

Farklı Kimyasal ve Isıl Özelliklere Sahip Kömürlerin Doğrusal Programlama ile Harmanlama Optimizasyonu

Sema Nur TURAN^{1*}, Deniz ADIGÜZEL²

^{1,2} Maden Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye

^{1*} smnrtrn@gmail.com, ² deniza@iuc.edu.tr

(Geliş/Received: 06/05/2024;

Kabul/Accepted: 25/08/2024)

Öz: Termik santraller elektrik üretiminde önemli bir yere sahip olan tesislerdir. Fakat üretim maliyeti, kaynakların sürdürülebilir kullanımı ve ürün kalitesinin sağlanması termik santraller için büyük bir problemdir. Bu problemin çözülmesi için enerji tüketimi optimizasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, maliyetin minimize edildiği ve termik santralde kullanılması uygun sınır değerlerin kısıtı olarak kullanıldığı doğrusal programlama modeli ile dört farklı bölgeden üretilen (Orhaneli havzası, Keles Havzası, Seyitömer Havzası ve Tunçbilek Havzası) kömür, 2'li, 3'lü ve 4'lü olarak harmanlanmış ve karışım modelleri oluşturulmuştur. Buna göre toplam 6 harman grubu oluşturulmuş ve kurulan modeller Lingo programıyla çözülmüştür. Buna göre; 1. grupta Orhaneli ocağından %37,2 - Keles ocağından %62,8, 2. grupta Orhaneli ocağından %15,6 - Seyitömer ocağından %84,4, 3. grupta Keles ocağından %88,9 - Tunçbilek ocağından %11,1, 4. grupta Tunçbilek ocağından %75 - Seyitömer ocağından %25, 5. grupta Orhaneli ocağından %43 - Keles ocağından %52 ve Tunçbilek ocağından %5 ve 6. grupta ise Orhaneli ocağından %29, Seyitömer ocağından %64 ve Tunçbilek ocağından %7 oranında kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Böylece farklı kimyasal ve ısıl özelliklere sahip kömürler harmanlama optimizasyonu ile belirli oranlarda termik santrallerde kullanılabilir duruma getirilmiştir. Yapılan hesaplamalara göre; toplam 6 harman grubu içerisinde maliyetler açısından Orhaneli / Keles / Tunçbilek 3'lü harmanı ve Orhaneli / Keles 2'li harmanlarının en düşük değerleri verdiği görülmektedir.

Anahtar kelimeler: Doğrusal Programlama, Harmanlama Optimizasyonu, Maliyet Minimizasyonu.

Blending Optimization of Coals with Different Chemical and Thermal Properties with Linear Programming

Abstract: Thermal power plants are facilities that have an important place in electricity production. However, production costs, sustainable use of resources, and ensuring product quality are major problems for thermal power plants. Energy consumption optimizations are needed to solve this problem. In this study, coal produced from four different regions (Orhaneli Basin, Keles Basin, Seyitömer Basin, and Tunçbilek Basin) was used as a constraint with the linear programming model where the cost was minimized and the limit values suitable for use in the thermal power plant were used, in double, triple and quadruple coal. were blended and mixture models were created. Accordingly, a total of 6 blend groups were created and the established models were solved with the Lingo program. According to this; 37.2% from Orhaneli quarry in the 1st group - 62.8% from the Keles quarry, 15.6% from the Orhaneli quarry in the 2nd group - 84.4% from the Seyitömer quarry, 88.9% from the Keles quarry in the 3rd group - 11.1% from the Tunçbilek quarry, in the 4th group, 75% from Tunçbilek quarry - 25% from Seyitömer quarry, in the 5th group, 43% from Orhaneli quarry - 52% from Keles quarry and 5% from Tunçbilek quarry, and in the 6th group, 29% from Orhaneli quarry, 64% from Seyitömer quarry and 7% from Tunçbilek quarry. It was concluded that it should be used in proportion. Thus, coals with different chemical and thermal properties have been made available in thermal power plants in certain proportions through blending optimization. According to the calculations made, it is seen that among the total six blend groups, Orhaneli / Keles / Tunçbilek 3-bleed blend and Orhaneli / Keles 2-bleed blends give the lowest values in terms of costs.

Keywords: Linear Programming, Blending Optimization, Cost Minimization.

1. Giriş

Kömür, bitki kalıntılarının fiziksel ve kimyasal değişimleri sonucu çökelme havuzlarında oluşur. Bu süreçler, bitki kalıntılarının çürümesi, gömülmesi, sıkıştırılması ve sonunda organik kaya olan kömüre dönüşmesini içerir. Kömür, yanabilir bir sedimenter kaya türüdür ve organik ile inorganik bileşenlerin karışımından oluşur. Organik olarak, karbon, hidrojen ve oksijen temel bileşenlerdir, ancak değişen oranlarda kükürt ve azot da içerir. İnorganik olarak, kömür, farklı kül oluşturan bileşiklerin çeşitli konsantrasyonlarda bulunduğu bir karışımdır [1].

Yanma sırasında yüksek kükürt ve kül içeriği üreten kömürlerin kullanılması, enerji santralleri, endüstriler ve evlerde çevre ve hava kirliliği üzerinde olumsuz etkilere neden olabileceğinden, mümkün olan en düşük kükürt ve kül içeriğine sahip kömürler tercih edilir. Bu tür kömürlerin kullanılmasından önce, kömürün kalitesinin karakterize edilmesi önemlidir, böylece kükürt içeriğinden kaynaklanan olumsuz etkilere engel olunabilir [2].

* Sorumlu yazar: smnrtrn@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹0009-0005-4726-7807, ²0000-0002-1611-1296.

Kömürün kalitesinin karakterize edilmesi için ise kömür analizindeki temel parametreler dikkate alınır. Bu parametreler arasında kömürün nem içeriği, kül oranı, kükürt yüzdesi, sabit karbon seviyesi ve uçucu madde miktarı bulunur [3]. Nem, kömür partikülleri arasındaki boşluklarda ve yüzeylerde tutunur. Nem, kömürün ısıl değerini azaltan bir etkidir, bu nedenle, kömürün kalorifik değerini seyrelten bir faktördür [4]. Kül, yanmayan mineral bileşenlerinin oranını temsil eder. Kömürdeki kül oranı %5 ile %30 arasında değişir ve kül, diğer kirleticilerin yanı sıra toprak, taş ve mineraller gibi yabancı maddeleri içerir. Kül içeriğini azaltma çabaları, kirleticileri azaltmanın yanı sıra kömürün kalorifik değerini artırmayı amaçlar, böylece yüksek kaliteli kömüre daha yakın bir değer sunulabilir [3]. Kömürdeki kükürt içeriği ise oldukça değişkenlik göstermekle birlikte genellikle %0,5 ile %5 arasında değişmektedir. Kömürde bulunan kükürdün başlıca formları piritik, organik ve sülfat kükürttür. Piritik ve organik kükürt, kömürdeki kükürdün %50'sinden fazlasını oluşturur. Ayrıca, hava koşullarına maruz kalan kömürlerde az miktarda sülfat bulunabilir [5,6]. Uçucu madde miktarı kömürün, oksijensiz ortamda ısıtılması sırasında gaz ve sıvı ürünler haline dönüşen bileşenlerin toplamını ifade eder. Kömürün yanma sürecinde bu uçucu maddeler serbest kalır. Sabit karbon da uçucu maddeler uçurulduktan sonra, kömürdeki nem ve kül içeriğinin çıkarılması sonucunda geriye kalan bileşeni ifade eder ve yanma süreci sonrasında geriye kalan ve yakılabilir kalıntıyı temsil eder [7].

Kömür, Türkiye'nin en önemli doğal kaynaklarından biridir. Özellikle petrol üretimimiz bu kadar düşükken ve doğal gaz üretiminin temelleri daha yeni atılırken kömür üretimi zaruri bir ihtiyaçtır [8]. Ülkemizde üretilen kömürlerin evlerde yakıt olarak kullanılması için işletmelerin İl Çevre ve Orman Müdürlüğü'nden uygunluk belgesi alması gerekmektedir. Torbalama değerlerine uygun olmayan yani uygunluk belgesi alınamayan kömür, termik santrallerin istediği analiz değerlerine uygun olduğu takdirde santralde yakıt olarak kullanılmaktadır. Bu problemin çözülmesi için harmanlama optimizasyonu yapılmaktadır.

Harmanlama yapılırken çeşitli endüstrilerde sıkça problemlerle karşılaşılabilir ve doğrusal programlama, bu problemlerin bazılarını etkili bir şekilde çözmek için kullanılan bir yöntemdir. Gıda, madencilik ve bilgisayar endüstrileri gibi farklı sektörlerde hammadde maliyetlerini minimize etmek amacıyla doğrusal programlamaya dayalı modeller geliştirilmiş fakat doğrusal programlama ile çözülemeyen problemler için farklı optimizasyon yöntemleri kullanılabilir [9]. Kömür harmanlaması için yapılan çalışmalarda ise; Yuan ve ark. kok kalitesini tahmin etmek için Gauss fonksiyonlarına dayalı bir modelleme ve optimizasyon yöntemi önermiştir ve Xi-Jin ve ark. yaptıkları çalışmada kömür endüstrisindeki harmanlama problemlerini genetik algoritmalar kullanarak çözmüştür [10, 11]. Yin ve ark. tarafından kömür harmanlama optimizasyonunda, doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle çalışılmıştır ve doğrusal programlamaya göre yapay sinir ağlarıyla yapılan çözüm daha uygun sonuçlar vermiştir [12] Elevli ve ark. çalışmalarında, Garp Linyitleri İşletmesi'nde altı farklı noktada üretilen kömürün dört farklı tüketim merkezine dağıtımını planlamak amacıyla Doğrusal Programlama tekniğini kullanmışlardır. Bu amaç doğrultusunda, dağıtım sistemi detaylı bir şekilde modellenmiş ve modelin çözümü için simpleks yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen model sonuçları detaylı bir şekilde analiz edilerek, işletmenin çeşitli birimlerinde üretilen farklı özelliklere sahip kömürlerin maksimum faydayı sağlayacak şekilde hangi tüketim merkezlerine gönderilmesi gerektiği belirlenmiştir [13].

Bu çalışma ile kömür santrallerine beslenen malzemedeki en önemli sorunlardan biri olan malzeme kalitesinin devamlı olarak değişmesi problemi ele alınmış ve bu doğrultuda bir çözüm yöntemi ortaya konulmuştur. Bu malzemelerdeki kalite değişimlerini en aza indirmek için harmanlama yapılması gerekmektedir. Dolayısıyla problem bir harmanlama optimizasyon problemidir. Bu aynı zamanda sürdürülebilir ve çevre dostu bir üretiminde vazgeçilmez bir unsurdur. En uygun harmanlama modelinin oluşturulması sadece malzeme kalitesi ve maliyet açısından etkili olmayıp, bunun bir sonucu olarak da optimum bir üretim planlaması beraberinde getirerek en az çevresel etki ile bir üretimin sağlanması gerçekleştirilebilecektir. Tüm bu verilerin ışığında seçimli üretimi gerçekleştirmek ve bununla birlikte kaynakların verimli kullanımı da mümkün olabilecektir. Bu çalışmanın amacı kömür analizleri torbalamaya uygun olmayan linyitleri, harmanlama optimizasyonu ile termik santrallerin yakıt teknolojisi ve çalışma değerlerine uygun hale getirmektir. Bu çalışmada, dört farklı kömür ocağından üretilen linyit kömürü, uygun kalitede tek bir termik santrale beslenmesi için doğrusal programlama kullanılarak harmanlanmıştır. Amaç fonksiyonu toplam maliyetleri ve dolayısıyla enerji tüketimini en aza indirecek şekilde belirlenmiştir. Kömür için literatür ve standartları karşılayan ve termik santralde kullanılmasında uygun sınırlar ise modelde kısıtlar olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak farklı kimyasal ve ısı özelliklere sahip kömürler, kurulan modeller Lingo programıyla harmanlama optimizasyonu yapılarak termik santrallerde kullanılabilir duruma getirilmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem

2.1. Çalışma sahaları

Çalışma kapsamında 4 farklı bölgeden (Orhaneli havzası, Keles Havzası, Seyitömer Havzası ve Tunçbilek Havzası) elde edilen ve kimyasal ve ısıl özellikleri farklı kömürler kullanılmıştır. Şekil 1’de bu bölgelerin konumları verilmiştir. Tablo 1’de ise çalışma konusu linyit sahalarına ait formasyon ve kömür analiz değerleri verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma Sahaları.

Tablo 1. Çalışma konusu linyit sahalarına ait formasyon ve kömür analiz değerleri [14-17].

Kod	Bölge	İl	Formasyon	Kalorifik Değer (Kcal/Kg)	Kükürt (%)	Kül (%)	Nem (%)
B2	Orhaneli Havzası	Bursa	Bu havzanın temel kayaları ofiyolitler, metamorfik şistler ve mermerlerdir.	3848-4174	2,27	8	26
B1	Keles Havzası	Bursa	Havzada temel kayalar metamorfik şistler ve kristalize kireçtaşlarından oluşmaktadır.	2357-2702	1,84	20	38
K2	Seyitömer Havzası	Kütahya	Bu havzanın temel kayaları serpantinleşmiş ultrabazik kayalar ile radyolarit ve bazı yerlerde kristalize kireçtaşı içeren, ofiyolitik serilerdir.	2022-2345	1,95	25	36
K1	Tunçbilek Havzası	Kütahya	Bölge Neojen döneminde gelişmiştir. Neojen istifleri içerisinde gelişen bu volkanizma materyalleri volkanotortullar, lav ve domlar şeklindedir.	3744-4014	1,33	20	20

Çalışma kapsamında Bursa Orhaneli’de bulunan Termik santral değerlendirilmiş ve bu santrale uygun kömür özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 3’de ise harmanlama yapılacak linyit sahalarının söz konusu termik santrale olan mesafeleri verilmiştir.

Tablo 2. Termik Santralde Kullanılan Kömürlere Ait Analizler [18].

Santral	Ünite Gücü (MW)	Kömür Tüketimi (t/h)	Kömür Özelliği			
			Alt Isıl Değer (Kcal/Kg)	Kül (%)	Nem (%)	Kükürt (%)
Orhaneli	1x210	1x200	2560	24	32-36	2

Tablo 3. Linyit sahalarının termik santrale olan mesafeleri.

Termik Santral	Kömür Ocakları	Mesafe (km)
Orhaneli	Bursa-Orhaneli	16
	Bursa-Keles	54
	Kütahya-Seyitömer	138
	Kütahya-Tunçbilek	88

2.2. Yöntem

Doğrusal Programlama (DP), optimizasyon problemlerini çözmek için vazgeçilmez bir araçtır. Bu teknik, belirli kısıtlamalara tabi olan doğrusal modelleri değerlendirmek için matematiksel bir süreçtir ve bu durumda, üretimin optimum sonuçlarını bulmak için kullanılır [9,19]. Çalışma kapsamında tanımlanan kömür harmanlama problemi doğrusal programlama modeliyle formüle edilmiştir. Modelde; Tablo 1’de verilen kömür özellikleri teknolojik katsayılar olarak, Tablo 2’de verilen termik santral beslenen kömür değerleri kısıtlar olarak ve Tablo 3’de verilen mesafe değerleri ise amaç fonksiyonunun bileşeni olarak tanımlanmıştır. Problem maliyet minimizasyonu problemidir ve mesafe değerleri maliyetlerin hesaplanmasında kullanılmıştır. Buna göre; 2’li, 3’lü ve 4’lü harman modelleri oluşturulmuştur. En uygun maliyet ve kömür özelliklerinin belirlenebilmesi ve bulunan harman oranlarının ocak rezervleri gibi kısıtlamalardan etkilenmeyerek uygulanabilirliğinin artırılması amacıyla üçlü ve dördü harman modelleri de çalışma kapsamında oluşturulmuştur.

İkili harmanlama için oluşturulan doğrusal programlama modeli;

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (A_{ij} * M_i) + (A_{ji} * M_j); \quad (1)$$

$$(A_{ij} * K_i) + (A_{ji} * K_j) \geq 2560; \quad (2)$$

$$(A_{ij} * S_i) + (A_{ji} * S_j) \leq 2; \quad (3)$$

$$(A_{ij} * W_i) + (A_{ji} * W_j) \leq 36; \quad (4)$$

$$(A_{ij} * W_i) + (A_{ji} * W_j) \geq 32; \quad (5)$$

$$(A_{ij} * KU_i) + (A_{ji} * KU_j) \leq 24; \quad (6)$$

$$A_{ij} \geq 0; \quad (7)$$

$$A_{ij} + A_{ji} = 1; \quad (8)$$

$$i \neq j; \quad (9)$$

Üçlü harmanlama için oluşturulan doğrusal programlama modeli;

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (A_{ijk} * M_i) + (A_{jik} * M_j) + (A_{kij} * M_k); \quad (10)$$

$$(A_{ijk} * K_i) + (A_{jik} * K_j) + (A_{kij} * K_k) \geq 2560; \quad (11)$$

$$(A_{ijk} * S_i) + (A_{jik} * S_j) + (A_{kij} * S_k) \leq 2; \quad (12)$$

$$(A_{ijk} * W_i) + (A_{jik} * W_j) + (A_{kij} * W_k) \leq 36; \quad (13)$$

$$(A_{ijk} * W_i) + (A_{jik} * W_j) + (A_{kij} * W_k) \geq 32; \quad (14)$$

$$(A_{ijk} * KU_i) + (A_{jik} * KU_j) + (A_{kij} * KU_k) \leq 24; \quad (15)$$

$$A_{ijk} \geq 0; \quad (16)$$

$$A_{ijk} + A_{jik} + A_{kij} = 1; \quad (17)$$

$$i \neq j \neq k; \quad (18)$$

Dörtlü harmanlama için oluşturulan doğrusal programlama modeli:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (A_{ijkl} * M_i) + (A_{jikl} * M_j) + (A_{kijl} * M_k) + (A_{lkij} * M_l); \quad (19)$$

$$(A_{ijkl} * K_i) + (A_{jikl} * K_j) + (A_{kijl} * K_k) + (A_{lkij} * K_l) \geq 2560; \quad (20)$$

$$(A_{ijkl} * S_i) + (A_{jikl} * S_j) + (A_{kijl} * S_k) + (A_{lkij} * S_l) \leq 2; \quad (21)$$

$$(A_{ijkl} * W_i) + (A_{jikl} * W_j) + (A_{kijl} * W_k) + (A_{lkij} * W_l) \leq 36; \quad (22)$$

$$(A_{ijkl} * W_i) + (A_{jikl} * W_j) + (A_{kijl} * W_k) + (A_{lkij} * W_l) \geq 32; \quad (23)$$

$$(A_{ijkl} * KU_i) + (A_{jikl} * KU_j) + (A_{kijl} * KU_k) + (A_{lkij} * KU_l) \leq 24; \quad (24)$$

$$A_{ijkl} \geq 0; \quad (25)$$

$$A_{ijk} + A_{jik} + A_{kij} + A_{lkij} = 1; \quad (26)$$

$$i \neq j \neq k \neq l; \quad (27)$$

Burada;

$i, j, k, l = 1, 2, 3, 4$; kömür ocakları,

$M_{i,j,k,l} = i, j, k$ ya da l ocağının mesafesi,

$K_{i,j,k,l} = i, j, k$ ya da l ocağının kalorifik değeri,

$S_{i,j,k,l} = i, j, k$ ya da l ocağının kükürt değeri,

$W_{i,j,k,l} = i, j, k$ ya da l ocağının nem değeri,

$KU_{i,j,k,l} = i, j, k$ ya da l ocağının kül değeri,

A_{ij} : i ocağının j ocağıyla yaptığı karışımda aldığı oran,

A_{ijk} : i ocağının j ve k ocaklarıyla yaptığı karışımda aldığı oran,

A_{ijkl} : i ocağının j, k ve l ocaklarıyla yaptığı karışımda aldığı oran.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında Eşitlik 1-27 de verilen model çözümlenmiş ve 2'li, 3'lü ve 4'lü harman modellerine ait çözümler her karışıma göre ayrıca yorumlanmıştır. 4'lü harmanlamada sınır değerler sağlanmadığı için optimum çözüm bulunamamıştır.

3.1. İkili harmanlama modelleri

Orhaneli ve Keles havzalarından üretilen kömürler ile yapılan 2'li karışıma ait sonuçlar Tablo 4'de ve bu sonuçlara göre yapılan duyarlılık analizi Tablo 5'de, Orhaneli ve Seyitömer havzalarından üretilen kömürler ile yapılan ikili karışıma ait sonuçlar Tablo 6'da ve bu sonuçlara göre yapılan duyarlılık analizi Tablo 7'de, Keles ve Tunçbilek havzalarından üretilen kömürler ile yapılan ikili karışıma ait sonuçlar Tablo 8'de ve bu sonuçlara göre yapılan duyarlılık analizi Tablo 9'da, Tunçbilek ve Seyitömer havzalarından üretilen kömürler ile yapılan ikili karışıma ait sonuçlar Tablo 10'da ve bu sonuçlara göre yapılan duyarlılık analizi ise Tablo 11'de verilmiştir. Orhaneli ve Tunçbilek havzalarından üretilen kömürlerin düşük nem içerikleri nedeniyle minimum nem kısıtı sağlanmadığından, Keles ve Seyitömer havzalarından üretilen kömürlerin ise yüksek nem içerikleri nedeniyle maksimum nem kısıtı sağlanmadığından harmanlama yapılamaz.

Tablo 4. Orhaneli / Keles İkili Harman Modeli.

Değişken	Değer	İndirgenmiş maliyet
A_{ij}	0,372	0,00
A_{ji}	0,628	0,00
	Aylak ve artık değişkenler	İkil değişkenler
Amaç fonksiyonu	39,86	-1,00
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	689,72	0,00
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	0,00	88,37
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	2,46	0,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	1,53	0,00
Kül değeri kısıt fonksiyonu	8,46	0,00
Amaç Fonksiyonu değeri:	39,86 km	

Tablo 4’de, amaç fonksiyonu yani uzaklık 39,86 km olarak belirlenmiştir. Değer sütunundan, asıl modeldeki değişkenlerin en iyi çözümdeki değerleri $A_{ij}=0,372$ ve $A_{ji}=0,628$ alınmıştır. Bu sonuca göre, Bursa-Orhaneli / Bursa-Keles ocaklarının harmanında Bursa-Orhaneli ocağından %37,2, Bursa-Keles ocağından ise %62,8 oranında kömür kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. İkil modele eklenen aylak ve artık değişkenlerin, indirgenmiş maliyet sütunundan alınan ikil modelin en iyi çözümündeki değerleri gösterir. Asıl modelin iki değişkeni olduğu için ikil model iki kısıtlı olacağından, ikil modelde iki adet aylak ve artık değişken oluşacaktır. Modellerin en iyi halinde eğer bir değişken modelde asıl olarak bulunmuyorsa fakat bu modele asıl olarak girmesi gerekirse, bu değişkenin herhangi bir değerine göre indirgenmiş maliyet, uzaklık değerinden ne kadar zarar edilebileceğini gösterir. Dual modelin kısıtları tam olarak gerçekleştiğinde çözüme göre bu değerler “0” olmaktadır. Bu, asıl modelin en iyi çözümünde hem değer aldığı hem de değişkenlerin ana değişken olduğunu gösterir. Temel modele göre eklenen kısıtların aylak/artık değişkenlerinin aldıkları en iyi değerler, aylak ve artık değişkenler sütunundan okunmaktadır. Aylak ve artık değişkenlere göre, kükürt değeri kısıt fonksiyonunun sıfır olup tam olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda sınır değerler olduğu haliyle karşılanır. Bu yüzden bu kısıta hiçbir artık/aylak değişken eklenmemiştir. Maksimum nem, minimum nem, kalorifik değer ve kül değeri kısıt fonksiyonlarının sınır değerlerini tam olarak karşılayamadığı için kaynakların yüksek miktarda kullanılmadığı açıkça gözlemlenmektedir. Hazırlanmış olan harmanın niteliklerine bakıldığında sınır değerlerine kıyasla sonuçların daha uygun olduğu söylenebilmektedir. Kalorifik değer için, sınır değerine bakıldığında, 689,72 kcal/kg kullanılmayan kaynak bulunduğu gözlemlenmektedir. İstenen kalorifik değerin 2560 kcal/kg’den büyük olması gerekmektedir ve bu yüzden oluşturulan harmanın kalorifik değeri ise 3249,72 olarak belirlenmiştir. Şayet çözüm ikil değişkenler açısından yorumlanırsa, kükürt kısıt fonksiyonundaki sağ taraf sabitinde uzaklık değerinin her azalış ve artışında doğru orantılı olarak 88,37’lik azalış ve artış olacaktır.

Tablo 5. Orhaneli / Keles İkili Harman Modeli Duyarlılık Analizi.

Değişken	Değer	İzin verilebilir artış	İzin verilebilir azalış
A_{ij}	16	38	$-\infty$
A_{ji}	54	$+\infty$	38
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	2560	689,72	$-\infty$
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	2	0,05	0,09
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	36	$+\infty$	2,46
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	32	1,53	$-\infty$
Kül değeri kısıt fonksiyonu	24	$+\infty$	8,46

Tablo 5'e bakıldığında A_{ij} değişkeni için, uzaklığa olan katkı 16 km olup, istenilirse 38 km artırılıp $-\infty$ 'a dek düşürülebilir. Bu halde A_{ij} 'in uzaklığa olan etkisi $(-\infty, 54]$ aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır. A_{ji} değişkeninde ise bu durum tam tersidir. A_{ji} 'in uzaklığa olan katkısı 54 km olup, istenilirse 38 km azaltılıp $+\infty$ 'a dek arttırılabilir. Bu halde A_{ji} 'nin uzaklığa olan etkisi $[16, +\infty)$ aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır. Bu durumda maksimum nem için 2,46 birim, kül değeri için 8,46 birim azalış ve arzu edilen miktarda artış uygulanabilir. Kalorifik değer için 689,72 kcal/kg, minimum nem değeri için 1,53 birim artış ve arzu edilen miktarda azalış uygulanabilir.

Tablo 6. Orhaneli / Seyitömer İkili Harman Modeli.

Değişken	Değer	İndirgenmiş maliyet
A_{ij}	0,156	0,00
A_{ji}	0,844	0,00
	Aylak ve artık değişkenler	İkil değişkenler
Amaç fonksiyonu	118,94	-1,00
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	70,78	0,00
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	0,00	381,25
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	1,56	0,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	2,44	0,00
Kül değeri kısıt fonksiyonu	1,66	0,00
Amaç Fonksiyonu değeri:	118,94 km	

Tablo 6'da, amaç fonksiyonu yani uzaklık 118,94 km olarak belirlenmiştir. Değer sütunundan, asıl modeldeki değişkenlerin en iyi çözümdeki değerleri $A_{ij}=0,156$ ve $A_{ji}=0,844$ alınmıştır. Bu sonuca göre, Bursa-Orhaneli / Kütahya-Seyitömer ocaklarının harmanında Bursa-Orhaneli ocağından %15,6, Kütahya-Seyitömer ocağından ise %84,4 oranında kömür kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. Aylak ve artık değişkenlere göre, kükürt değeri kısıt fonksiyonunun sıfır olup tam olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda sınır değerler olduğu haliyle karşılanır. Bu yüzden bu kısıta hiçbir artık/aylak değişken eklenmemiştir. Maksimum nem, minimum nem, kalorifik değer ve kül değeri kısıt fonksiyonlarının sınır değerlerini tam olarak karşılayamadığı için kaynakların yüksek miktarda kullanılmadığı açıkça gözlenmektedir. Hazırlanmış olan harmanın niteliklerine bakıldığında sınır değerlerine kıyasla sonuçların daha uygun olduğu söylenebilmektedir. Kalorifik değer, sınır değerine bakıldığında 70,78 kcal/kg kullanmadığı kaynak bulunmaktadır. İstenen kalorifik değer 2560 kcal/kg'dan büyük olması gerekmektedir ve bu yüzden oluşturulan harmanın kalorifik değeri ise 2630,78 olarak belirlenmiştir. Şayet çözüm ikil değişkenler açısından yorumlarsa, kükürt kısıt fonksiyonundaki sağ taraf sabitinde uzaklık değerinin her azalış ve artışında doğru orantılı olarak 381,25'lik azalış ve artış olacaktır.

Tablo 7. Orhaneli / Seyitömer İkili Harman Modeli Duyarlılık Analizi.

Değişken	Değer	İzin verilebilir artış	İzin verilebilir azalış
A_{ij}	16	122	$-\infty$
A_{ji}	138	$+\infty$	122
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	2560	70,78	$-\infty$
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	2	0,78	0,12
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	36	$+\infty$	1,56
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	32	2,44	$-\infty$
Kül değeri kısıt fonksiyonu	24	$+\infty$	1,66

Tablo 7'ye bakıldığında A_{ij} değişkeni için, uzaklığa olan katkı 16 km olup, istenilirse 122 km artırılıp $-\infty$ 'a dek düşürülebilir. Bu halde A_{ij} 'in uzaklığa olan etkisi $(-\infty, 138]$ aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır. A_{ji} değişkeninde ise bu durum tam tersidir. A_{ji} 'in uzaklığa olan katkı 138 km olup, istenilirse 122 km azaltılıp $+\infty$ 'a dek arttırılabilir. Bu halde A_{ji} 'nin uzaklığa olan etkisi $[16, +\infty)$ aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır. Bu durumda maksimum nem için 1,56 birim, kül değeri için 1,66 birim azalış ve arzu edilen miktarda artış uygulanabilir. Kalorifik değer için 287,78 kcal/kg, minimum nem değeri için 2,44 birim artış ve arzu edilen miktarda azalış uygulanabilir.

Tablo 8. Keles / Tunçbilek İkili Harman Modeli.

Değişken	Değer	İndirgenmiş maliyet
A_{ij}	0,889	0,00
A_{ji}	0,111	0,00
	Aylak ve artık değişkenler	İkil değişkenler
Amaç fonksiyonu	57,77	-1,00
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	287,78	0,00
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	0,22	0,00
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	0,00	1,88
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	4,00	0,00
Kül değeri kısıt fonksiyonu	4,00	0,00
Amaç Fonksiyonu değeri:	57,77 km	

Tablo 8'de, amaç fonksiyonu yani uzaklık 55,77 km olarak belirlenmiştir. Değer sütunundan, asıl modeldeki değişkenlerin en iyi çözümdeki değerleri $A_{ij}=0,889$ ve $A_{ji}=0,111$ alınmıştır. Bu sonuca göre, Bursa-Keles / Kütahya-Tunçbilek ocaklarının harmanında Bursa-Keles ocağından %88,9, Kütahya-Tunçbilek ocağından ise %11,1 oranında kömür kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. Aylak ve artık değişkenlere göre, maksimum nem değeri kısıt fonksiyonunun sıfır olup tam olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda sınır değerler olduğu haliyle karşılanır. Bu yüzden bu kısıta hiçbir artık/aylak değişken eklenmemiştir. Minimum nem, kükürt, kalorifik değer ve kül değeri kısıt fonksiyonlarının sınır değerlerini tam olarak karşılayamadığı için kaynakların yüksek miktarda kullanılmadığı açıkça gözlenmektedir. Hazırlanmış olan harmanın niteliklerine bakıldığında sınır değerlerine kıyasla sonuçların daha uygun olduğu söylenebilmektedir. Kalorifik değer, sınır değerine bakıldığında 287,78 kcal/kg kullanmadığı kaynak bulunmaktadır. İstenen kalorifik değer 2560 kcal/kg'dan büyük olması gerekmektedir ve bu yüzden oluşturulan harmanın kalorifik değeri ise 2847,78 olarak belirlenmiştir. Şayet çözüm ikil değişkenler açısından yorumlanırsa, maksimum nem kısıt fonksiyonundaki sağ taraf sabitinde uzaklık değerinin her azalış ve artışında doğru orantılı olarak 1,88'lik azalış ve artış olacaktır.

Tablo 9. Keles / Tunçbilek İkili Harman Modeli Duyarlılık Analizi.

Değişken	Değer	İzin verilebilir artış	İzin verilebilir azalış
A_{ij}	54	34	$-\infty$
A_{ji}	88	$+\infty$	34
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	2560	287,78	$-\infty$
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	2	$+\infty$	0,22
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	36	2,00	4,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	32	4,00	$-\infty$
Kül değeri kısıt fonksiyonu	24	$+\infty$	4,00

Tablo 9'a bakıldığında A_{ij} değişkeni için, uzaklığa olan katkı 54 km olup, istenilirse 34 km artırılıp $-\infty$ 'a dek düşürülebilir. Bu halde A_{ij} 'in uzaklığa olan etkisi $(-\infty, 88]$ aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun

çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır. A_{ij} değişkeninde ise bu durum tam tersidir. A_{ij} 'nin uzaklığa olan katkı 88 km olup, istenilirse 34 km azaltılıp $+\infty$ 'a dek arttırılabilir. Bu halde A_{ij} 'nin uzaklığa olan etkisi $[16,+\infty)$ aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır. Bu durumda kükürt değeri için 0,22 birim, kül değeri için 4,00 birim azalış ve arzu edilen miktarda artış uygulanabilir. Kalorifik değeri için 287,78 kcal/kg, minimum nem değeri için 4,00 birim artış ve arzu edilen miktarda azalış uygulanabilir.

Tablo 10. Tunçbilek / Seyitömer İkili Harman Modeli.

Değişken	Değer	İndirgenmiş maliyet
A_{ij}	0,75	0,00
A_{ji}	0,25	0,00
	Aylak ve artık değişkenler	İkil değişkenler
Amaç fonksiyonu	125,50	-1,00
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	202,25	0,00
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	0,205	0,00
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	4,00	0,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	0,00	-3,125
Kül değeri kısıt fonksiyonu	0,25	0,00
Amaç Fonksiyonu değeri:	125,50 km	

Tablo 10'da, amaç fonksiyonu yani uzaklık 125,50 km olarak belirlenmiştir. Değer sütunundan, asıl modeldeki değişkenlerin en iyi çözümdeki değerleri $A_{ij}=0,75$ ve $A_{ji}=0,25$ alınmıştır. Bu sonuca göre, Kütahya-Tunçbilek / Kütahya-Seyitömer ocaklarının harmanında Kütahya-Tunçbilek ocağından %75, Kütahya-Seyitömer ocağından ise %25 oranında kömür kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. Aylak ve artık değişkenlere göre, minimum nem değeri kısıt fonksiyonunun sıfır olup tam olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda sınır değerler olduğu haliyle karşılanır. Bu yüzden bu kısıta hiçbir artık/aylak değişken eklenmemiştir. Maksimum nem, kükürt, kalorifik değeri ve kül değeri kısıt fonksiyonlarının sınır değerlerini tam olarak karşılayamadığı için kaynakların yüksek miktarda kullanılmadığı açıkça gözlenmektedir. Hazırlanmış olan harmanın niteliklerine bakıldığında sınır değerlerine kıyasla sonuçların daha uygun olduğu söylenebilmektedir. Kalorifik değeri, sınır değerine bakıldığında 202,25 kcal/kg kullanmadığı kaynak bulunmaktadır. İstenen kalorifik değeri 2560 kcal/kg'dan büyük olması gerekmektedir ve bu yüzden oluşturulan harmanın kalorifik değeri ise 2762,25 olarak belirlenmiştir. Şayet çözüm ikil değişkenler açısından yorumlanırsa, kükürt kısıt fonksiyonundaki sağ taraf sabitinde uzaklık değerinin her azalışında 3,125'lik azalış olacaktır.

Tablo 11. Tunçbilek / Seyitömer İkili Harman Modeli Duyarlılık Analizi.

Değişken	Değer	İzin verilebilir artış	İzin verilebilir azalış
A_{ij}	138	$+\infty$	50
A_{ji}	88	50	$-\infty$
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	2560	202,25	$-\infty$
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	2	$+\infty$	0,205
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	36	$+\infty$	4,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	32	0,80	12,00
Kül değeri kısıt fonksiyonu	24	$+\infty$	0,25

Tablo 11'e bakıldığında A_{ij} değişkeni için, uzaklığa olan katkı 138 km olup, istenilirse 50 km azaltılıp $+\infty$ 'a dek arttırılabilir. Bu halde A_{ij} 'nin uzaklığa olan etkisi $[88,+\infty)$ aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır. A_{ji} değişkeninde ise bu durum tam tersidir. A_{ji} 'nin uzaklığa olan katkı 88 km olup, istenilirse 50 km arttırılıp $-\infty$ 'a dek azaltılabilir. Bu halde A_{ji} 'nin uzaklığa olan

etkisi($-\infty,138]$ aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır. Bu durumda maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu sınır değeri 4,00 birim, kükürt değeri için 0,205 birim, kül değeri için 0,25 birim azalış ve arzu edilen miktarda artış uygulanabilir. Kalorifik değer için 202,25 kcal/kg artış ve arzu edilen miktarda azalış uygulanabilir. Minimum nem değeri için 0,80 birim artış 12,00 birim azalış uygulanabilir.

3.2. Üçlü harmanlama modelleri

Orhaneli, Keles ve Tunçbilek havzalarından üretilen kömürler ile yapılan üçlü karışıma ait sonuçlar Tablo 12’de ve bu sonuçlara göre yapılan duyarlılık analizi Tablo 13’de, Orhaneli, Seyitömer ve Tunçbilek havzalarından üretilen kömürler ile yapılan üçlü karışıma ait sonuçlar ise Tablo 14’de ve bu sonuçlara göre yapılan duyarlılık analizi ise Tablo 15’de verilmiştir. Orhaneli, Keles, Seyitömer ve Keles, Seyitömer, Tunçbilek üçlü harmanlarında ise sınır değerler sağlanamadığı için optimum çözüm bulunamamıştır.

Tablo 12. Orhaneli / Keles / Tunçbilek Üçlü Harman Modeli.

Değişken	Değer	İndirgenmiş maliyet
A_{ijk}	0,43	0,00
A_{jik}	0,52	0,00
A_{kij}	0,05	0,00
	Aylak ve artık değişkenler	İkil değişkenler
Amaç fonksiyonu	39,3	-1,00
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	835,3	0,00
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	0,00	78,78
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	4,00	0,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	0,00	-0,34
Kül değeri kısıt fonksiyonu	9,14	0,00
Amaç Fonksiyonu değeri:	39,3 km	

Tablo 13. Orhaneli / Keles / Tunçbilek Üçlü Harman Modeli Duyarlılık Analizi.

Değişken	Değer	İzin verilebilir artış	İzin verilebilir azalış
A_{ijk}	16	9,33	$-\infty$
A_{jik}	54	$+\infty$	5,06
A_{kij}	88	11,07	91,00
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	2560	835,3	$-\infty$
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	2	0,55	0,33
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	36	$+\infty$	4,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	32	1,53	7,72
Kül değeri kısıt fonksiyonu	24	$+\infty$	9,14

Tablo 12’de, amaç fonksiyonu yani uzaklık 39,3 km olarak belirlenmiştir. Değer sütunundan, asıl modeldeki değişkenlerin en iyi çözümdeki değerleri $A_{ijk}=0,43$, $A_{jik}=0,52$ ve $A_{kij}=0,05$ alınmıştır. Bu sonuca göre, Bursa-Orhaneli / Bursa-Keles / Kütahya-Tunçbilek ocaklarının harmanında Bursa-Orhaneli ocağından %43, Bursa-Keles %52 ve Kütahya-Tunçbilek ocağından %5 oranında kömür kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. Aylak ve artık değişkenlere göre, kükürt ve minimum nem değeri kısıt fonksiyonunun sızır olup tam olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda sınır değerler olduğu haliyle karşılanır. Bu yüzden bu kısıta hiçbir artık/aylak değişken eklenmemiştir. Maksimum nem, kalorifik değer ve kül değeri kısıt fonksiyonlarının sınır değerlerini tam olarak karşılayamadığı için kaynakların yüksek miktarda kullanılmadığı açıkça gözlenmektedir. Hazırlanmış olan harmanın niteliklerine bakıldığında sınır değerlerine kıyasla sonuçların daha uygun olduğu söylenebilmektedir.

Tablo 13'e bakıldığında A_{ij} değişkeni için, uzaklığa olan katkı 16 km olup, istenilirse 9,33 km artırılıp $-\infty$ 'a dek düşürülebilir. Bu halde A_{ij} 'in uzaklığa olan etkisi $(-\infty, 54]$ aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır. A_{ji} değişkeninde ise bu durum tam tersidir. A_{ji} 'in uzaklığa olan katkı 54 km olup, istenilirse 5,06 km azaltılıp $+\infty$ 'a dek arttırılabilir. Bu halde A_{ji} 'nin uzaklığa olan etkisi $[16, +\infty)$ aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır. A_{kij} 'nin amaç fonksiyonu katkısı 88'dir. Bu değer 11,07 birim artırılıp, 91 birim azaltılabilir. Bu durumda maksimum nem 4,00 birim, kül değeri için 9,14 birim azalış ve arzu edilen miktarda artış uygulanabilir. Kalorifik değer için 835,3 kcal/kg, artış ve arzu edilen miktarda azalış uygulanabilir. Minimum nem değeri için 1,53 birim artış 7,72 birim azalış, kükürt değeri kısıt fonksiyonu sınır değeri 0,55 birim artış 0,33 birim azalış uygulanabilir.

Tablo 14. Orhaneli / Seyitömer / Tunçbilek Üçlü Harman Modeli.

Değişken	Değer	İndirgenmiş maliyet
A_{ijk}	0,29	0,00
A_{jik}	0,64	0,00
A_{kij}	0,07	0,00
	Aylak ve artık değişkenler	İkil değişkenler
Amaç fonksiyonu	99,2	-1,00
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	429,96	0,00
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	0,00	128,3
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	4,00	0,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	0,00	-8,1
Kül değeri kısıt fonksiyonu	4,27	0,00
Amaç Fonksiyonu değeri:	99,2 km	

Tablo 15. Orhaneli / Seyitömer / Tunçbilek Üçlü Harman Modeli Duyarlılık Analizi.

Değişken	Değer	İzin verilebilir artış	İzin verilebilir azalış
A_{ijk}	16	90,7	$-\infty$
A_{jik}	138	$+\infty$	97,5
A_{kij}	88	286,4	145,2
Kalorifik değer kısıt fonksiyonu	2560	429,96	$-\infty$
Kükürt değeri kısıt fonksiyonu	2	0,08	0,20
Maksimum nem değeri kısıt fonksiyonu	36	$+\infty$	4,00
Minimum nem değeri kısıt fonksiyonu	32	2,44	7,72
Kül değeri kısıt fonksiyonu	24	$+\infty$	4,27

Tablo 14'de, amaç fonksiyonu yani uzaklık 99,2 km olarak belirlenmiştir. Değer sütunundan, asıl modeldeki değişkenlerin en iyi çözümdeki değerleri $A_{ijk}=0,29$, $A_{jik}=0,64$ ve $A_{kij}=0,07$ alınmıştır. Bu sonuca göre, Bursa-Orhaneli / Kütahya-Seyitömer / Kütahya-Tunçbilek ocaklarının harmanında Bursa-Orhaneli ocağından %29, Kütahya-Seyitömer %64 ve Kütahya-Tunçbilek ocağından %7 oranında kömür kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. Aylak ve artık değişkenlere göre, kükürt ve minimum nem değeri kısıt fonksiyonunun sıfır olup tam olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda sınır değerler olduğu haliyle karşılanır. Bu yüzden bu kısıta hiçbir artık/aylak değişken eklenmemiştir. Maksimum nem, kalorifik değer ve kül değeri kısıt fonksiyonlarının sınır değerlerini tam olarak karşılayamadığı için kaynakların yüksek miktarda kullanılmadığı açıkça gözlenmektedir. Hazırlanmış olan harmanın niteliklerine bakıldığında sınır değerlerine kıyasla sonuçların daha uygun olduğu söylenebilmektedir.

Tablo 15'e bakıldığında A_{ij} değişkeni için, uzaklığa olan katkı 16 km olup, istenilirse 90,7 km artırılıp $-\infty$ 'a dek düşürülebilir. Bu halde A_{ij} 'in uzaklığa olan etkisi $(-\infty, 138]$ aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır. A_{ji} değişkeninde ise bu durum tam tersidir. A_{ji} 'in uzaklığa olan katkı 138 km olup, istenilirse 97,5 km azaltılıp $+\infty$ 'a dek arttırılabilir. Bu halde A_{ji} 'nin uzaklığa olan etkisi $[16, +\infty)$ aralığındadır ve bu aralıktaki tüm değerlerde en uygun çözüm grubu ve bu gruplara karşılık gelen değerler aynı kalacaktır. A_{kij} 'nin amaç fonksiyonu katkısı 88'dir. Bu değer 286,4 birim arttırılıp, 145,2 birim azaltılabilir. Bu durumda maksimum nem 4,00 birim, kül değeri için 4,27 birim azalış ve arzu edilen miktarda artış uygulanabilir. Kalorifik değer için 429,96 kcal/kg, artış ve arzu edilen miktarda azalış uygulanabilir. Minimum nem değeri için 2,44 birim artış 7,72 birim azalış, kükürt değeri kısıt fonksiyonu sınır değeri 0,08 birim artış 0,20 birim azalış uygulanabilir.

Doğrusal programlama ile oluşturulan ve çözümlenen tüm harman grupları Tablo 16'da özetlenmiştir. Tablo 16'da verilen harman gruplarının maliyetleri modellerin çözümlenmesi sonucu bulunan amaç fonksiyonu değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 16. Harmanlama Sonuçları.

Harmalama Modeli	Oran (%)	Maliyet (TL/ton)*	Kalorifik Değer
Orhaneli / Keles	37,2 / 62,8	11,68	3249,72
Orhaneli / Seyitömer	15,6 / 84,4	34,82	2630,78
Keles / Tunçbilek	88,9 / 11,1	16,93	2847,78
Tunçbilek / Seyitömer	75 / 25	29,45	2762,25
Orhaneli / Keles / Tunçbilek	43 / 52 / 5	11,54	3395,30
Orhaneli / Seyitömer / Tunçbilek	29 / 64 / 7	29,04	2989,96

*Not: Maliyet hesaplamalarında; üretim maliyetlerinin dört kömür ocağında da eşit olduğu, Her ocak için kapasitesi 30 ton olan kamyon kullanıldığı, Kamyonun yakıt tüketiminin 20 L/100km olduğu ve motorin fiyatının ise ~44 TL olduğu kabul edilmiştir.

4. Sonuç

Enerji maliyeti, kaynakların sürdürülebilir kullanımı ve ürün kalitesinin sağlanması termik santraller açısından büyük bir sorundur. Çünkü termik santraller dünyadaki en büyük elektrik üreten tesislerinden biridir. Bu nedenle enerji sektöründe hammadde/kaynak tüketimi optimizasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, dört farklı ocağın üretilen kömür malzemesi, uygun kalitede bir ürün oluşturabilmek için doğrusal programlama kullanılarak harmanlanmıştır. Harmanlama problemi doğrusal bir optimizasyonla formüle edilmiştir. Amaç fonksiyonu toplam maliyetleri ve dolayısıyla hammadde tüketimini en aza indirecek şekilde belirlenmiştir. Kömür için termik santralde kullanılması uygun sınır değerler ise modelde kısıtlar olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak farklı kimyasal ve ısıl özelliklere sahip kömürler harmanlama optimizasyonu ile termik santrallerde kullanılabilir duruma getirilmiştir. Buna göre toplam 6 farklı harman grubu belirlenmiştir. Bunlar;

- Orhaneli / Keles ocaklarının harmanlaması yapılmış ve Orhaneli ocağının %37,2 oranında, Keles ocağından ise %62,8 oranında, kullanılması gerektiğine karar verilmiştir. Bu harmanlamanın toplam nakliye maliyeti 11,68 TL/ton olarak bulunmuştur.
- Orhaneli / Seyitömer ocaklarının harmanında Orhaneli ocağından %15,6 oranında, Seyitömer ocağından ise %84,4 oranında kullanılmıştır ve toplam nakliye maliyeti 34,82 TL/ton'dur.
- Keles / Tunçbilek ocaklarının harmanında Keles ocağından %88,9 oranında, Tunçbilek ocağından ise %11,1 oranında kullanılarak toplam nakliye maliyeti 16,93 TL/ton bulunmuştur.
- Tunçbilek / Seyitömer ocaklarının harmanında Tunçbilek ocağından %75 oranında, Seyitömer ocağından ise %25 oranında kömür kullanılmıştır ve toplam nakliye maliyeti 29,45 TL/ton'dur.
- Orhaneli / Keles / Tunçbilek ocaklarının harmanında Orhaneli ocağından %43, Keles %52 ve Tunçbilek ocağından %5 oranında kullanılması gerektiğine karar verilmiştir. Bu harmanlamanın toplam nakliye maliyeti 11,54 TL/ton'dur.
- Orhaneli / Seyitömer / Tunçbilek ocaklarının harmanında Orhaneli ocağından %29, Seyitömer %64 ve Tunçbilek ocağından %7 oranında kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır ve toplam nakliye maliyeti 29,04 TL/ton bulunmuştur.

Buna göre; toplam 6 harman grubu içerisinde maliyetler açısından Orhaneli / Keles / Tunçbilek 3'ü harmanı ve Orhaneli / Keles 2'li harmanlarının en düşük maliyet değerleri ve en yüksek kalorifik değerleri verdiği görülmektedir. Verilen oranların harmanlanması kömür ocaklarında geçerlidir. Ancak kaynakların sürdürülebilir kullanımı açısından harmanlama modelindeki sınır değerler değiştirilerek farklı harman grupları ve oranları oluşturulabilmektedir. Ayrıca kömür ocaklarında karşılaşılabilecek farklı üretim parametreleri de kolaylıkla harmanlama modeline uyarlanabilmektedir. Geliştirilen modelin tüm kömür ocaklarında kolay bir şekilde kullanılabilmesi ve böylece mühendislere ve araştırmacılara büyük faydalar sağlayacağı düşünülmektedir. Günümüzde kaynakların verimli kullanımı ve sürdürülebilir üretim, üretim kalitesinin devamlılığını sağlayacak harmanlama politikalarının geliştirilmesi ile ilişkilidir. Bu çalışmada önerilen modellerin uygulanabilirliği açısından daha çok sayıda ve farklı saha özelliklerine sahip sahalarda deneyerek güvenilirliği artırılmalıdır. Ayrıca harmanlama modeli içerisinde söz konusu olan subjektif ya da sayısal olarak ifade edilemeyen parametrelerin de hesaba katılabilmesi için bulanık mantık gibi sezgisel yöntemlerin de kullanımının araştırılması gerekmektedir.

Kaynaklar

- [1] Miller BG. Coal Energy Systems, Elsevier Academic Press, 2005, ISBN: 0-12-497451-1.
- [2] Rahman R. Widodo S. Azikin B and Tahir D. Chemical Composition And Physical Characteristics Of Coal And Mangrove Wood As Alternative Fuel, Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1341 (5).
- [3] Prabowo H and Prengki I. Decreasing The Ash Coal And Sulfur Contents Of Sawahlunto Subbituminous Coal By Using "Minyak Jelantah", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 413 (1).
- [4] Unsworth JF, Fowler CS, Heard NA, Weldon VL, McBrierty VJ. Moisture in Coal: 1. Differentiation Between Forms Of Moisture By N.M.R. And Microwave Attenuation Techniques, 1988, 67(8), 1111–1119.
- [5] Casagrande D and Siefert K. Origins of Sulfur in Coal: Importance of the Ester Sulfate Content of Peat, Science, 1977, Vol 195, Issue 4279, 675-676.
- [6] Chen-Lin C. Sulfur in Coals: A Review Of Geochemistry And Origins, International Journal Of Coal Geology, 2012, Vol 100, 1-13.
- [7] Sarkar DK. Thermal Power Plant Design and Operation, Chapter 3 - Fuels and Combustion, 2015, 91-137.
- [8] Delibalta MS. Türkiye'de Fosil Enerji Kaynakları ve Yeni Nesil Termik Santrallerin Önemi, Uluslararası Enerji, Ekonomi ve Güvenlik Kongresi-ENSCON'18, 2018, ISBN: 978-605-81728-2-1, s.22-34, 21-22 Nisan, Kozyatağı/ İstanbul-Türkiye.
- [9] Adiguzel D. Optimisation of Pre-Blending Process for Raw Materials in Quarrying, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2020, 34(7), 519-530.
- [10] Yuan Y, Qu Q, Chen L, Wu M. Modeling and Optimization of Coal Blending and Coking Costs Using Coal Petrography. Inf Sci, 2020, 522, 49–68.
- [11] Xi-Jin G, Ming C, Jia-Wei W. Coal Blending Optimization of Coal Preparation Production Process Based on Improved GA, Procedia Earth Planet Sci, 2009,1, 654–660.
- [12] Yin C, Luo Z, Zhou J ve Cen K. A Novel Non-Linear Programming –Based Coal Blending Technology For Power Plants, Chemical Engineering Research and Design, 2000, 78(1), 118-124.
- [13] Eleveli B, Uzgören N and Sezgin A. Coal Distribution Optimization by Utilizing Linear Programming, Engineering & Arch Faculty, Eskişehir Osmangazi University, 2007, 10(1).
- [14] Cebeci V. Kömür Gazlaştırma Prosesi Ve Türkiye Kömürlerinde Kömür Özellikleri Açısından Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [15] Emre H. Seyitömer (Kütahya) Kömür Havzasının Isıl Değerlerine Göre Rezerv Hesabı, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, 1999, 12.
- [16] Kazancı C. Tunçbilek (Tavşanlı-Kütahya) Fc Pano Açık İşletme Sahası Kömürlerinin Organik Fasiyes Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [17] Şengüler İ. Güney Marmara Bölgesi Kömürleri, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 2004, 28(2), 31-38.
- [18] Karaçanta C. Termik Santrallerde Kullanılan Kömürlerin Mineral Madde İçeriğindeki İz Elementlerin Tespiti, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [19] Farghaly MG, Ali M, Kim JG. Optimization of Blending and Production Processes Considering Origin Mines and Metallurgical Units Using Linear Programming Rules, Geosystem Engineering, 2021, 24(3), 115-121.