

LİNYİT KALİTESİ-REZERV EĞRİLERİNDEKİ BELİRSİZLİĞİN JEOİSTATİSTİKSEL BENZETİMLE DEĞERLENDİRİLMESİ: ÖRNEK BİR ÇALIŞMA

Assessment of Uncertainty Associated with Lignite Quality-Tonnage Curves: A Case Study

A.Erhan TERCAN (*)
Elif AKCAN (**)

ÖZET

Linyit rezervlerinin ekonomik ve teknik değerlendirmesinde önemli bir problem linyit kalitesi-rezerv eğrilerinin kestirimi ve bu kestirime ilişkin belirsizliğin değerlendirilmesidir. Bu yazı, Kalburçayı (Kangal-Sivas) linyit sahası üst damarda bu yönde yürütülen örnek bir çalışmayı sunmaktadır. Çalışmada jeostatistiksel benzetim tekniği kullanılarak linyit kalitesi-rezerv eğrileri kestirilmiştir. Bu amaçla üst damar, 200m x 200m boyutlarında 180 adet panoya bölünmüş ve her bir panonun ortalama kalitesi koşullu ardışık normal benzetim tekniği ile modellenmiştir. Kalite değişkenleri olarak ısı değeri, kül ve kükürt içeriği dikkate alınmıştır. Belirsizliği değerlendirmek amacıyla üst damar, her bir kalite değişkeni için yüz kez modellenmiş her bir modelden kalite-rezerv eğrileri kestirilmiştir. Belirsizlik, elde edilen örneklem dağılımının standart sapması ve %95 güven aralığı ile sayısal olarak ölçülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Koşullu Ardışık Normal Benzetim, Olasılıklı Benzetim, Tenör-Tonaj Eğrisi, Uzaklığa Bağlı Belirsizlik, Variogram

ABSTRACT

An important problem in economic and technical assessment of lignite reserves is estimation of lignite quality-reserve curves and assessment of their uncertainty. This article addresses a case study carried out in this direction in the upper seam of the Kalburçayı lignite field (Kangal-Sivas), in which lignite quality -reserve curves are estimated by geostatistical simulation. For this purpose, the upper seam is divided into 180 panels with size of 200m x 200m and the mean quality of each panel is simulated by conditional sequential Gaussian simulation, considering calorific value, ash yield and sulphur content as quality variables. To assess uncertainty, one hundred realizations of the upper seam are generated for every quality variable and quality-reserve curves are estimated over each realization. Uncertainty is measured by standard deviation and 95% confidence interval of the sampling distribution obtained.

Keywords: Conditional Sequential Gaussian Simulation, Stochastic Simulation, Grade-Tonnage Curve, Spatial Uncertainty, Variogram

(*) Prof.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Maden Müh. Bölümü, Beytepe, Ankara, erhan@hacettepe.edu.tr

(**) Araş.Gör., Hacettepe Üniversitesi, Maden Müh. Bölümü, Beytepe, Ankara

1. GİRİŞ

Tenör-tonaj ve linyit kalitesi-rezerv terimleri aynı olgunun farklı alanlarda kullanılan tanımlamalarıdır. Bu çalışmada linyit sahası söz konusu olduğunda linyit kalitesi-rezerv terimi, daha genel durumlarda tenör-tonaj terimi kullanılacaktır. Tenör-tonaj eğrileri, sınır tenör ve blok büyüklüğünün bir fonksiyonu olarak rezerv ve ortalama tenördeki değişimleri gösteren eğrilerdir. Bu eğriler aynı zamanda işletilebilir rezervin grafiksel bir gösterim şekli olup bu gösterimde sınır tenör; rezervin ekonomik boyutunu blok büyüklüğü ise teknik boyutunu ifade eder. Tenör-tonaj eğrileri, bir madenin işletmeye alınmasından üretim planlamasına kadar her aşamada kullanılır.

Tenör-tonaj eğrilerinin kestirimine ilişkin çalışmalar, fizibilite incelemesinin başlangıcında yapılır. Bu aşamada veri sayısı ve kalitesinin genellikle yetersiz olması, tenör ve kalınlık gibi değişkenlerin uzaklığa bağlı dağılımı ve kestiriminde belirsizliğe yol açar. Bu belirsizlik aynı zamanda tenör-tonaj eğrilerine de yansır. Tenör-tonaj eğrileri, bir yatağın üretim planlamasında oldukça önemli rol oynadığından kestirilen bu eğrilerin ne kadar güvenilir olduğunu ifade etmek gerekir. Bu ise tenör-tonaj eğrilerindeki belirsizliğin değerlendirilmesini gerektirir.

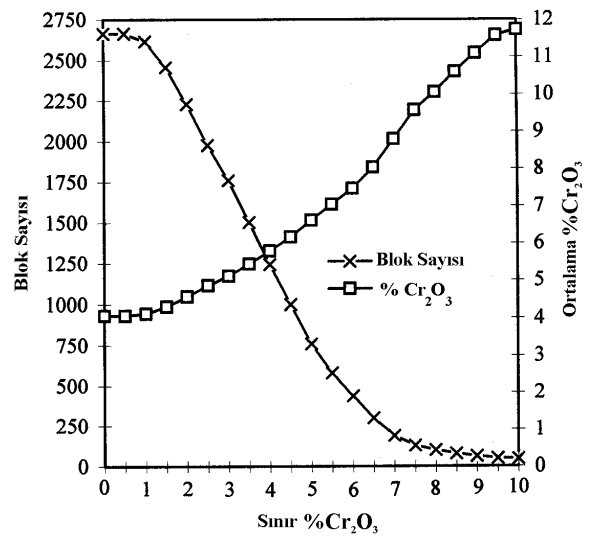
Kangal (Sivas)-Kalburçayırı linyit yatağı, %95 güven düzeyinde $110 \pm 7,7$ Milyon ton linyit içeren bir yataktır (Tercan ve Karayığit, 2001). İki adet damardan ibaret olan bu yatak aynı zamanda bölgede kurulu bulunan 465 MW/yıl kapasiteli termik santrale kömür beslemektedir. Günümüzde santrale ek bir ünitenin kurulması planlanmakta olup alınacak karar tümüyle linyit kalitesi - rezerv eğrilerinin yeniden değerlendirmesine bağlı olacaktır.

Bu çalışmanın amacı, Kalburçayırı linyit yatağı üst damarda linyit kalitesi-rezerv eğrilerindeki belirsizliği sayısal olarak değerlendirmektir. Bu amaçla benzetim (simulation) yaklaşımı benimsenmiş ve jeostatistiksel benzetimle linyit kalite değişkenlerine ilişkin model damarlar üretilmiştir. Linyit kalite değişkenleri olarak ısı değer, kül ve kükürt içeriği dikkate alınmıştır. Benzetim yöntemi olarak ardışık normal benzetim (sequential Gaussian simulation) yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın bundan sonraki bölümünde tenör-tonaj eğrileri ve bunlara ilişkin kestirim yöntemleri tartışılmış, benzetim

yaklaşımı üzerinde ayrıntılı bir şekilde durulmuştur. Daha sonra bu yaklaşım Kalburçayırı linyit yatağı üst damar kalite değişkenlerine uygulanmıştır. Son bölüm sonuçlar ve önerileri içermektedir.

2. TENÖR-TONAJ EĞRİLERİ VE KESTİRİMİ

Tenör-tonaj eğrileri, sınır tenör ve blok büyüklüğünün fonksiyonudur. Sınır tenör, ekonomik şartlara göre değişirken blok büyüklüğü, kazılabilir en küçük boyuttan pano boyutuna kadar çıkabilir. Kazılabilir en küçük boyut, açık ocakta genellikle bir kazı makinesi (ekskavatör ya da dragline)'nin kepçe büyüklüğüne, kapalı bir ocakta ise bir haveye karşılık gelir. Bu bloklar, sınır tenöre göre cevher ya da pasa bloğu şeklinde sınıflara ayrılır. Örneğin blok, sınır tenörden yüksek bir tenöre sahipse cevher bloğu, düşükse pasa bloğu olarak sınıflandırılır. Bu açıdan sınır tenörün işletilebilir rezervin (recoverable reserve) ekonomik, blok büyüklüğünün ise teknik yanını temsil ettiği söylenebilir. Tenör-tonaj eğrileri, bir maden yatağının işletmeye açılıp açılmayacağı ve işletmeye açılmış bir maden yatağında ne tür bir üretim yöntemi uygulanacağı konusunda önemli bilgiler sağlar. Şekil 1, bir krom yatağında $50 \times 50 \times 50$ m³lük bloklar için hesaplanan örnek bir tenör-tonaj eğrisini göstermektedir. Sınır tenörün yükselmesi ile toplam cevher miktarı azalmakta, ortalama tenör ise artmaktadır.



Şekil 1. Bir krom yatağında $50 \times 50 \times 50$ m³ bloklara ilişkin tenör-tonaj eğrisi (Köse, 1997)

Bir yatak düzlemsel olarak aynı büyüklük ve şekilde N adet bloğa bölündüğünde sınır tenörün üstündeki tonaj ve ortalama tenör, (1) ve (2) eşitliklerinden hesaplanır:

$$R(z) = \sum_{\alpha=1}^N i(x_{\alpha}, z) r(x_{\alpha}) \quad (1)$$

$$t(z) = \frac{\sum_{\alpha=1}^N i(x_{\alpha}, z) r(x_{\alpha}) z(x_{\alpha})}{\sum_{\alpha=1}^N i(x_{\alpha}, z) r(x_{\alpha})} \quad (2)$$

(1) ve (2) eşitliklerinde z; sınır tenörü, R(z); sınır tenörün üstündeki tonajı (rezervi), t(z); sınır tenörün üstündeki ortalama tenörü, N; blokların sayısını, $r(x_{\alpha})$; x_{α} bloğun rezervini, $z(x_{\alpha})$; x_{α} bloğunun ortalama tenörünü, $i(x_{\alpha}, z)$ ise x_{α} bloğuna ilişkin indikatör fonksiyonu göstermektedir:

$$i(x_{\alpha}, z) = \begin{cases} 1, & z(x_{\alpha}) > z \\ 0, & z(x_{\alpha}) \leq z \end{cases} \quad (3)$$

Tenör-tonaj eğrilerini oluşturmak için blok tenörleri $[z(x_{\alpha}), x_{\alpha}=1, \dots, N]$, blokların rezervi $[r(x_{\alpha}), x_{\alpha}=1, \dots, N]$ ve ayrıca indikatör değerleri $[i(x_{\alpha}, z), x_{\alpha}=1, \dots, N]$ bilmek gerekir. Blok rezervi; kalınlık, yüzey alanı ve cevher yoğunluğunun bir fonksiyonudur. Genelde cevher yoğunluğunun bir bloktan diğerine değişmediği varsayıp tek bir değer dikkate alınır. Rezervi etkileyen parametreler içinde tek değişken kalınlıktır. Bu nedenle her bir bloğun ortalama kalınlığını $[k(x_{\alpha}), x_{\alpha}=1, \dots, N]$ ayrıca bilmek gerekir.

Fizibilite aşamasında blok tenörleri, kalınlıkları ve indikatörler bilinmez ve bunlar, arama ve geliştirme amaçlı yapılan sondaj verilerinden kestirilir:

$$R^*(z) = \sum_{\alpha=1}^N i^*(x_{\alpha}, z) r^*(x_{\alpha}) \quad (4)$$

$$t^*(z) = \frac{\sum_{\alpha=1}^N i^*(x_{\alpha}, z) r^*(x_{\alpha}) z^*(x_{\alpha})}{\sum_{\alpha=1}^N i^*(x_{\alpha}, z) r^*(x_{\alpha})} \quad (5)$$

$$i^*(x_{\alpha}, z) = \begin{cases} 1, & z^*(x_{\alpha}) > z \\ 0, & z^*(x_{\alpha}) \leq z \end{cases} \quad (6)$$

(4), (5) ve (6) eşitliklerinde $R^*(z)$, $r^*(x)$, $t^*(z)$, $z^*(x)$ ve $i^*(x, z)$ kestirimleri göstermektedir. Tenör-tonaj eğrilerinin dolayısıyla $z(x)$, $i(x, z)$, $k(x)$ 'in kestirimine yönelik olarak literatürde pek çok yöntem geliştirilmiştir. Bunlar içinde kriging, blok tenörleri ve kalınlıkları kestirmek amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte kriging, yumuşatılmış (smoothed) değerler ürettiğinden indikatörlerin kestirimine uygun değildir. Çünkü indikatörler, kestirilen blok değerine göre oluşturulur. Örneğin kestirilen blok tenörü sınır değerden büyükse indikatör değer 1, küçükse sıfır olarak alınır. Eğer kestirilen blok tenörleri gerçek değerler gibi aynı değişkenliğe sahipse indikatörleri bu şekilde oluşturmanın bir sakıncası yoktur. Ancak kriging yöntemi ile düşük değerlerin daha yüksek, yüksek değerlerin ise daha düşük kestirildiği bilinmektedir. Bu tür yumuşatılmış değerler, indikatörleri belirlemek amacıyla kullanıldığında yüksek tenörlü blokların pasa bloğu, pasa bloklarının ise cevher şeklinde sınıflandırıldığı olumsuz durumlar ortaya çıkabilir. Ayrıca kriging yöntemi hata varyansının küçüklenmesi ölçütünü esas alıp yatağın tek bir sayısal modelini ürettiğinden tenör-tonaj eğrilerindeki belirsizliği değerlendirmek olanaklı değildir. Bu tür olumsuzlukları gidermek için mevcut verilerdeki değişkenliği yeniden üretecek ve eğrilerdeki belirsizliğin incelenmesine olanak verecek yöntemler kullanmak gerekir.

Bir yaklaşım, kestirilen tenör-tonaj eğrilerine ilişkin örneklem dağılımı oluşturmaktır. Örneklem dağılımı bilindiğinde kestirilen değerlerin standart hatası yada %95 güven aralığı hesaplanıp belirsizlik, sayısal bir şekilde ifade edilebilir. Örneklem dağılımını üretmenin bir yolu bootstrap (Efron, 1979) yöntemini kullanmaktır. Tercan (2003) ve Köse (2004) bu yönde çalışmalar yapmıştır. Bununla birlikte bu yaklaşım, önceden blok tenörlerinin bilinmesini gerektirmektedir. Örneklem dağılımını elde etmenin diğer bir yolu jeoistatistik benzetim yöntemini kullanmaktır.

2.1 Jeostatistiksel Benzetimle Tenör-Tonaj Eğrilerinin Kestirimi

Benzetim gerçeğin bir modeli olup jeostatistiksel benzetim, mevcut verilerin belirli özelliklerini yeniden elde edecek şekilde değerler üretmeyi amaçlar. Eğer benzetim değerleri mevcut veriler gibi aynı histogram ve aynı variograma sahipse benzetim yöntemi koşulsuz, bunlara ek olarak mevcut veri noktalarındaki değerlerle aynı ise

koşullu benzetim adını alır. Bu çalışmada koşullu benzetim yöntemi kullanılacaktır.

Benzetimle tenör-tonaj eğrilerinin kestirimi, nokta tenör ve kalınlık değerlerinin benzetimine dayanır. Blok değerleri, benzetimle üretilen nokta değerlerin ortalamalarından kestirilir. İndikatör değerler ise benzetimle üretilen blok değerlerinden elde edilir: benzetim değeri sınır değerden büyükse blok indikatörü 1, küçükse 0 değerini alır. Benzetimle tenör-tonaj eğrilerinin kestirimi ilk olarak Isaaks (1990) tarafından önerilmiştir. Bu çalışmayı Ravenscroft (1992), Nowak vd. (1993) ve Berckmans ve Armstrong (1999) tarafından yapılan çalışmalar izlemiştir. Bütün bu çalışmalar yalnızca tenör-tonaj eğrilerinin kestirimine yönelik olup bu eğrilere eşlik eden belirsizlik konu edilmemiştir. Tenör-tonaj eğrilerindeki belirsizliğin incelendiği çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Dimitrakopoulos (1998), açık ocak optimizasyonunda jeolojik belirsizliğin koşullu benzetim tekniği açısından genel bir değerlendirmesini yapmış ve tenör-tonaj eğrilerindeki belirsizliğe işaret etmiştir. Rossi (1999), uzun dönemli ocak planlaması ve işletilebilir rezervdeki belirsizliği değerlendirmede koşullu benzetimin önemine değinmiştir. Kentwell vd. (1999), ise Kuzey Avustralya'daki bir altın madeninde tenör-tonaj eğrilerini kestirmek için ardışık normal fraktal benzetim tekniğini kullanmış ve elde edilen sonuçları, ardışık normal benzetim ve ortanca (medyan) indikatör benzetimden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmıştır.

Tenör-tonaj eğrilerine ilişkin örneklem dağılımlarının doğrudan incelendiği çalışmalar Tercan ve Cengiz (2001) ve Cengiz (2003) tarafından yapılmıştır. Bu araştırmacılar dikleştirilmiş indikatör benzetim yöntemi kullanarak nokta değerli verilere ilişkin belirsizlik dağılımlarını incelemişlerdir. Ancak bloklara ilişkin herhangi bir çalışma yapmamışlardır. Blok büyüklüğünün tenör-tonaj eğrilerinin belirsizliği üzerindeki etkisi ilk kez Akcan (2003) ve Tercan ve Akcan (2004) tarafından yapılan çalışmalarla incelenmiştir. Bu araştırmacılar, aynı zamanda veri dağılımının şekli ve kısa mesafedeki değişkenliğin etkisini de ele almışlardır.

Jeostatistiksel benzetimle belirsizliğin değerlendirilmesi maden yatağının eşit olasılıklı birden çok sayısal modelinin oluşturulmasına dayanır. Daha sonra her bir modelden tenör-tonaj eğrisi elde edilir. Bu eğrilerin örneklem dağılımından standart sapma ya da %95 güven

aralığı gibi belirsizliğin sayısal olarak ölçüldüğü istatistikler hesaplanır. Bu yaklaşım Şekil 2'de gösterilmiştir. %95 güven aralığını belirlemek amacıyla örneklem dağılımını oluşturan değerler (K adet) en küçükten en büyüğe doğru sıraya dizilir. Daha sonra $0,975 \times K$ ve $0,025 \times K$ 'inci sıradaki değerler belirlenir. Bu değerler, bilinmeyen değere ilişkin %95 güven aralığını verir. Örneğin, örneklem dağılımı 1000 adet değerden ibaretse, bu değerler küçükten büyüğe doğru sıraya dizilir ve daha sonra 25 inci ve 975 inci değerler alınır. İlk değer %95 güven aralığının alt sınırını ikinci değere üst sınırını oluşturur.

2.1.1 Koşullu Ardışık Normal Benzetim Yöntemi

Literatürde tenör ve kalınlıkların benzetimine yönelik olarak çok sayıda jeostatistiksel yöntem geliştirilmiştir. Srivastava (1996), bu yöntemlerin ayrıntılı bir şekilde incelemiştir. Bu çalışmada ise basit ve kolay anlaşılabilir olduğundan koşullu ardışık normal benzetim yöntemi tercih edilmiştir. Yöntem, N sayıda grid noktasında bir veri kümesinin dağılımını, variogramını ve ayrıca örneklenmiş lokasyonlardaki değerleri verecek şekilde benzetim değerleri üretmeyi amaçlar. Bu işlem beş adımda gerçekleştirilir:

1. N sayıdaki grid noktası içinde rastgele bir nokta seçilir.
2. Mevcut veriler ve daha önceden benzetimi yapılan değerler kullanılarak bu noktadaki koşullu olasılık dağılım fonksiyonu hesaplanır.
3. Bu dağılım fonksiyonundan rastgele bir değer çekilir. Bu değer, o noktadaki benzetim değeridir.
4. Bu değer, sonraki adımlarda kullanılmak üzere saklanır.
5. Bütün noktalarda benzetim değerleri elde edilene kadar 1 den 4 e kadar olan adımlar tekrar edilir.

Normal benzetimde koşullu dağılım fonksiyonunun çok değişkenli normal olduğu varsayıp dağılımın ortalaması ve varyansı verilerden hesaplanır. Bunun için benzetime başlamadan önce verilerin normal dağılmış değerlere dönüştürülmesi gerekir. Daha sonra dönüştürülmüş verilerin variogramı hesaplanıp modellenir. Bu model ve dönüştürülmüş veriler kullanılarak benzetimi yapılacak noktada basit kriging ile kestirim yapılır. Kestirim değeri ve

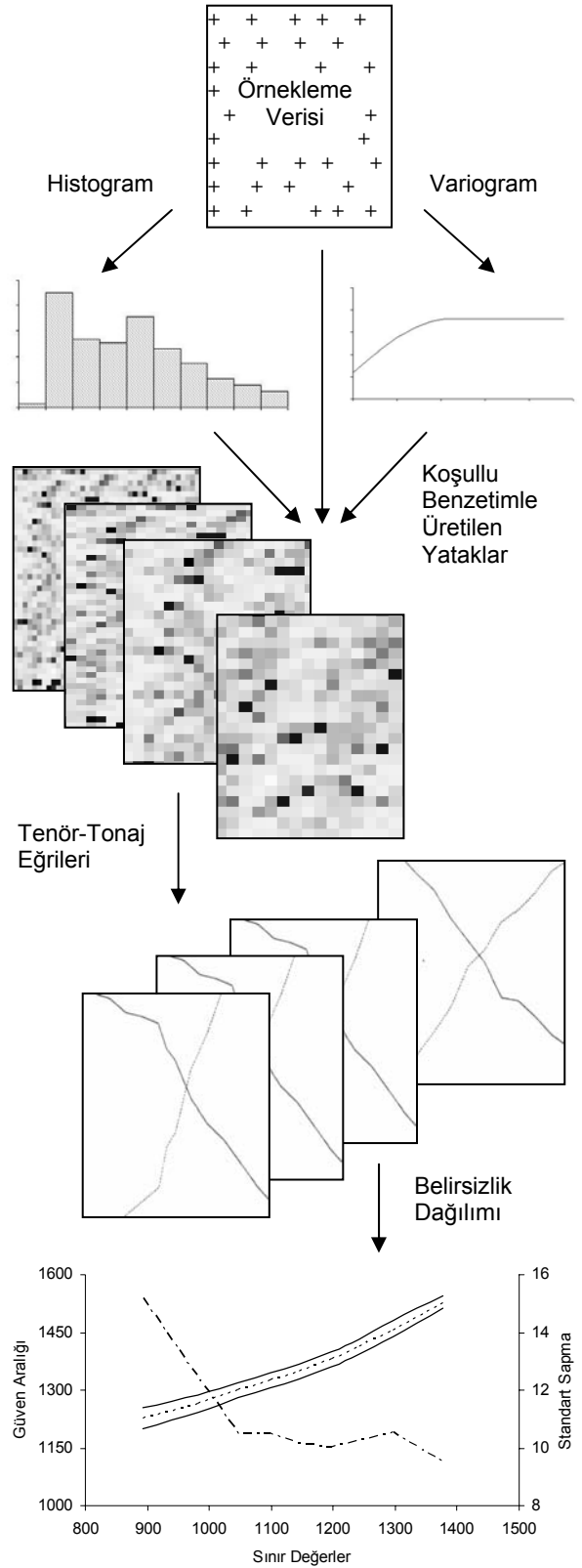
varyansı bu noktadaki koşullu dağılım fonksiyonunun ortalaması ve varyansı olarak alınır. Benzetim işlemi tamamlandığında elde edilen benzetim değerleri, orijinal veri uzayına geri dönüştürülür (Tercan ve Özçelik, 2004). Bu konuda ayrıntılı bilgi Deutsch ve Journel (1998) tarafından verilmiştir.

3. KALBURÇAYIRI (KANGAL-SİVAS) LİNYİT SAHASINDA UYGULAMA

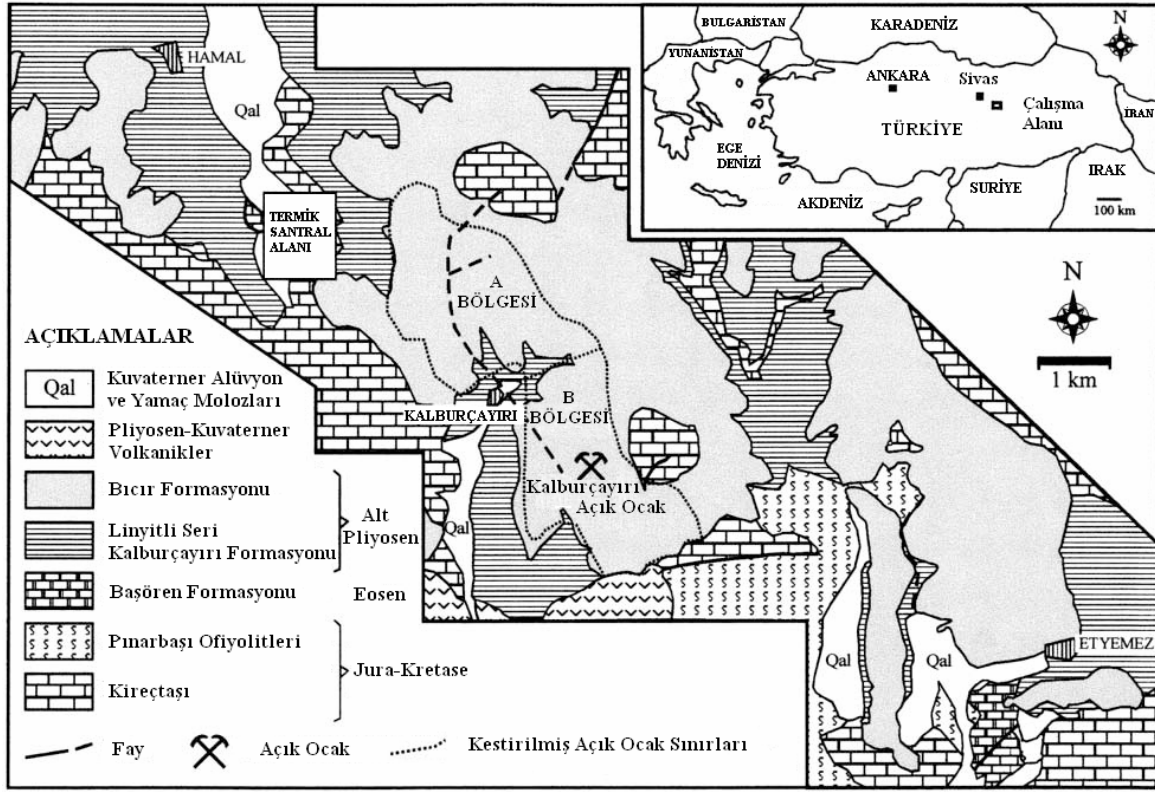
Kalburçayırı linyit sahası, Sivas'ın Kangal ilçesi idari sınırları içinde olup, ilçe merkezinin güneyinde bulunmaktadır. Demir Export AŞ tarafından işletilen saha, iki adet damar içermekte ve üretilen kömür bölgede kurulu bulunan termik santrale beslenmektedir. Değişik jeoistatistiksel çalışmalara konu olan (Tercan, 1998; Tercan ve Karayığit, 2001; Tercan, 2004) sahada sınırlı sayıda jeolojik inceleme yapılmıştır (Utku, 1976; Gökmen vd., 1993; Narin ve Kavuşan, 1993; Karayığit vd., 2001). Tercan ve Karayığit (2001) den değiştirilerek alınmış bir jeoloji haritası Şekil 3'te gösterilmiştir.

Neojen öncesi kayalar sahanın temelini oluşturmaktadır. Alt Pliyosen kayalar, Kalburçayırı ve Bıcır formasyonlarını oluşturmakta ve iki damarda (alt ve üst damar) Bıcır formasyonu içinde yer almaktadır. Bu damarlar yaklaşık olarak 20m kalınlığında tüflü sedimanter bir kayayla ayrılmaktadır (Tercan ve Karayığit, 2001).

Pratikte ısı değeri, kül ve kükürt içeriği, farklı uzunlukta karotlardan belirlendiğinden jeoistatistik çalışmalarda (variogram ve benzetim) doğrudan kullanılamazlar. Bunların yerine kalınlık ve kalite değişkeninin çarpımından ibaret olan kalite kalınlığı değişkeni tanımlanır. Örneğin kalite değişkeni kül ise yeni değişken (kalınlık x kül) kül kalınlığı adını alır ve jeoistatistik çalışmalar hem kalınlık hem de kül kalınlığı değişkeni üzerinde yapılır. Benzetim sonunda kül değeri, benzetilmiş kül kalınlığı değerini benzetilmiş kalınlık değerine bölerek elde edilir. Kalite değişkenlerinin benzetimini bu şekilde yapabilmek için kalınlık ve kalite değişkenlerinin aynı lokasyonlarda örneklenmiş olmaları gerekir.



Şekil 2. Tenör-tonaj eğrilerine ilişkin belirsizlik dağılımının benzetimle modellenmesi (Akcan, 2003)



Şekil 3. Kalburçayırı linyit sahası basitleştirilmiş jeoloji haritası (Tercan ve Karayığit (2001) den değiştirilerek alınmıştır)

3.1 Veriler

Arama ve geliştirme amacı ile sahada MTA, TKİ ve Demir Export A.Ş. tarafından 224 sondaj yapılmış, bu sondajlardan 170 tanesi linyit kesmiştir. Üst damara ilişkin linyit kalınlığı, ısı değer, kül ve kükürt içeriği bu çalışmada kullanılan değişkenleri oluşturmaktadır. Bu değişkenlere ilişkin istatistikler Çizelge 1'de verilmiştir.

3.2 Variogram Analizi

Kalite değişkenlerinin jeostatistikte doğrudan kullanılamaması nedeniyle bu çalışmada dikkate alınan ısı değer, kül ve kükürt içeriği gibi değişkenler, kalite kalınlığı (ısı değer kalınlığı, kül kalınlığı ve kükürt kalınlığı) değişkenine dönüştürülmüştür. Ardışık normal benzetimin gereği olarak kalınlıkla birlikte kalite kalınlığı değişkenlerine ikinci bir dönüşüm uygulanmış ve normal dağılım gösteren değişkenler elde edilmiştir. Daha sonra normal dönüştürülmüş değişkenlerin dört ana yönde (DB, K45D, KG ve K45B) deneysel variogramları hesaplanmıştır

Variogramları hesaplamada birim uzaklık 250m, tolerans uzaklığı 125m ve tolerans açısı 30° olarak alınmıştır.

Çizelge 1. Kalınlık ve Linyit Kalite Değişkenlerine İlişkin İstatistikler

	Kalınlık (m)	Isıl değer (kcal/kg)	Kül (%)	Kükürt (%)
veri sayısı	170	170	124	79
en küçük değer	0,4	474	10,24	1,12
ortalama	7	1240	22,24	1,86
en büyük değer	16	2263	41,73	2,98
standart sapma	4,15	298	6,55	0,4

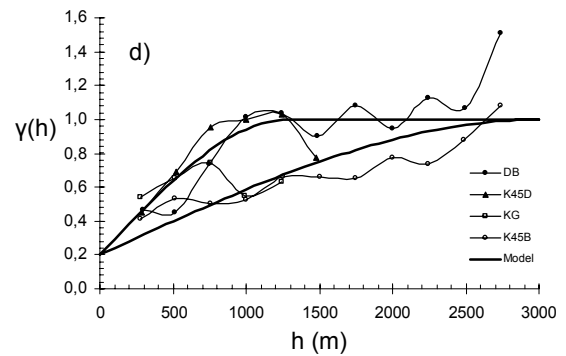
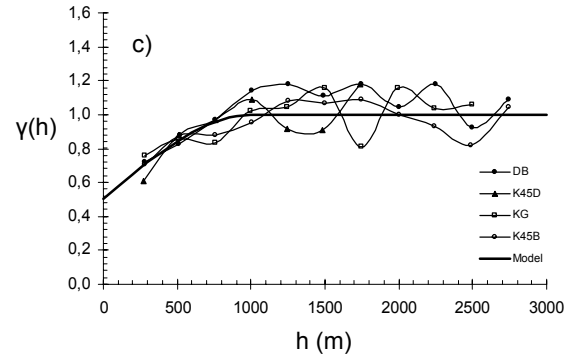
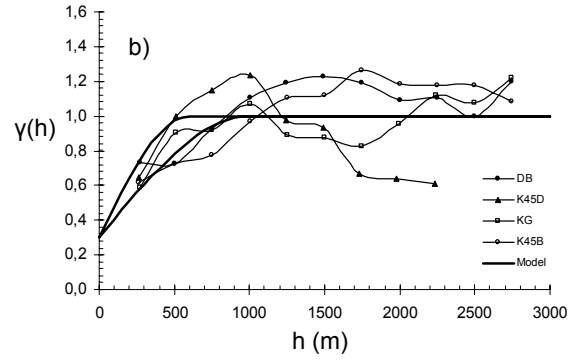
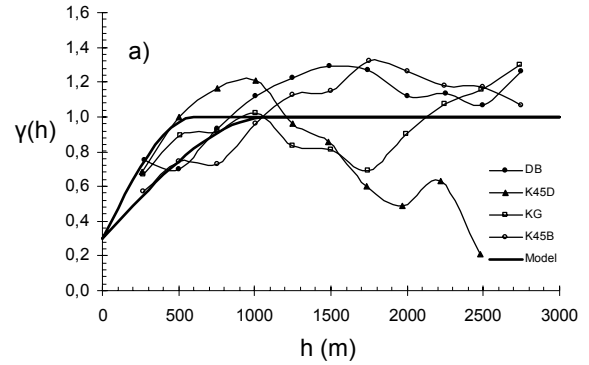
Normal dönüşüm ve variogram hesaplamalarında GSLIB (Deutsch ve Journel, 1998) den sırasıyla NSCORE ve GAMV programları kullanılmıştır. Şekil 4a-4d, deneysel variogramlarla birlikte bunlara uyarlanan modelleri göstermektedir. Variogramlar, küresel tipte olup model parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir. Kül kalınlığı dışında variogramlar anizotropik bir yapı sergilemektedir. Anizotropi, kükürt kalınlığı için oldukça belirgindir. En büyük anizotropi eksenini K45B yönünde olup en küçüğü buna dik yöndedir (K45D).

Çizelge 2. Variogram Model Parametreleri

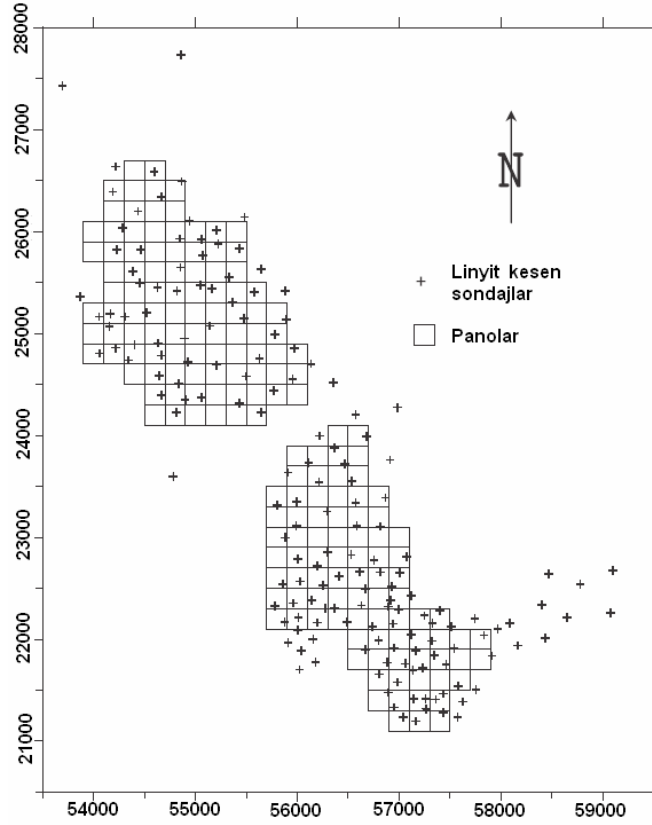
Değişken	C_0	C	a_{K45D}	a_{K45B}
kalınlık	0,3	0,7	600	1000
ısı değer kalınlığı	0,3	0,7	600	1000
kül kalınlığı	0,5	0,5	1000	1000
kükürt kalınlığı	0,2	0,8	1300	3000

3.3 Kalınlık ve Kalite Değişkenlerinin Benzetimi

Benzetim ilk olarak nokta değerler için gerçekleştirilmiştir. Pano değerleri bunların ortalamalarından elde edilmiştir. Nokta değerlerin benzetimi amacıyla DB yönünde 150 ve KG yönünde 150 olmak üzere toplam 22500 nokta dikkate alınmıştır. Bitişik noktalar arasındaki uzaklık 40m'dir. Koşullu ardışık benzetim tekniği kullanılarak kalınlık ve her bir kalite kalınlığı değişkeni 22500 noktada benzetilmiştir. Bu amaçla GSLIB (Deutsch ve Journel, 1998) den SGSIM programı kullanılmıştır. Programa Çizelge 2'de verilen variogram parametreleri girilmiştir. Kalite değişkenlerinin ortalamalarının benzetileceği pano düzenlemesi (panoların geometrisi ve yeri) önceki yapılan çalışmalarla tutarlılık arz etmesi bakımından Tercan (2004) ten alınmış ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Pano büyüklüğü 200mx200m olup pano sayısı 180'dir. Tercan (2004), bu pano düzenlemesini işletilebilir tümsel rezervi kestirmek amacıyla kullanmıştır.



Şekil 4. Deneysel ve model variogramlar a) kalınlık b) ısı değer kalınlığı c) kül kalınlığı ve d) kükürt kalınlığı



Şekil 5. Kalburçayırı üst damarda benzetimi yapılan panolar (Tercan, 2004)

Nokta benzetim değerlerinden kalite değişkenlerinin pano ortalamalarına geçmek amacıyla iki yöntem kullanılabilir: (1) pano içine düşen noktaların ortalama kalite kalınlığı ve ortalama kalınlığını hesaplayıp bunların oranını almak:

$$\frac{\sum_{i=1}^n k k_i}{\sum_{i=1}^n k_i} \quad (7)$$

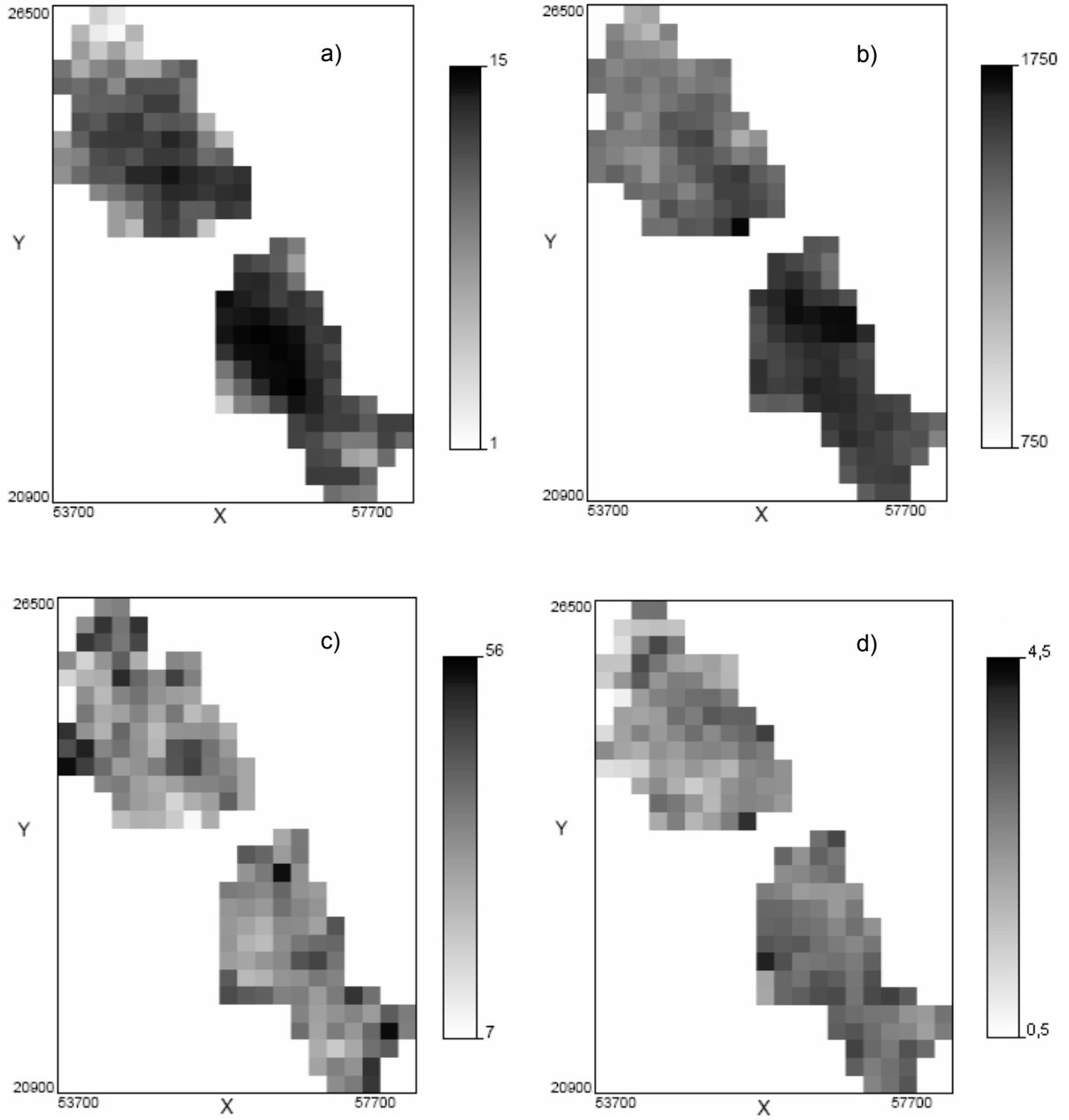
(2) benzetilmiş nokta kalite kalınlığı değerini benzetilmiş kalınlık değerine bölüp elde edilen benzetilmiş kalite değerlerinin pano içindeki ortalamasını hesaplamak

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{k k_i}{k_i} \quad (8)$$

(7) ve (8) ifadelerinde $k k_i$ ve k_i ; x_i ncı noktadaki kalite kalınlığı ve kalınlık değerlerini

göstermektedir. Genellikle ortalamaların oranı, oranların ortalamasına eşit olmadığından bu iki yöntem farklı sonuç verecektir. Bu yöntemlerden hangisinin daha iyi (istatistiksel olarak en az hatalı) sonuç verdiği kalınlık ve kalite değişkenleri arasındaki ilişki katsayısına bağlıdır. Marcotte ve Boucher (2003), bu yönde bir çalışma yapmış ve bu iki değişken arasındaki doğrusal ilişki katsayısı negatif olduğunda ilk yöntemin, pozitif olduğunda ise ikinci yöntemin iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Bu çalışmada kullanılan veriler, kalınlık ve kalite değişkenleri arasında pozitif ilişki sergilediğinden pano ortalamalarının benzetiminde ikinci yöntem dikkate alınmıştır. Benzetimi yapılan kalınlık ve kalite değişkenlerine ilişkin pano ortalamalarının (ilk model damar için) imge (image) haritaları Şekil 6a-6d'de ve histogramları ise (1., 50., ve 100. model damarların ortalamaları için) Şekil 7a-7d' de gösterilmiştir. Isıl değer; simetrik iki tepeli dağılım şekline sahipken, kül ve kükürt içeriği ise pozitif çarpık bir dağılım göstermektedir.

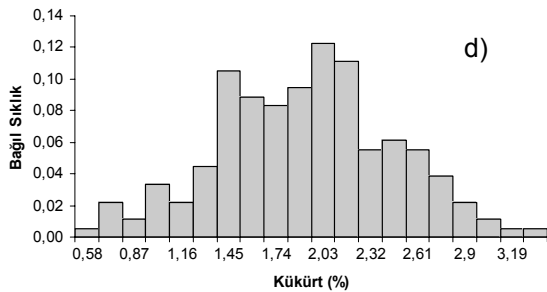
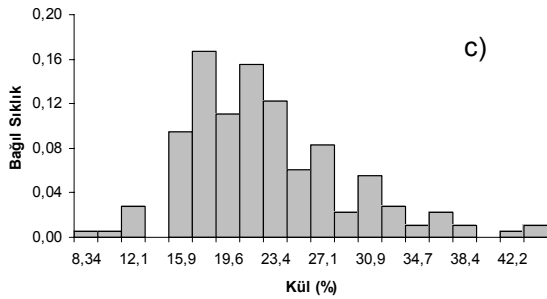
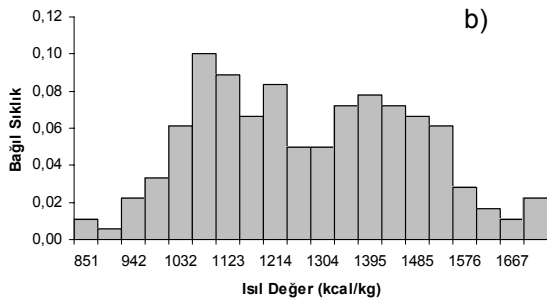
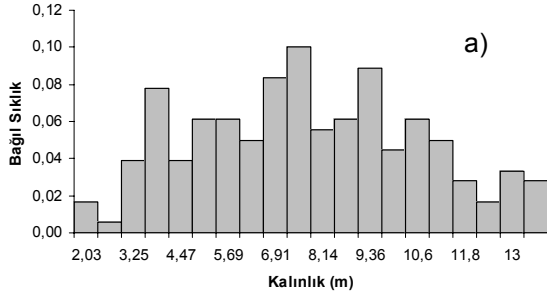


Şekil 6. Benzetimi yapılan kalınlık ve kalite değişkenlerine ilişkin pano ortalamalarının (ilk model için) imge haritaları a) kalınlık b) ısı değer c) kül d) kükürt

3.4 Linyit Kalitesi-Rezerv Eğrilerinin Kestirimi ve Belirsizliğin Değerlendirilmesi

Üst damarın kalınlık ve her bir kalite değişkeni için yüz adet model üretilmiş ve (4), (5) ve (6) eşitlikleri kullanılarak her bir model üzerinde linyit kalitesi-rezerv eğrileri oluşturulmuştur. Eğrileri oluşturmada sınır değer olarak kalınlık ve kalite değişkeni dağılımının onda birlik (percentile)

değerleri dikkate alınmıştır. Belirsizliği değerlendirmek amacıyla her bir sınır değerdeki 100 adet kalınlık ve kalite değerlerinin ortancası, standart sapması ve %95 güven aralıkları hesaplanmıştır. Şekil 8a-8c, ısı değer, kül ve kükürt içeriğine bağlı olarak rezerv belirsizliğindeki değişimleri, Şekil 9a-9c ise ortalama linyit kalitesine ilişkin belirsizlikteki değişimlerini göstermektedir.



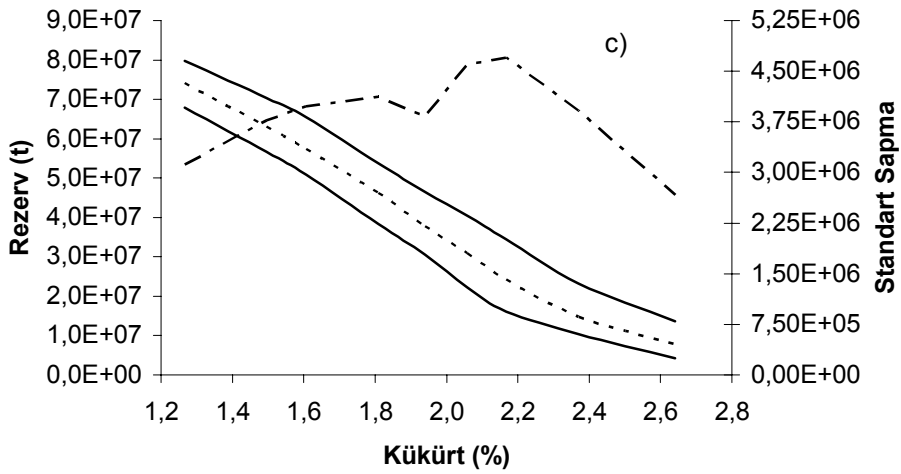
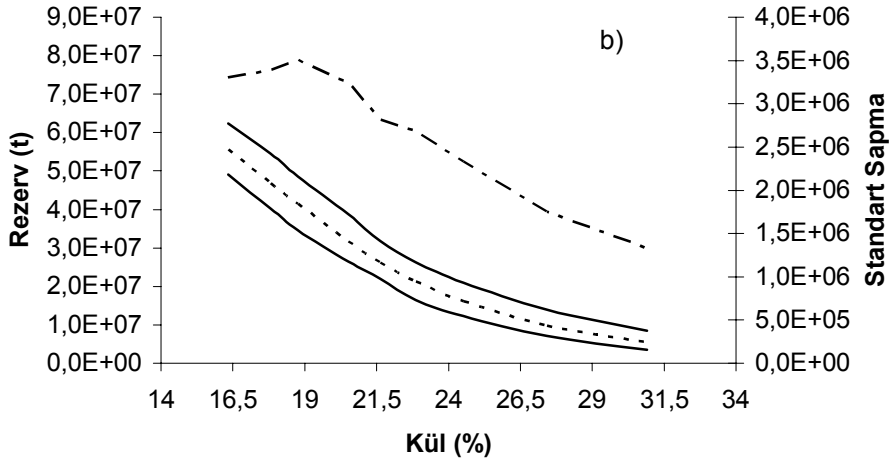
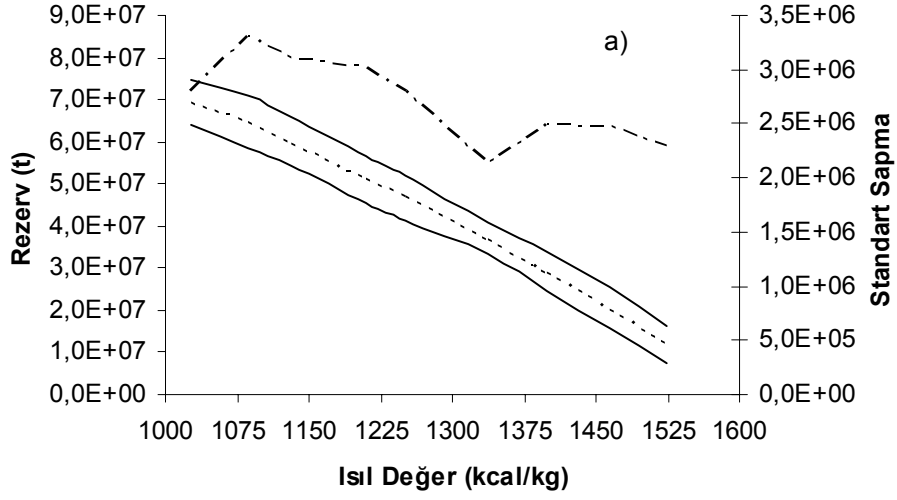
Şekil 7. Benzetimi yapılan kalite değişkenlere ilişkin pano ortalamalarının histogramları a)kalınlık b)ısı değer c) kül d) kükürt

Rezerve ilişkin belirsizlik grafiklerine (Şekil 8a-8c) bakıldığında sınır kalite değeri arttıkça sınır değer üstündeki linyit rezervinin azaldığı görülmektedir. Örneğin, ısı değer 1100 kcal/kg olduğunda bu sınır değer ve üzerindeki linyit rezervi %95 olasılıkla 57.100.000-69.400.000 ton arasında iken, 1300 kcal/kg ve üstünde 36.800.000-45.500.000 ton ve 1500 kcal/kg ve üstünde ise 10.800.000-20.000.000 ton arasında değişmektedir. Benzer şekilde, kül içeriği %17 olduğunda bu sınır değer üzerindeki linyit rezervi %95 olasılıkla 45.000.000-59.000.000 ton arasında iken, %22 ve üzerinde 20.000.000-30.000.000 ton arasında, %30 ve üzerinde ise 4.450.000-9.900.000 ton arasında değişmektedir. Benzer bir gözlem kükürt için de yapılabilir. Kül ve kükürt arttıkça rezervin azalması ilk bakışta çelişkili gibi gözükabilir. Ancak Şekil 8, sınır değer üstündeki rezervi temsil ettiğinden burada bir tutarsızlık söz konusu değildir.

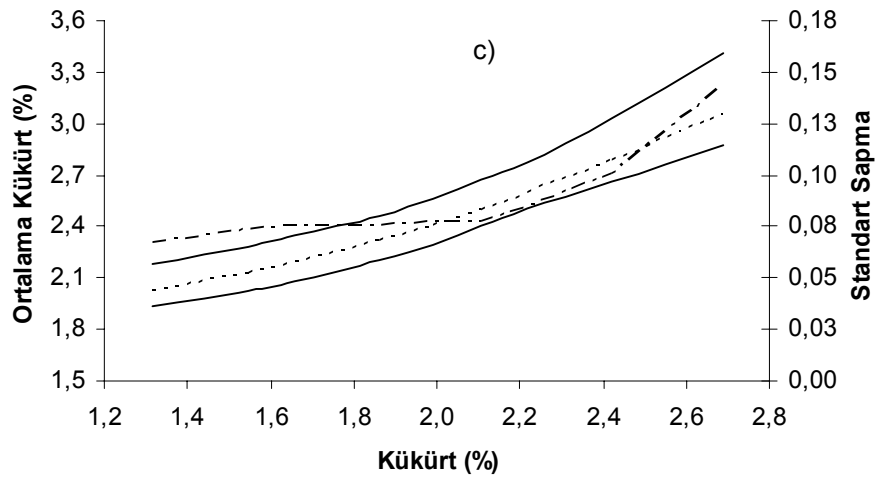
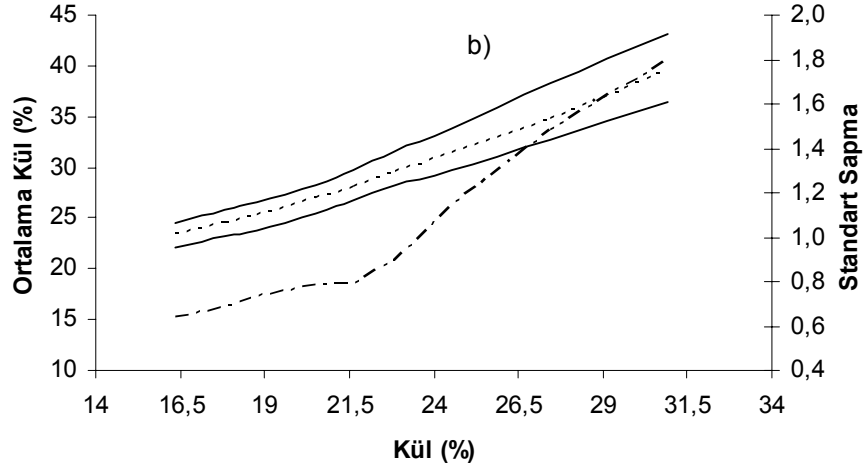
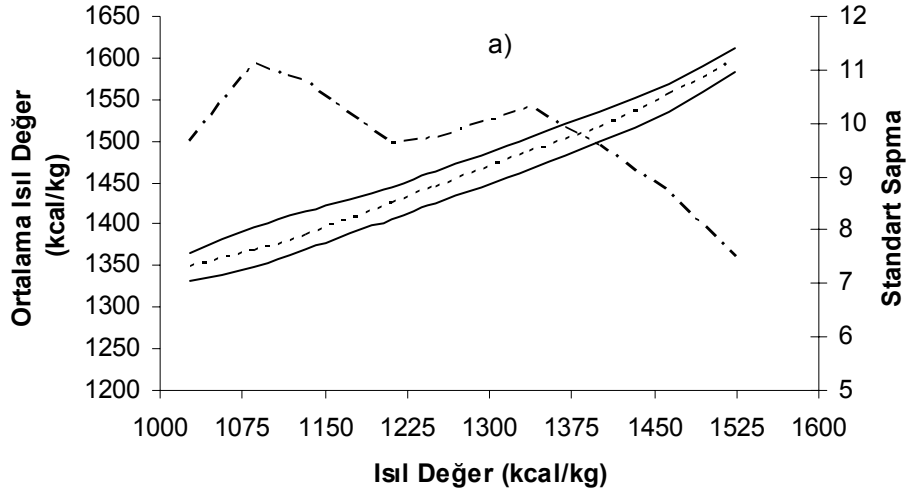
Isıl değer ve kül içeriği arttıkça rezervdeki belirsizlik azalma eğilimi gösterirken, kükürt içeriğinde belirsizlik ortanca sınır değere kadar artmakta bundan sonra azalmaktadır. Ayrıca kükürtteki linyit rezervine ilişkin güven aralıkları ısı değer ve kül içeriğine ilişkin aralıklardan daha geniştir. Santrale beslenecek linyit kalitesinin ve miktarının yerinde bilinmesine olanak tanıyan bu tür veriler yeni kurulacak ek ünitenin tasarımında ve santrale sabit kalitede malzeme beslemek amacıyla yapılacak çalışmalarda büyük bir önem taşımaktadır.

Linyit kalitesine ilişkin belirsizlik grafikleri (Şekil 9a-9c) artan sınır değerle bu sınır değer üstündeki linyitin ortalama ısı değer, kül ve kükürt içeriğinin beklendiği şekilde arttığını göstermektedir. Bununla birlikte ortalama kaliteye ilişkin %95 güven aralıkları farklı değişkenler için farklı bir gelişim izlemektedir. Örneğin, ısı değere ilişkin aralıklar 1086 kcal/kg ısı değere kadar artmakta bundan sonra 1337 kcal/kg seviyesindeki kısmi bir artışla birlikte azalış göstermektedir. Ancak güven aralıklarının genişliklerindeki bu değişimler, pratik açıdan önemsenmeyecek bir seviyededir. Örneğin en büyük genişlik 50 kcal/kg iken en küçüğü 30 kcal/kg dir.

Güven aralığı genişliğindeki değişkenliklerin santrale sabit kalitede linyit beslemek açısından önemli sonuçları vardır. Isıl değere ilişkin aralıklar büyük bir değişkenlik sergilemediğinde santrale sabit ısı değerinde linyit beslemek önemli bir problem oluşturmayacaktır.



Şekil 8. Rezerve ilişkin belirsizliğin değerlendirilmesi. a) ısıl değer b) kül c) kükürt (Düz çizgi; güven aralığı; noktalı çizgi ortanca, noktalı kesikli çizgi; standart sapma)



Şekil 9. Kalite değişkenlerine ilişkin belirsizliğin değerlendirilmesi. a) ısı değer b) kül c) kükürt (Düz çizgi; güven aralığı; noktalı çizgi ortanca, noktalı kesikli çizgi; standart sapma)

Bununla birlikte kül ve kükürt açısından durum farklıdır. Küle ilişkin güven aralığı genişliği %21,6, kükürte ilişkin aralık genişliği ise %2,2'den sonra sürekli bir artış göstermektedir. Bu sınır değerlerden sonra aralıkların sürekli genişlemesi, santrale sabit kül ve kükürt içeriğinde linyit beslemenin zorlaşacağını ve dolayısıyla kül ve kükürt analizlerinin daha sık ve dikkatli yapılması gerektiğini işaret etmektedir.

Isıl değer, kül ve kükürt içeriğine ilişkin güven aralığı genişlikleri ve yayılım, bu değişkenlerin dağılım şekline ve bu dağılımın uçlarındaki aykırı değerlere bağlıdır. Örneğin ısı değer sol uçta düşük, sağ uçta ise yüksek değerlerin bulunduğu simetrik bir dağılıma sahiptir (Şekil 7b). Düşük sınır değerde, sol uçtaki çok sayıda aykırı değer, varyansın yükselmesine neden olmaktadır (Şekil 9a). Ortanca sınır değere doğru ortalamaya yakın değerlerin sayısı artıp, aykırı değerlerin etkisini azaltmakta ve bunun bir sonucu olarak varyans ve aralık genişlikleri azalmaktadır. Varyanstaki azalma, sağ uçtaki aykırı değerler etkisini göstermeye başladığı belirli bir sınır değere kadar devam etmektedir. Sağa çarpık bir dağılım (Şekil 7c ve 7d) gösteren kül ve kükürt içeriğinde ise aykırı değerler sağ uçta yer aldığından sınır değer yükseldikçe dağılımın varyansı ve güven aralığı genişlikleri artmaktadır (Şekil 9b-9c).

4. SONUÇLAR

Ocak planlaması, rezerv ve linyit kalitesinin doğru bir şekilde kestirimine bağlıdır. Kestirimler hata içerdiğinde hatanın büyüklüğünün belirlenmesi, dolayısıyla rezerv-lyinit kalitesi eğrilerine ilişkin belirsizliğin değerlendirilmesi gerekir. Sivas-Kangal linyit yatağında yapılan örnek çalışma, linyit kalitesi-rezerv eğrilerine ilişkin belirsizliğin dağılım tipine ve sınır değerlere bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir.

Rezervdeki belirsizlik (güven aralığı genişliği ve standart sapma) ısı değer ve kül içeriği arttıkça azalmakta, kükürtte ise ortanca sınır değere kadar artıp bundan sonra düşüş göstermektedir. Ortalama ısı değere ilişkin belirsizlik genel olarak artan sınır değerle azalmaktadır. Bununla birlikte, ortalama kül ve kükürt içeriğine ilişkin belirsizlik, artan sınır değerle artmakta özellikle belirli bir sınır değerden sonra (kül için %21,6 ve kükürt için %2,2) artış hızlanmaktadır. Bu sonuçların, yeni kurulacak ek ünitenin

tasarımında ve santrale sabit kalitede linyit beslemek amacıyla yapılacak çalışmalarda önemli etkileri vardır.

Örnek çalışmada linyit kalitesi-rezerv eğrileri 200mx200m büyüklüğündeki panolar için hesaplanmıştır. Bununla birlikte diğer pano büyüklükleri dikkate alınarak eğriler kestirilebilir. Ayrıca eğrilerin kestiriminde kalite değişkenlerinin hepsini aynı anda dikkate alan eş benzetim (co-simulation) yöntemleri kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Akcan, E., 2003; "Tenör-Tonaj Eğrilerindeki Belirsizliğin Jeostatistiksel Benzetimle İncelenmesi", Yüksek Mühendislik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Berkmans, A., Armstrong, M., 1999; "Bootstrapping: a Fast Way to Simulate QTz Curves", *Mathematical Geology*, **31**, (4), 471-485.

Cengiz (Kaynak), T., 2003; "Dikleştirilmiş İndikatör Yöntemlerle Rezerv Kestirimi ve Benzetimi", Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Deutsch, C.V. and Journel, A.G., 1998; "GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide", 2nd edition, Oxford University Press, New York, 369.

Dimitrakopoulos, R., 1998; "Conditional Simulation Algorithms for Modelling Orebody Uncertainty in Open Pit Optimisation", *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, **12**, 173-179.

Efron, B., 1979; "Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife", *Annals of Statistics*, **7**, 1-26

Gökmen, V., Memikoğlu, O., Dağlı, M., Öz, D., Tuncalı, E., 1993; "Türkiye Linyit Envanteri". MTA Yayınları, Ankara, Türkiye, 356.

Isaaks, E. H., 1990; "The Application of Monte Carlo Methods to the Analysis of Spatially Correlated Data, Doktora Tezi", Stanford University, Stanford, CA.

Karayigit, A., Gayer, R.A., Ortac, F.E., Goldsmith, S., 2001; "Trace Elements in the

- Lower Pliocene Fossiliferous Kangal Lignites, Sivas, Turkey. *International Journal of Coal Geology*, **47**, 73–89.
- Kentwell, D. J. , Bloom, L. M. , Comber, G. A. , 1999; "Improvements in Grade Tonnage Curve Prediction Via Sequential Gaussian Fractal Simulation", *Mathematical Geology*, **31**, (3), , 311-325.
- Köse, A., 1997; "Kızılcayüksek-Yataardıç (Karsantı) Krom Yatağının Jeostatistiksel Değerlendirilmesi", Yüksek Mühendislik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara
- Köse, A., 2004; "Bootstrap'a Dayalı Rezerv Kestirim Yöntemlerinin Geliştirilmesi", Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara
- Narin, R., Kavusan, G., 1993; Sivas-Kangal-Kalburçayırı Linyit Yatağının Jeolojisi, C.Ü. Mühendislik Fakültesi Dergisi, Seri A, Sayı 1, 43-47.
- Marcotte D., Boucher A., 2003; "The Estimation of Mineralized Veins: A Comparative Study of Direct and Indirect Approaches", *Exploration and Mining Geology*, **10**, (3), 243-348.
- Nowak, M.S., Srivastava , R.M., Sinclair, A.J., 1993; "Conditional Simulation: A Mine Planning Tool for a Small Gold Deposit", *Geostatistics Troia'92*, **2**, Amilcar Soares (ed.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 977-1000.
- Ravenscroft, P. J. , 1992; "Recoverable Reserve Estimation by Conditional Simulation", *Case Histories and Methods in Mineral Resource Evaluation*, Annels, A. E. (ed.), Geological Society, London, 289-298.
- Rossi, M. E. , 1999; "Improving the Estimates of Recoverable Reserves", *Mining Engineering*, January, 50-54.
- Srivastava M. R., 1996; "An Overview of Stochastic Spatial Simulation", (H. T. Mowrer, R. L. Czaplewski and R. H. Hamre eds.), 2nd Int. Symp. on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, US Department of Agriculture and Forest Service, 13–22.
- Tercan, A.E., 1998, "Assesment of Boundary Uncertainty in a Coal Deposit Using Probability Kriging", *Mining Industry, Trans. Instn. Min. Metal., Section A*, **107**, A51-A54
- Tercan, A. E., and Karayigit, A. I., 2001; "Estimation of Lignite Reserve in the Kalburçayırı Field, Kangal Basin, Sivas, Turkey", *International Journal of Coal Geology*, **47**, 91–100.
- Tercan A. E., Cengiz, T. K., 2001, Dikleştirilmiş İndikatör Yöntemlerle Rezerv Kestirimi, TÜBİTAK, Rapor No: YDABÇAG-199Y020, 48.
- Tercan A.E., 2003; "The Ranked Tile Resampling in Assessing Accuracy for Global Coal Reserve Estimates", *Energy Sources*, **25**, (1), 93-102.
- Tercan A.E., 2004; "Global Recoverable Reserve Estimation by Covariance Matching Constrained Kriging", *Energy Sources*, **26**, (12), 1177-1185.
- Tercan A.E., Akcan E., 2004; "Assessment of Uncertainty Associated With Grade-Tonnage Curves Using Geostatistical Simulation", *Mining Technology (Trans. Instn. Min. Metall., Section A)*, **113**, A129-A136.
- Tercan A.E., Özçelik, Y., 2004; "Bir Andezit Ocağında Bazı Mekanik Özelliklerin Jeostatistiksel Benzetimi", VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Sivas, 119-122.
- Utku, M., 1976; "Sivas-Kangal Kömür Yatağı Fizibilite Araştırma Raporu", MTA Yayınları, Ankara, Türkiye, 38.