve çalışmayı hacim olarak sınırlı tutabilmek için bu şekilde bir kısıtlamaya gidilmiştir.

Kazı işleminde en önemli iş makinesi ekskavatördür, bu nedenle ilk önce onun saatlik kapasitesi hesaplanır. Bu ise şu formülden elde edilir Nunnally (2001):

$$Kapasite = C * S * V * B * E \quad (1)$$

Bu formüle C bir saatte ekskavatör kepçesinin yaptığı devir, S ekskavatör kepçesinin indiği derinlik ve dönüş açısıyla elde edilen düzeltme katsayısı, V ekskavatör kovanının tepeleme doldurulduğunda taşıyabileceği zeminin hacmi, B zemin cinsine göre kovanın doldurulabilirliği ile ilgili düzeltme katsayısı ve E iş verimidir.

Ekskavatör kovasının hacmi dışındaki değerlerin tamamı tablolardan elde edilir. Yararlanılan çizelgeler ise şunlardır Nunnally (2001):

Çizelge 1 Ekskavatörün bir saatte yaptığı çevrim

Zemin Tipi	Ekskavatör Boyutu		
	Küçük < 0,76m ³	Orta >0,76, <1,72	Büyük > 1,72 m ³
Yumuşak (Kum, çakıl)	250	200	150
Orta (Genel zemin, Yumuşak kil)	200	160	120
Sert (Sert kil, kaya)	160	130	100

Ekskavatörün kova kapasitesi ve kazı yapılan zemin cinsine göre ekskavatörün bir saatte kaç çevrim yapabileceği, C, Çizelge 1 den bulunur. Bulunan sayı tam olarak iş makinesinin yapacağı çevrim değildir çünkü kazı sırasında ekskavatörün yapması gereken dönüş açısı ve kazı derinliği ekskavatörün saatlik çevrimini etkileyecektir. Bu etkenleri dikkate alarak bulunan S düzeltme katsayısı Çizelge 2 den elde edilebilir.

Çizelge 2 Dönüş açısı ve kazı derinliği yüzdesi düzeltme katsayıları

Kazı Der. Mak %	Dönüş Açısı (derece)					
	45	60	75	90	120	180
30	1,33	1,26	1,21	1,15	1,08	0,95
50	1,28	1,21	1,16	1,10	1,03	0,91
70	1,16	1,10	1,05	1,00	0,94	0,83
90	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,75

Eşitlik 1 de V ekskavatör kovasının hacmini belirtmektedir. Ekskavatörün kovası her zeminde aynı oranda doldurulamamaktadır. Zemin tipine göre ekskavatör kovasının dolum oranı değişmektedir. Bu oran eşitlik 1 de B ile gösterilmektedir. Ekskavatör kovasının doldurulabilme oranı kovanın hacminden bağımsızdır ve sadece zemin tipine göre değişmektedir. Bu değer Çizelge 3'ten (Nunnally 2001) elde edilebilir.

Çizelge 3 Ekskavatör kova dolum katsayıları

Malzeme	Kova Dolum Katsayısı
Genel zemin, toprak	0,80 - 1,10
Kum ve çakıl	0,90 - 1,00
Sert Kil	0,65 - 0,95
Islak Kil	0,50 - 0,90
Kaya, iyi parçalanmış	0,70 - 0,90
Kaya, kötü parçalanmış	0,40 - 0,70

Eşitlik 1 de yer alan son katsayı E iş verimidir. Bu katsayı hem çalışma koşullarına hem de yöneticilerin becerilerine bağlıdır. Çalışma koşulları hava şartları, günlük çalışma saatleri, gürültü, toz gibi çevre şartlarını içermekte olup yönetim ise iş planlarının doğru ve ayrıntılı

hazırlanması, hiyerarşik düzenin iyi çalışması ve veri akışı gibi etkenleri içermektedir. Çalışma koşulları ve yönetime bağlı olarak iş verimi Çizelge 4 ten Nunnally (2001) elde edilebilir.

Çizelge 4 İş verimi katsayıları

Çalışma Koşulları	Yönetim Koşulları			
	Mükemmel	İyi	Orta	Kötü
Mükemmel	0,84	0,81	0,76	0,70
İyi	0,78	0,75	0,71	0,65
Orta	0,72	0,69	0,65	0,60
Kötü	0,63	0,61	0,57	0,52

Bütün katsayıların çarpılması ile ekskavatörün bir saatte kaç metreküp şişmiş zemin kazabileceği hesaplanmış olur. Elde edilen hacmi yerde doğal zeminle karşılaştırmak için zeminin şişme katsayısını 1 den çıkararak çarpmak gerekir. Zemin cinsine göre şişme katsayıları Çizelge 5 te verilmiştir.

Çizelge 5 Zemin şişme değerleri

Zemin Tipi	Şişme (%)
Kil	30
Genel Zemin	25
Kaya (kırılmış)	50
Kum ve Çakıl	12

Ekskavatörün saatlik kapasitesi hesaplandıktan sonra ekskavatör hiç boş kalmayacak şekilde çalışabilmesi için gereken kamyon sayısını hesaplamak gereklidir. Gereken kamyon sayısı eşitlik 2 den hesaplanır Nunnally (2001). Bu eşitlik her zaman ekskavatörün doldurabileceği boş bir kamyonun olması prensibine dayanır. Eşitlikten elde edilen sayının küsuratı her zaman yukarı yuvarlanır.

$$Kamyon Sayı = \frac{Kamyonun Tur Süresi}{Yükleme Zamanı} \quad (2)$$

Kamyonun tur süresi dolu gidiş, boş dönüş süreleri ile bekleme, boşaltma ve manevra zamanları ile yükleme zamanının toplamıdır. Yükleme zamanı ekskavatörün %100 verimle çalıştığı düşünülerek hesaplanan saatlik şişmiş zemin kazı kapasitesi ile ne kadar sürede kamyonu doldurabileceğidir. Kamyonun bekleme, boşaltma ve manevra süreleri Çizelge 6'da (Nunnally, 2001) verilmiştir.

Kamyonun dolu gidiş ve boş dönüş süreleri zemin, arazi yapısı ve kamyonun motor gücüne bağlı olarak hesaplanır. Bu hesaplamalarda yaklaşık değerler kullanılarak hesap yapılır.

Çizelge 6 Kamyon ortalama bekleme boşaltma ve manevra süreleri (dk.)

Koşullar	Arkadan Damperli	Yandan Damperli
İyi	1,1	0,5
Orta	1,6	1,1
Kötü	2	2,5

Elde edilen değerler ekskavatörün saatlik kapasitesi ve bu kapasiteyi sağlayabilmek için kaç adet kamyonun gerekeceğidir. Elde edilen değerlerin

belirsizliğin hangi aralıkta olduğu ise Monte Carlo analizi ile tahmin edilecektir.

Monte Carlo analizi belirli bir olasılık dağılımına göre rastgele seçilmiş model girdi parametre değerleri ile çıktı değerlerini hesaplayıp bu işlemin birçok kez tekrarlanması ile çıktı değerlerindeki belirsizliğin ve girdi değerlerinin bu belirsizliğe olan etkisinin tahmin edilmesi prensibine dayanır. Monte Carlo analizi beş adımdan oluşmaktadır (Helton, 1993).

İlk aşamada bütün girdi parametrelerinin hangi aralıkta olacağı ve bu aralıkta nasıl dağılacığı belirlenir. Bu işlem genellikle bir uzman tarafından yapılır. Bu çalışmada ise iş makinesi tablolarından elde edilen değerler kullanılmıştır. Tablolardan elde edilen belirsizlik aralığının normal dağılım gösterdiği kabul edilmiştir.

İkinci aşamada ise belirtilen aralıklar içinden girdi parametrelerine rastgele belirlenen değerler atanır. Girdi parametrelerinin değerlerinin bulunabilmesi için çeşitli örnekleme yöntemleri mevcuttur. Bu çalışmada rastgele örnekleme yöntemi seçilmiştir. Bu yöntem girdi parametrelerinin belirsizliği arasında hiçbir korelasyonun olmadığı kabul edilmiştir.

Üçüncü aşamada rastgele sayılarla elde edilen girdi parametreleri denklemlerde yerine konur ve bağımlı değişkenin değeri hesaplanır. İkinci ve üçüncü aşama birçok defa tekrarlanır. Bu çalışmada 1000 kere tekrar yapılmıştır.

Elde edilen değerler dördüncü aşamada belirsizlik analizi için kullanılır. Belirsizliğin gösteriminin bir yolu standart sapmasının hesaplanması ile yapılabilir. İnşaat süresi ve gereken iş makinelerinin sayısı y olarak gösterildiğinde y değerlerinin ortalaması ve standart sapmalarının hesaplanış yöntemi eşitlik 3 ve 4'te belirtilmiştir

$$E(y) = \sum_{i=1}^m \frac{y_i}{m} \quad (3)$$

$$V(y) = \frac{\sum_{i=1}^m [y_i - E(y)]^2}{m - 1} \quad (4)$$

Beşinci adım ise girdi parametrelerindeki belirsizliğin bağımlı değişkenler üzerindeki etkisinin hesaplanmasıdır. Bu işlem için genel olarak regresyon analizi kullanılır. Değerler olduğu gibi alınabildiği gibi 0 ve 1 arasında normalleştirildikten sonra regresyon analizi yapılabilir. İkinci yöntemde girdi parametrelerinin arasındaki boyut farkı ortadan kaldırılmış olur. İlk yöntemde hem belirsizliğin büyüklüğü hem de girdi parametresindeki birim değişimin çıktı parametresi üzerindeki etkisi dikkate alınmış olur.

Girdi parametrelerinin sayısı fazla ise, regresyon analizinde bu parametreler kendi aralarında korelasyonlu olabilir ve regresyon analizinin iyi sonuç verememesine neden olabilirler. Bu durumda ise girdi parametrelerinin değerleri değil, sıraları regresyon analizine sokulur ve regresyon analizinin katsayısı en büyük olan parametre en hassas parametre olmuş olur.

Bu çalışmada girdi parametrelerinin bağımlı değişkenler üzerindeki etkisi incelenmemiştir. Bu nedenle Monte Carlo analizinin sadece ilk dört basamağı yürütülmüştür.

Örnek Çalışma

Önerilen yöntemin denenmesi için bir örnek çalışmaya ihtiyaç duyulmuştur. Bunun için 50.000m³ kazı hacmi içeren yol inşaatının küçük bir bölümü denenmiştir.

Mevcut veriler arasında hava tahmin raporları, zemin koşulları, yol durumu ve iş makineleri ile ilgili bilgiler bulunmaktadır.

Meteorolojiden alınan hipotetik hava tahmin raporu Çizelge 8 de verilmiştir. Rapor 49 günlük yağış tahmin oranlarını içermektedir. Tabloda bulunan yağışsız kolonu o gün hiç yağış yağmama olasılığını, az yağışlı kolonu o gün için hafif şiddette yağış yağma olasılığını, orta şiddetli yağış kolonu o gün içinde orta şiddetli yağış yağma olasılığını, şiddetli yağış kolonu ise o gün içinde şiddetli yağış görülmeye olasılığını belirtmektedir.

Kazı çalışmaları 1,5 m³ kova kapasitesine sahip bir ekskavatör ile yapılması planlanmıştır. Bu ekskavatör için gereken kamyon sayısı değişken olup her hangi bir üst sınırlama yoktur. Ekskavatörün kazıp kamyonlara boşaltma yapması için gerekli dönüşün ortalama 90° olacağı öngörülmüş ve maksimum kazı derinliğinin ekskavatörün inebileceği derinliğin %70'i olacağı hesaplanmıştır.

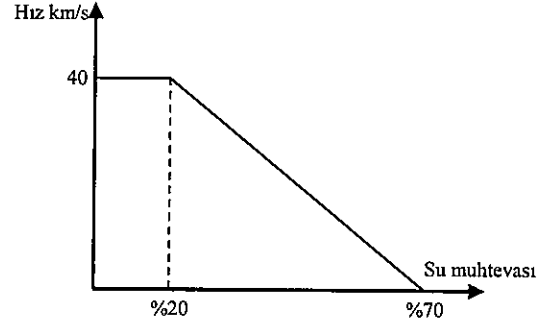
Çizelge 7 İş Makinelerinin fiziksel özellikleri

Katsayılar	Değerler
Kova kapasitesi	1,5
Dönüş Açısı	90°
Maks. Kazı Derinliği	0,7
Saatlik Döngü sayısı	160
Açı ve Kazı Der Düz	1
Zemin Tipi	Genel Toprak
Doluluk Faktörü	Nem Oranına Bağlı >0.8 ve <1,1
Şişme	0,75
Verim	İyi Yönetici ve hava durumu bağlı ve rastgele %1 belirsizlik
Hafriyat Mesafesi(m)	8000
Kamyon Kap (m ³)	12
Toplam Kazı (m ³)	50000
Kamyon Bekleme süresi	Hava koşulları ve 0,1 dak rastgele bekleme süresi

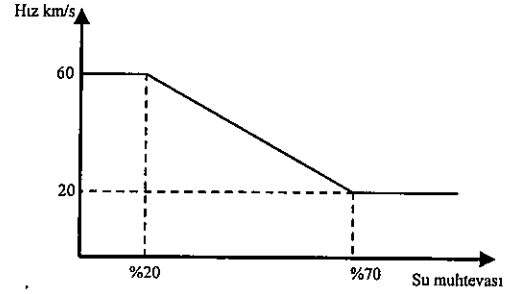
Hafriyat için kullanılacak yolların dolu ve boş kamyonların ortalama hızları için şekil 1 ve şekil 2 de gösterilen zeminin su muhtevası ve ortalama hız bağıntısından yararlanılabilir. Bu grafikler kamyonların çekiş gücü, tekerlek direnci ve tekerleğin yola gömülme derinliği dikkate alınarak oluşturulmuştur. Yol zemininin nem oranı arttığında yolun taşıma kapasitesi düşecek ve bu nedenle tekerlekler yola daha fazla gömülecektir. Gömülme arttığında ise yolun tekerleğe uyguladığı direnç artacağı için kamyonların çekiş gücünün daha fazla kısmı yol direncini yenmek için harcanmış olacaktır. Bu nedenle toprağın nem oranının artması kamyonların ortalama hızlarında düşüşe neden olacaktır. Kamyonun yola uygulayabileceği en yüksek kuvvet hem kamyon motorunun gücüne, hem de yol ile kamyon tekerleği arasındaki sürtünme katsayısına bağlıdır. Yolun nem oranı arttıkça kamyon tekerleği ile yol arasındaki sürtünme katsayısı düşecektir. Belirli bir nem oranından sonra kamyon tekerleğinin yola uygulayabileceği kuvvet hareket için gerekli kuvvetin altında kalacağı için kamyon hareket edemeyecek ve patinaj yapacaktır. Bu eşik nem oranı %70 olarak ölçülmüştür.

Çizelge 8 Meteorolojik rapor

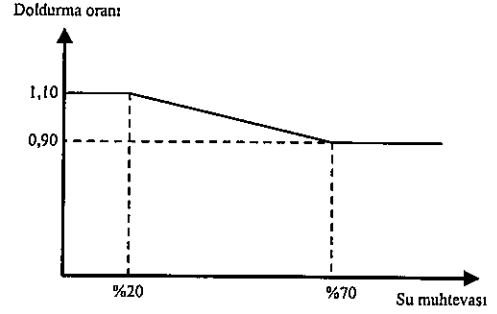
Veri No	Tarih 2009	Yağış sız	Az Yağış	Orta Şiddetli Yağış	Şiddetli Yağış
1	01.05	0,40	0,25	0,21	0,14
2	02.05	0,45	0,30	0,21	0,04
3	03.05	0,40	0,27	0,19	0,14
4	04.05	0,37	0,29	0,19	0,15
5	05.05	0,43	0,28	0,20	0,09
6	06.05	0,40	0,31	0,21	0,08
7	07.05	0,42	0,29	0,22	0,07
8	08.05	0,40	0,32	0,21	0,07
9	09.05	0,39	0,33	0,23	0,05
10	10.05	0,44	0,31	0,22	0,03
11	11.05	0,42	0,29	0,19	0,10
12	12.05	0,40	0,32	0,19	0,09
13	13.05	0,37	0,31	0,20	0,12
14	14.05	0,35	0,30	0,21	0,14
15	15.05	0,36	0,29	0,20	0,15
16	16.05	0,39	0,31	0,21	0,09
17	17.05	0,35	0,32	0,22	0,11
18	18.05	0,37	0,33	0,21	0,09
19	19.05	0,36	0,30	0,22	0,12
20	20.05	0,37	0,29	0,21	0,13
21	21.05	0,36	0,27	0,19	0,18
22	22.05	0,40	0,29	0,20	0,11
23	23.05	0,43	0,31	0,19	0,07
24	24.05	0,45	0,30	0,22	0,03
25	25.05	0,47	0,29	0,22	0,02
26	26.05	0,43	0,31	0,23	0,03
27	27.05	0,48	0,32	0,19	0,01
28	28.05	0,41	0,31	0,19	0,09
29	29.05	0,43	0,33	0,19	0,05
30	30.05	0,42	0,29	0,18	0,11
31	31.05	0,46	0,31	0,22	0,01
32	01.06	0,47	0,30	0,19	0,04
33	02.06	0,43	0,29	0,21	0,07
34	03.06	0,41	0,27	0,22	0,10
35	04.06	0,45	0,24	0,19	0,12
36	05.06	0,43	0,26	0,18	0,13
37	06.06	0,42	0,23	0,21	0,14
38	07.06	0,43	0,24	0,20	0,13
39	08.06	0,44	0,27	0,22	0,07
40	09.06	0,46	0,25	0,19	0,10
41	10.06	0,42	0,28	0,21	0,09
42	11.06	0,46	0,26	0,22	0,06
43	12.06	0,43	0,29	0,23	0,05
44	13.06	0,45	0,27	0,19	0,09
45	14.06	0,47	0,29	0,21	0,03
46	15.06	0,46	0,30	0,22	0,02
47	16.06	0,49	0,27	0,23	0,01
48	17.06	0,47	0,31	0,21	0,01
49	18.06	0,49	0,29	0,22	0,00



Şekil 1 Nem oranı ve dolu kamyonun ortalama hızı arasındaki ilişki



Şekil 2 Nem oranı ve boş kamyonun ortalama hızı arasındaki ilişki



Şekil 3 su muhtevası ile kova doluluk oranı arasındaki ilişki

Nem oranı ise yağın yağmur ve gün içinde topraktaki nemin buharlaşması ile orantılı olarak değişmektedir. Çizelge 9 da hava durumunun topraktaki nem oranını ne kadar artırdığı gösterilmiştir. Buna göre şiddetli yağış topraktaki nemi %25, orta şiddetli yağış %15 hafif şiddetli yağış ise %10 arttıracaktır. Belirtilen yüzdeler topraktaki su muhtevastaki artış olup artış oranı değildir. Bununla beraber drenaj ve buharlaşmanın etkisi ile topraktaki su muhtevasının %25'inin her gün kaybolduğu varsayılmaktadır.

Toprağın ilk günlük nem oranı %25 olarak ölçülmüştür. Toprağın su muhtevası %50'yi geçtiği zaman özellikle kamyonların dolu gidiş zamanları çok uzayacağı için iş verimi çok düşeceğinden ötürü o gün kazı ve hafriyat yapılmayacaktır.

Çizelge 9 Hava durumu ve toprağın nem değişimi bağıntısı

Hava Durumu	Su Muh Artışı
Yağışsız	0
Hafif Şiddetli Yağışlı	0,1
Orta Şiddetli Yağış	0,15
Şiddetli Yağış	0,25

Şantiyede yönetimin inşaat süresi boyunca iyi olduğu varsayılmıştır. Yağışsız günlerde çevre koşulları mükemmel, hafif şiddetli yağışta iyi, orta şiddetli yağışta orta ve şiddetli yağışta kötü olarak belirlenmiştir. Bu veriler doğrultusunda yağış durumuna göre iş verimi belirlenmektedir. Elde edilen iş verimi katsayısına $\pm 0,01$ aralığında rastgele üretilmiş sayı eklenmiştir. Bu rastgele sayı modellenmeyen diğer çevre koşullarının iş verimine etkisi olarak kabul edilmiştir.

Elde edilen katsayılar eşitlik 1'de yerine konularak ekskavatörün 1 saatte yapabileceği kazı miktarı bulunur. Günlük 10 saat çalışıldığı varsayılarak elde edilen saatlik kapasite 10 ile çarpılarak ekskavatörün günlük kazı kapasitesi elde edilir.

Kamyonların ortalama dolu ve boş hızları Şekil 1 ve 2 de verilen grafiklerden hesaplanır. Bekleme, manevra ve boşaltma zamanları ise hava koşullarına bağlı olarak Çizelge 6 dan elde edilir. Bu süreye ayrıca ekskavatörün doldurma süresi eklenir ve bu süreler içindeki belirsizliği ilave edebilmek için $\pm 0,1$ dakika ayrıca belirsizlik olarak kamyon tur zamanına rastgele sayı üretilerek eklenir. Kamyonların ortalama tur zamanı ve ekskavatörün bir kamyonu doldurma süresi kullanılarak gereken en az kamyon sayısı hesaplanır. Bu denklem eşitlik 2 de gösterilmiştir. Çizelge 10 da gerçekleşen hava koşulları doğrultusunda kazı süresini ve gereken kamyon sayısını bulmaya yönelik örnek hesaplama gösterilmiştir. Bu hesap girdi parametrelerinin belirsizlik aralığı ve olasılık dağılımı dikkate alınarak üretilen rastgele sayılarla 1000 kere tekrarlanarak kazı süresindeki ve iş makinesi gereksinimindeki belirsizlik tahmin edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen belirsizlik verileri çizelge 11 de verilmiştir.

Çizelge 11 incelendiğinde kazı işinin en olası 39 günde bitirilebileceği öngörülebilmektedir. Bununla birlikte benzetimlerde kazının tamamlanmasının 49 güne kadar uzama olasılığının olduğu analiz sonucunda ortaya çıkmış bulunmaktadır. Analiz sonucunda elde edilen ortalama bitiş süresi ile teklif hazırlanırsa işin planlanandan 10 güne kadar daha geç bitirilebilme riski ortaya çıkmaktadır. Bununla beraber en iyi şartlar gerçekleştiğinde ise kazı işinin planlanandan 6 güne kadar daha erken bitirilebilme olasılığı da bulunmaktadır.

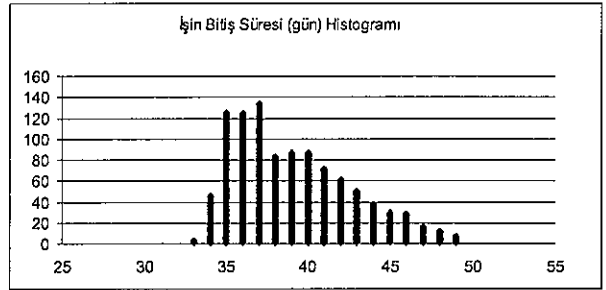
Çizelge 10 Analiz sonucunda elde edilen belirsizlik değerleri

	Bitiş Süresi (gün)	Toplam Eks-saat	Toplam Kamyon-Saat	Hava muhalefeti Sayısı
Ortalama	39,01	353,96	3497,43	3,12
St. Sap	3,56	9,09	207,68	3,07
σ/E	0,091	0,026	0,059	0,986
Max	49	379,15	4112,96	13
Min	33	328,44	2997,46	0

Elde edilen ekskavatör-saat değerleri incelendiğinde bu parametrenin standart sapmasının ortalama değere oranının diğer parametrelere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Buna karşılık hava muhalefeti nedeniyle kazı yapılamayan günler ile kazı bitiş süresi değerlerinin standart sapmalarının diğer parametrelere oranla daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Bu sebeple ihale öncesinde kazı işinin bitiş süresini doğru tahmin edebilmenin en güç kısım olduğu öngörülebilmektedir. Kazı süresindeki belirsizliği en çok etkileyen parametrenin hava muhalefetinden dolayı oluşan belirsizliğin olduğu açıktır. Bu çıkarıma varılmasındaki en güçlü etken ise ekskavatör-saat belirsizliğinin süre belirsizliğine kıyasla oldukça düşük kalmasıdır. Hava muhalefetinden ötürü kazı yapılamaması kazı süresini etkilemekte ancak toplam ekskavatör-saat değerini etkilememektedir.

Kamyon-saat belirsizliğinin ekskavatör-saat belirsizliğinden fazla olmasının sebebi ise kamyonların dolu gidiş ve boş dönüş ortalama hızlarından kaynaklanan ilave belirsizlikle açıklanabilir.

Standart sapma ve ortalama değer incelemek genel sonuçlar verebilir ancak her zaman yeterli olmayabilir. Bunun yanı sıra 1000 deneme ile elde edilen analiz sonuçlarını sadece iki rakama indirmek önemli ölçüde veri kaybına neden olacaktır. Bu nedenle incelenen değerlerin histogramları oluşturulmuş ve bunlar üzerinden belirsizliğin boyutu tahmin edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3 Bitiş süresi Histogramı (gün)

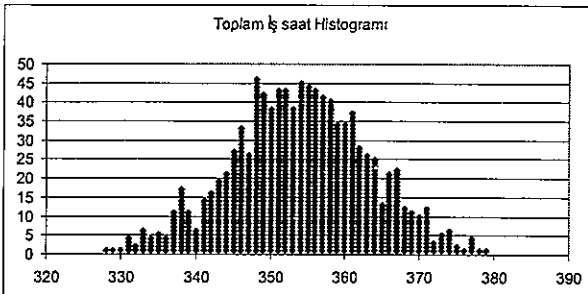
Şekil 4'te verilen işin bitiş süresi histogramı incelendiğinde 35 ve 40 gün arasında önemli bir yığılma olduğu görülmektedir. Bununla beraber kazı işinin 35 günden önce bitirilmesinin hemen hemen olanaksız olduğu görülmektedir. Bununla birlikte 45 günden daha sonraya sarkması da pek ihtimal dahilinde olmadığı anlaşılmaktadır. Kazı süresi histogramı süre tahminindeki belirsizliği gösterme adına önemli ipuçları vermektedir.

Şekil 5'te gösterilen toplam iş-saat histogramı kazı işleminin bitirilebilmesi için şantiyede toplam kaç saat çalışması gerektiğini göstermektedir. Bu aynı zamanda ekskavatörün de iş-saatine eşit olmaktadır. Toplam iş-saat histogramı normal dağılıma yakın bir görünüm sergilemektedir, bununla beraber Şekil 4'te gösterilen kazı sürelerinin dağılımı normal dağılımdan çok uzaktadır. Her gün 10 saat çalışıldığı prensibiyle hazırlanan iş-saat histogramının kazı süresinden farklı dağılımda olmasının sebebi hava muhalefeti nedeni ile çalışılmayan günlerin etkisinin toplam iş-saatini etkilemiyor olmasıdır. Figür 5 incelendiğinde büyük olasılıkla 345 ile 365 ekskavatör-saat aralığında kazı işinin bitirilebileceği öngörülebilmektedir.

Çizelge 11 Örnek kazı ve hafriyat hesap tablosu

Tarih	Hava Durumu	Yağan Yağış	Nem Durumu	Toplam Kazı	Günlük Kazı	Kamyon Tur Zamanı (h)	Min Kamyon Sayısı	Eks-saat	Kmyn -Saat
01.05.2009	0,29	0,0	0,19	1587,614	1587,614	0,48	9	10	90
02.05.2009	0,16	0,0	0,14	3193,042	1605,428	0,48	9	10	90
03.05.2009	0,96	0,3	0,36	4302,363	1109,322	0,73	9	10	90
04.05.2009	0,35	0,0	0,27	5849,791	1547,428	0,52	10	10	100
05.05.2009	0,02	0,0	0,20	7440,653	1590,861	0,48	9	10	90
06.05.2009	0,18	0,0	0,15	9033,551	1592,898	0,48	9	10	90
07.05.2009	0,30	0,0	0,11	10646,14	1612,589	0,47	9	10	90
08.05.2009	0,14	0,0	0,08	12256,50	1610,362	0,48	9	10	90
09.05.2009	0,26	0,0	0,06	13866,39	1609,892	0,48	9	10	90
10.05.2009	0,06	0,0	0,05	15470,81	1604,419	0,48	9	10	90
11.05.2009	0,86	0,2	0,19	16853,00	1382,190	0,53	9	10	90
12.05.2009	0,68	0,1	0,24	18290,91	1437,910	0,53	9	10	90
13.05.2009	0,63	0,1	0,28	19714,52	1423,608	0,56	9	10	90
14.05.2009	0,94	0,3	0,46	20751,54	1037,020	0,91	11	10	110
15.05.2009	0,41	0,1	0,44	22042,58	1291,043	0,78	12	10	120
16.05.2009	0,50	0,1	0,43	23325,72	1283,141	0,76	11	10	110
17.05.2009	0,53	0,1	0,43	24621,15	1295,423	0,75	11	10	110
18.05.2009	0,70	0,1	0,42	25946,08	1324,931	0,73	11	10	110
19.05.2009	0,46	0,1	0,41	27252,03	1305,956	0,73	11	10	110
20.05.2009	1,00	0,3	0,56	27252,03	0,000	0,00	0	0	0
21.05.2009	0,25	0,0	0,42	28666,69	1414,659	0,71	12	10	120
22.05.2009	0,91	0,3	0,57	28666,69	0,000	0,00	0	0	0
23.05.2009	0,06	0,0	0,42	30072,08	1405,384	0,71	12	10	120
24.05.2009	0,23	0,0	0,32	31589,36	1517,283	0,57	10	10	100
25.05.2009	1,00	0,3	0,49	32610,43	1021,066	0,98	12	10	120
26.05.2009	0,12	0,0	0,37	34053,00	1442,573	0,63	11	10	110
27.05.2009	0,15	0,0	0,27	35603,59	1550,596	0,53	10	10	100
28.05.2009	0,53	0,1	0,31	37005,91	1402,316	0,59	10	10	100
29.05.2009	0,96	0,3	0,48	38042,88	1036,975	0,95	11	10	110
30.05.2009	0,50	0,1	0,46	39332,78	1289,895	0,81	12	10	120
31.05.2009	0,23	0,0	0,34	40804,49	1471,707	0,60	10	10	100
01.06.2009	0,02	0,0	0,26	42337,90	1533,410	0,52	9	10	90
02.06.2009	0,07	0,0	0,19	43945,58	1607,687	0,48	9	10	90
03.06.2009	0,63	0,1	0,25	45382,31	1436,724	0,54	9	10	90
04.06.2009	0,49	0,1	0,28	46793,89	1411,583	0,57	9	10	90
05.06.2009	0,12	0,0	0,21	48379,28	1585,394	0,49	9	10	90
06.06.2009	0,96	0,3	0,41	49461,94	1082,655	0,81	10	10	100
07.06.2009	0,18	0,0	0,31	50000,00	538,0616	0,56	10	3,55	35,49

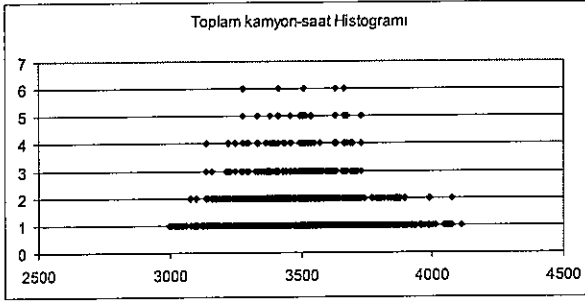
Şekil 4 Toplam iş-saat histogramı



Şekil 6'da kamyon-saat histogramı gösterilmektedir. Kamyon-saat değerlerindeki belirsizliğin oldukça büyük olduğu histogramın epey uzun bir aralıkta yatay olarak dağılmasından anlaşılmaktadır. Yaklaşık 3100 ile 3800 aralığındaki kamyon-saat kullanımı frekanslarının bir birine çok yakın olduğu rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. Bu nedenle planlama safhasında kamyon-saat değerlerinin hassas bir şekilde tutturulabilmesi oldukça güç görünmektedir. Teklif bedelini

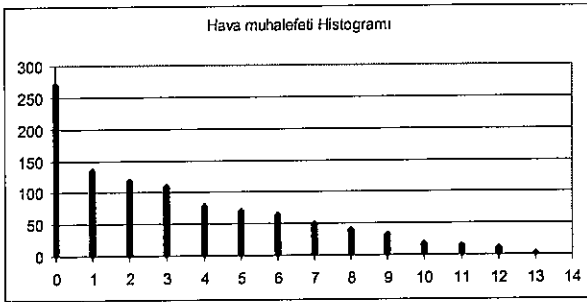
aşağıda tutmak için 3100 kamyon-saat'e yakın değerlerle ihale dosyası hazırlamak ekskavatörün kamyon olmadığı için boş kalmasına neden olabilmekte ve kazı süresini uzatabilmektedir. Bunun yanı sıra emniyetli tarafta kalmak için 3800 kamyon saate yakın değerlerle ihale dosyası hazırlamak ise çok fazla kamyonun boşta kalmasına yol açabilecektir.

Oluşan yüksek derecedeki belirsizliğin, kamyonların gidiş-dönüş yollarının zemin durumundaki belirsizliğin fazla olması ile açıklanabilir. Bu nedenle zemin koşullarındaki belirsizliğin giderilmesi doğruluğu daha yüksek ihale dosyası hazırlanabilmesini mümkün kılacaktır.



Şekil 5 Kamyon-saat histogramı

Şekil 7 de yer alan hava muhalefeti nedeni ile kazı çalışmalarının durdurulduğu günler incelendiğinde 269 analizde hiç hava muhalefeti nedeni ile iş duraksamasının olmadığı gözlenmiştir. Sonuç olarak neredeyse her dört kazı çalışmasından üçünde mutlaka hava muhalefeti nedeni ile iş uzaması beklenmektedir. Hava muhalefeti nedeni ile iş duraksamasının olasılığı istisnasız bir şekilde duraksama günü arttıkça azalmaktadır. Histogramın bu şekilde bir eğilim göstermesinin sebebi işin süresinin kısa olmasından kaynaklanmaktadır. Kazı süresi 35 – 45 gün yerine 350 – 450 gün arasında olsaydı histogramda önce küçük bir artış sonrasında sabit azalan bir seri beklenebilirdi.



Şekil 6 Hava muhalefeti histogramı

Sonuç

Bu çalışmada bir yol inşaatının küçük bir kısmına ait kazı çalışmasının süre ve iş makinesi ihtiyacını önceden belirlemeye yönelik proje planlamasındaki belirsizlikler ve bu belirsizliklerin sonuca olan etkileri incelenmiştir. Bu çalışma, kazı süresince gerçekleşebilecek ve iş verimini etkileyebilecek olayların bilgisayar ortamında benzetimi yapılarak kazı süresindeki belirsizliğin tahmin edilmesine çalışıldığı için literatürdeki mevcut çalışmalardan ayrılmaktadır. Bu sayede ekskavatörün kazı veriminin veya hafriyat yollarının

durumunun bütün proje boyunca aynı olduğu kabullenilmeden belirsizlik analizi yapılabilmektedir.

Analiz sonucunda ortaya çıkan inşaat süresi ve makine-saat histogramları belirsizliğin dağılımı ve aralığı hakkında önemli bilgiler sunmakta ve proje planlamacılarına güvence katsayısı belirlemelerinde önemli ipuçları vermektedir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde kazı süresinin doğru şekilde tahmin edilmesinin en zor kalem olduğu ortaya çıkmıştır. Bununla beraber, ekskavatör-saat değerinin en az sapma gösteren kalem olduğu analiz sonucunda elde edilen başka bir çıkarımdır.

Bu çalışmada belirli bir girdi parametresindeki belirsizliğin bağımlı değişken üzerinde yarattığı belirsizlik tahmin edilmemiştir. Bunun sebebi ise çok fazla girdi parametresinin bulunması ve hepsinin regresyon analizine dahil edilmesi ile ciddi anlamda korelasyonların ortaya çıkacağı ve hasta koşullu denklemlerin çözülmesi ile karşı karşıya kalınacak olmasıdır. Bunun yanı sıra daha hassas planlama yapabilmek için daha detaylı arazi ve zemin etütlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ise çok büyük olmayan kazı işlerinin ihalesi için gerekli değildir. Baraj veya tünel gibi çok daha yüksek hacimli ve geniş alana yayılmış kazı işlerinde belli başlı zeminle ilgili girdi parametrelerinin bağımlı değişkenler üzerinde önemli etkileri olacaktır ve bu etki regresyon analizi ile tutarlı bir biçimde ölçülebilecektir. Elde edilen etki değerine göre zemin ve arazi etütlerinin artırılıp artırılmamasının kararı daha doğru bir biçimde verilebilecektir.

Bu çalışmada fazla karmaşık olmayan bir kazı hafriyat işinin benzetimi ve kazı süresi ile iş makine-saat belirsizlik tahminleri Monte Carlo analizi kullanılarak yapılmıştır. Birden fazla ekskavatörü, dozer, greyder ve kırıcı gibi iş makinelerine de ihtiyaç duyulan daha uzun süreye yayılmış bir yol inşaatının benzetimi yapılabilir. Bunun yanı sıra daha ilerideki çalışmalarda iş-makinelerinin maliyet analizleri de yapılarak sadece süre ve makine-saat değil toplam proje maliyetinin de belirsizliği hesaplanabilir.

Kaynaklar

- Adams F. K., 2006. Expert elicitation and Bayesian analysis of construction contract risks: an investigation", Construction Management and Economics, Vol. 24, pp. 81 – 96.
- Arizaga O. J. F., 2007. A methodology for Project risk analysis using bayesian belief networks within a Monte Carlo simulation environment. Doctor of Philosophy, University of Maryland.
- Caterpillar, 1979. Fundamentals of Earthmoving. Caterpillar Tractor CO.
- Chau K. W., 1995. Monte Carlo simulation of construction costs using subjective data. Construction Management and Economics, Vol. 13, pp. 369 – 383.
- Cheng T., Feng C. ve Chen Y., 2005. A hybrid mechanism for optimizing construction simulation models. Automation in Construction Vol. 14, pp. 85 – 98.
- Helton J. C., 1993. Uncertainty and Sensitivity Analysis Techniques for use in Performance assessment for Radioactive Waste Disposal. Reliability Engineering and System Safety, Vol. 42, pp. 327 – 367.
- Kartam N. ve Flood I., 2000. Construction simulation using paralel computing environments. Automation in Construction, Vol. 10, pp. 69 – 78.
- Lai Y. T., Wang W. C. and Wang H. H., 2008. AHP- and simulation-based budget determination procedure for public building construction

- projects. *Automation in Construction*, Vol. 17, pp. 623 – 632.
- Mo J., Yin Y. ve Gao M., 2008. State of the art correlation-based models of Project scheduling Networks. *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 55(2), pp. 349 – 358.
- Nunnally S. W., 2001. *Construction Methods and Management* 5th Edition. Prentice Hall Ohio.
- Ranasinghe M., 2000. Impact of correlation and induced correlation on the estimation of Project cost of buildings. *Construction Management and Economics*, Vol. 18, pp. 395 – 406.
- Shi J. ve Abourizk S., 1998. Continuous and combined evenprocess models for simulating pipeline construction. *Construction Management and Economics*, Vol. 16, pp. 489 – 498.
- Shi J. J., Zehg S. X. ve Tam C. M., 1998. Modelling and simulation of public housing construction in Hong Hong. *Proceedings of the 1998 winter simulation conference*.
- Tserng H. P., Ran B. ve Russell J. S., 2000. Interactive path planning for multi-equipment landfill operations. *Automation in Construction*, Vol. 10, pp. 155 – 168.
- Yang I. T., 2005. Simulation-based estimation for correlated cost elements. *International Journal of Project Management*, Vol. 23, pp. 275 – 282.