

Makalenin Geliş Tarihi : 30.12.2009
Makalenin Kabul Tarihi : 16.08.2010

KÖMÜR KALORİSİ DEĞİŞKENLİĞİNİN AZALTILMASINDA PROSES YETERLİLİK ANALİZİ

Özgür AYDIN¹, Fatma PAKDİL², Özlem AYDIN³

ÖZET: Bu çalışmada bir elektrik üretim santralinde aylık üretim maliyetlerinin artış nedenleri ve azaltılması için yapılabilecek çalışmalar incelenmiştir. Termik santralde kazana beslenen kömür kalori değerlerindeki değişkenliğin, maliyeti artıran en önemli faktör olduğu belirlenmiştir. Bu amaçla C_p ve C_{pk} katsayıları ile maliyet artışları arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Değişkenliğin azaltılması amacıyla ek bir kömür zenginleştirme tesisi kurulması önerilmiş ve bu yatırımın ekonomik olarak anlamlı olup olmadığı, oluşturulan bir model ile incelenmiştir. Sonuç olarak bu ek yatırım hem kömür kalorisindeki değişkenliği hem de maliyetleri azaltmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Proses yeterliliği, termik santral, kömür zenginleştirme

PROCESS CAPABILITY ANALYSIS IN REDUCING THE CALORIFIC VALUE VARIATION OF COAL

ABSTRACT: In this study, the causes of variation in monthly production costs in a power plant have been investigated and a solution is proposed. It is determined that the most important cause is the variation of coal calorific values which is feeding to boiler. For this aim, C_p and C_{pk} coefficients have been calculated to determine the suitability of coal calorific values. An additional coal enrichment plant has been proposed to decrease the variation and a model is constructed to indicate whether this investment is effective or not. Consequently, it is determined that this new investment has decreased both coal calorific variation and costs.

KEYWORDS: Process capability, power plant, coal enrichment

^{1,2} Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fak., Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bağlıca Kampüsü, ANKARA.

³ Başkent Üniversitesi, Fen Edebiyat Fak., İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Bölümü, Bağlıca Kampüsü, ANKARA.

I. GİRİŞ

Endüstri Devrimi ile birlikte önem kazanan seri üretim anlayışı sonrasında, 1950'li yıllardan itibaren işletmelerde kalite kavramına büyük önem verilmeye başlanmıştır. Günümüzde birçok işletmede kalite bölümleri yer almakta; birçok kamu ihalesinde, katılım şartı olarak kalite belgeleri gerekliliği giderek yaygınlaşmaktadır. Kalite düşünürleri genel anlamda kaliteyi “müşteri istek, ihtiyaç ve beklentilerini en uygun şekilde karşılamak” biçiminde tanımlamışlardır. Mühendislik bakış açısıyla kalite, ürün veya proseslerdeki değişkenliğin en küçüklenmesi olarak tanımlanır [1]. Üretim prosesinin giderek standartlaşması ve müşteriye özgü olması, üretim prosesinin ve nihai ürünün izlenmesi ve kontrol edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Nihai ürün kalitesinin yükseltilmesi amacıyla toplam kalite yönetimi, sürekli iyileştirme ve 6 sigma gibi felsefi yaklaşımların yanı sıra değişkenliği azaltıcı teknik yöntemlerin de yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir.

Bu çalışmada, elektrik üreten bir termik santralde kullanılan kömürün kalori değerlerinin düşük olması nedeniyle yaşanan üretim maliyeti ve kalite bazlı problemlerin çözümü üzerinde durulmaktadır. Termik santralin kazanına beslenen kömürün kalorisinin tolerans değerlerin dışında olması, elektrik üretimini azaltmaktadır. Bu noktadan hareketle kömür kalorisini bir kalite karakteristiği olarak belirlenmiş, kazana kömür besleme prosesinin yeterlilik (kapabilite) analizi ile elde edilen C_p ve C_{pk} indisleri işletme maliyeti ile ilişkilendirilmiştir. Kalori miktarlarındaki değişkenliğin azaltılması için kömür zenginleştirme tesisinin en etkili çözüm olduğu belirlenmiştir. Bu değişkenliğin yarattığı maliyet ile değişkenliği azaltacak kömür zenginleştirme tesisinin kurulum ve işletme maliyetleri arasında fayda/maliyet analizi bazında ekonomik bir model karşılaştırması yapılmıştır. Bu çalışmada kömür zenginleştirme tesisinin, kalori değerlerindeki değişkenliği ve toplam maliyeti azalttığı gösterilmektedir.

II. PROBLEM ÇÖZÜM SÜRECİ

Kaoru Ishikawa kalite bazlı bir problemin çözümü için izlenecek iş akışı ve her bir proseste kullanılacak araçlar üzerinde durmuştur [2]. Diğer kalite düşünürlerinin de katkıları sonucu, bir kalite probleminin çözümü için öncelikle detaylı olarak problemin analiz edilmesi ve problemi doğuran kök sebeplerin araştırılması gerektiği vurgulanmaktadır. Birçok gerçek hayat

probleminin çözümünde problem tanımından sonra “nedenlerin araştırılması” bölümü ihmal edilip “problemin çözümü” aşamasına geçildiği görülmektedir. Imai nedenleri tespit edilmiş bir problemin %60 oranında çözülmüş olacağını söylemektedir [3]. Problem çözme sürecinde nedenlerin tespitinden sonra çözüm önerilerine geçilmeli ve pilot uygulamalar yapılmalıdır. Bu çalışma kapsamında da sözü edilen problem çözme süreci izlenmektedir.

II.1. Problemin ve Tesisin Tanıtımı

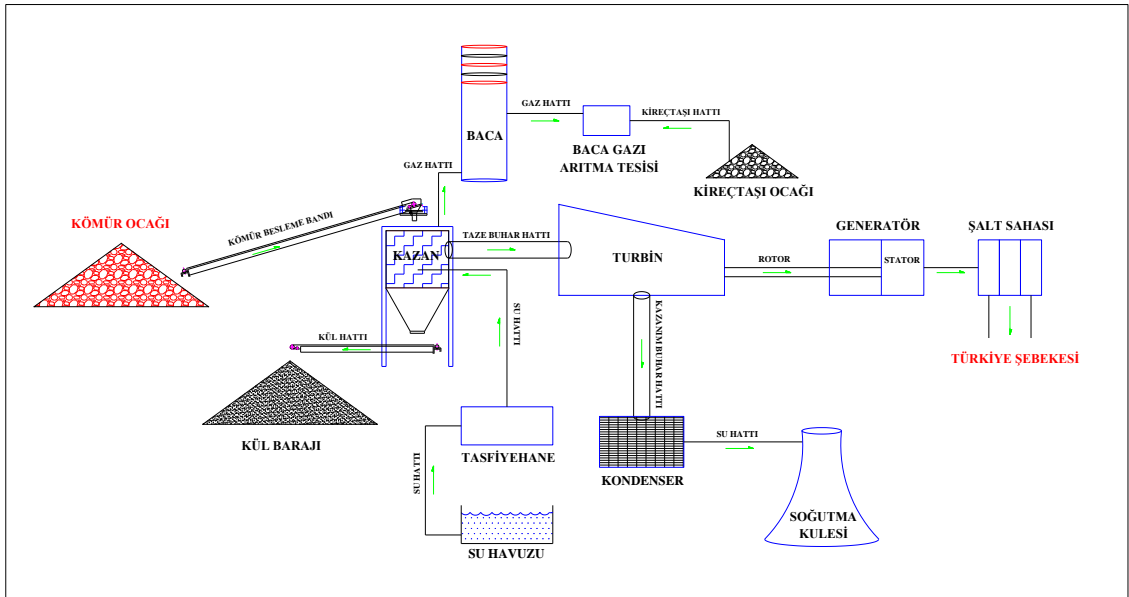
Bu çalışmada ele alınan problem “firmanın üretim maliyetlerinin belirlenen seviye ve tolerans değerlerinin üzerinde olması”dır. Aylık bazda 2004-2008 yılları arasındaki toplam üretim maliyetleri Çizelge 2.1.’de verilmiştir. Aralık aylarında santral revizyona girdiğinden üretim yapılmamaktadır. Aylık bazda hedeflenen üretim maliyeti alt ve üst spesifikasyon değerleri (ASL ve USL) $1.000 \times 10^3 \$ \pm \%20$ olarak verilmektedir. Ancak Çizelge 2.1 incelendiğinde bazı aylarda $1.200 \times 10^3 \$$ üzerinde maliyetler olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.1. 2004-2008 yılları arasında aylık bazda üretim maliyetleri

2004 YILI		2005 YILI		2006 YILI		2007 YILI		2008 YILI	
AY	MALİYET (x10 ³ \$)	AY	MALİYET (x10 ³ \$)	AY	MALİYET (x10 ³ \$)	AY	MALİYET (x10 ³ \$)	AY	MALİYET (x10 ³ \$)
Ocak	2.715	Ocak	1.639	Ocak	2.677	Ocak	2.563	Ocak	2.285
Şubat	2.936	Şubat	1.714	Şubat	1.974	Şubat	3.144	Şubat	3.575
Mart	2.917	Mart	1.804	Mart	2.422	Mart	3.444	Mart	2.277
Nisan	990	Nisan	2.028	Nisan	2.511	Nisan	2.485	Nisan	3.124
Mayıs	2.149	Mayıs	2.613	Mayıs	1.772	Mayıs	1.668	Mayıs	1.934
Haziran	838	Haziran	2.227	Haziran	924	Haziran	962	Haziran	929
Temmuz	831	Temmuz	2.037	Temmuz	1.403	Temmuz	2.170	Temmuz	1.746
Ağustos	2.388	Ağustos	964	Ağustos	979	Ağustos	1.136	Ağustos	1.051
Eylül	1.986	Eylül	2.154	Eylül	2.274	Eylül	2.268	Eylül	1.617
Ekim	2.410	Ekim	1.612	Ekim	1.130	Ekim	2.015	Ekim	3.152
Kasım	3.522	Kasım	1.038	Kasım	2.030	Kasım	3.557	Kasım	2.587

Problemin incelendiği termik santral, devletten işletme hakkı devri ile kiralanan bir tesistir. Termik santral enerjinin korunumu yasasına göre çalışmaktadır ve genel çalışma prensibi Şekil 2.1’de verilmiştir. Şirket bünyesinde yer alan kömür madeninden çıkartılan kömür bantlarla

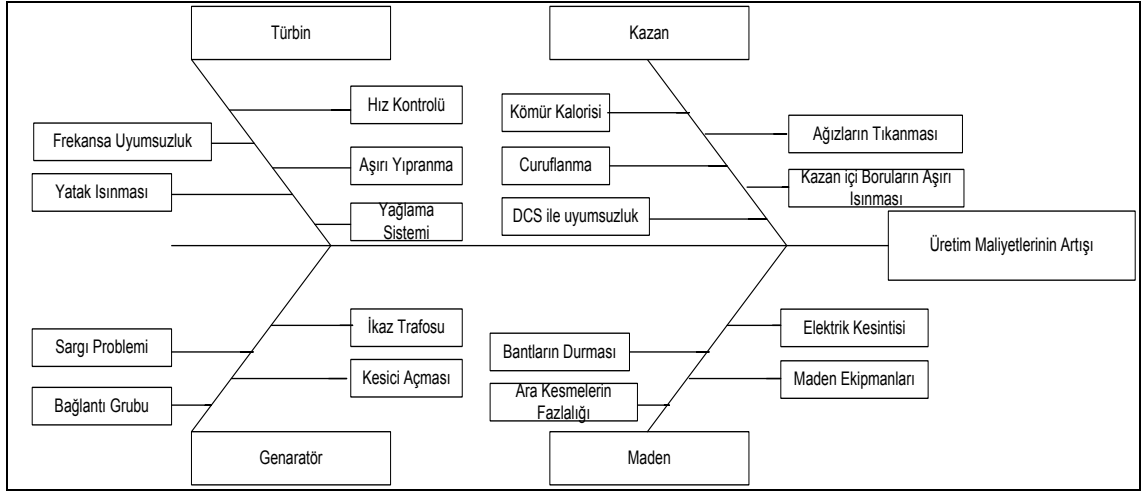
kazana beslenir. Su havuzundan gelen ve tasfiyehanede minerallerinden ayrıştırılan su, kazan içi borulara gönderilir. Kömür ile yanan kazanın iç ısısı sayesinde buhara dönüşen su, türbini çevirir ve türbine bağlı bulunan rotorun hareketi ile generatörde elektrik üretilir. Üretilen elektrik şalt sahasında gerekli gerilime yükseltilip Türkiye şebekesine gönderilir. Bu arada yanma sonucu oluşan kül, kazan altında yer alan kül silosundan alınarak kül barajına sevk edilir. Kazandan çıkan zehirli gazlar ise kireçtaşı ile baca gazı arıtma tesisinde arıtılır. Türbini çeviren buhar ise kondenser soğutma kulesi kapalı çevrimi sayesinde geri kazanılıp tekrar su havuzuna gönderilir. Her ayın sonunda şalt sahası çıkışında bulunan sayaçlardan değerler okunmakta ve üretilen elektriğin Kwh'i başına cent olarak devletten ödeme alınmaktadır. Bu nedenle, üretim maliyetlerine göre verilen elektrik satış fiyatı üzerinden kâr elde edilebilmesi, büyük oranda fiili üretim maliyetlerinin fizibilitede öngörülen değerlere yaklaşması ile mümkündür. Diğer bir deyişle, firmanın kâr edebilmesinin tek koşulu maliyetleri azaltmaktır.



Şekil 2.1. Termik Santral Üretim Akış Şeması

II.2. Problemin Nedenlerinin Araştırılması

Problem çözme sürecinde, sorunun belirlenmesinin ardından problemi doğuran kök sebeplerin araştırılması üzerinde durulmalıdır. Termik santral bünyesinde yer alan teknik personelin katıldığı beyin fırtınası oturumları sonucunda probleme ilişkin sebepler tespit edilmiştir. Bu sebepler Şekil 2.2'deki neden-sonuç diyagramında verilmiştir.



Şekil 2.2. Neden-Sonuç Diyagramı

Şekil 2.2'ye göre problemin ana sebepleri dört gruba ayrılmaktadır. Bunlar; türbin, kazan, generatör ve madendir. Her grup ayrı olarak incelenecek olursa; türbin bazlı alt problem, santralin aşırı yüklenmesi durumunda türbinin hızının kontrol edilememesinden kaynaklanmaktadır. Ancak türbin bu sebepten devreden çıkmamaktadır. Kazan alt probleminde; kazanın sıklıkla devreden çıkması tamir bakım masraflarını arttırmaktadır. Kazanın devreden çıkma sebebinin kazana beslenen kömür kalorisinin uygunsuz olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Generatörde ise, elektrik üretimini gerçekleştiren ikaz trafosu sıklıkla çalışmamakta, ancak bu durumlarda yardımcı trafo devreye girmektedir. Maden bölümündeki alt problem ise, ocakta sıklıkla taş vb. çıkması, bunun hem maden kazma ekipmanının yapısını bozması, hem de kömür kalori değerlerinin düşmesi ya da artmasına sebep olmasıdır. Bu alt problemler incelendiğinde türbinin yaşadığı problem, ekipmanın devreden çıkmasına neden

olmadığından öncelikli olarak kabul edilmemiştir. Generatörün ikaz trafosu problemi, yardımcı trafonun varlığı nedeniyle daha sonra değerlendirmeye alınacaktır. Kazanın sorunları incelendiğinde ise kömür kalori değerlerindeki tutarsızlığın ekipmanı devreden çıkardığı görülmektedir. Bu durumda üretim maliyetlerindeki artışa ait asıl problemin kömür kalori değerlerindeki değişkenlik olduğu belirlenmiştir.

II.2.1. Kazana Beslenen Kömürün Kalori Uygunluğunun Tespiti

Santral günde 8'er saatlik 3 vardiya halinde 24 saat çalışmaktadır. Kazana beslenen kömürden her 3 vardiya sonunda örnek alınarak kalori değerleri ölçülmektedir. Kömür kalori değeri ölçüm istasyonu santral içinde yer almakta, yetkili servis elemanlarınca ayda bir kez kontrol edilmekte ve firma tarafından aylık kalibrasyon işlemleri yapılmaktadır. Ölçüm alma sürecinde işgücü ve ölçüm ortamının etkisinin olmaması nedeniyle Ölçüm Sistemi Analizi (Gage R&R) yapılmasına gerek duyulmamış ve ölçüm sisteminin yeterli olduğu varsayılmıştır.

Santralin yapımı aşamasında kazan tasarımı için alınan kömür örneklerinden kömürün ortalama 2.000 kalori olduğu belirlenmiştir. Ancak ocaklarda maden çıkartma esnasında bazı ara kesmeler taş vb. kaloriyi azaltan katmanlara rastlanmaktadır. Bu nedenle kazan imalatçısı spesifikasyon değerlerini 2.000 kalori \pm %10 olarak belirlemiştir. Kazan en yüksek verimini 2.000 kalori kömür ile vermekte, 1.800 (ASL) ile 2.200 (USL) kalori arasında verimli çalışmaktadır.

2004-2008 yılları arasında yapılan gözlemlerde, üretim maliyetleri ile karşılaştırıldığında kömür kalori değerlerinin yüksek değişkenlik gösterdiği aylarda üretim maliyetleri artmaktadır. Bir üretim prosesinin ASL ve USL'ye bağlı kalınarak belirli bir ortalama değerde tutulmaya çalışılması klasik bir proses yeterliliği uygulamasıdır. Bu çalışmada da ASL ve USL değerlerinin belirli olması nedeniyle, kömür kalori değerlerindeki değişimin maliyete etkisini görmek amacıyla proses yeterliliği analizi yapılmıştır. Benzer bir çalışmada bir endüstri tesisinin çevresel emisyonlara uygunluğu için proses yeterliliği çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada emisyon limitleri ile ilgilenildiği için sadece USL kullanılmıştır [4]. Ayrıca kömür kalitesi ve istatistik kalite kontrol uygulamalarını içeren sınırlı sayıda çalışmaya da literatürde rastlanmaktadır [5-7].

II.2.2. Proses Yeterliliği Analizi

İstatistiksel kalite kontrol, ürün çevriminin imalata öncelik veren aktivitelerinin geliştirilmesi, değişkenliğin ölçülmesi, bu değişkenliğin ürün ihtiyaçları veya spesifikasyonlara uygunluğunun analizi de dahil olmak üzere değişkenliğin azaltılmasında önemli rol oynamaktadırlar [1]. Bu aşamada proses yeterlilik analizi, prosese ait ölçülebilir bir kalite karakteristiğinin belirlenen hedef değer, ASL ve USL'ye göre nasıl bir merkezlenme ve saçılım gösterdiğini inceler. Yeterlilik analizi prosesteki değişkenliği ölçtüğü gibi, prosesin müşteri isteklerine ne derece uyum gösterdiğini de ölçmektedir [1, 8]. Bu aşamada dikkate alınan değerler C_p ve C_{pk} indisleridir. C_p indisi, şartname limitleri ile proses kontrol limitleri arasındaki ilişkiyi gösterir ve Eşitlik 1'deki gibi hesaplanır;

$$C_p = \frac{USL - ASL}{6\sigma} \quad [1]$$

Prosesin standart sapmasının bilinmediği durumlarda standart sapma,

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad \text{veya} \quad \hat{\sigma} = \frac{\bar{S}}{c_4} \quad [2]$$

eşitliği ile tahmin edilir. Burada \bar{R} her bir gün içerisinde alınan örneklere ait en yüksek ve en düşük değerler arasındaki farkların aylık ortalaması, \bar{S} her bir gün içerisinde alınan örneklere ait standart sapmaların ortalaması c_4 ve d_2 ise örneklem sayısına göre değişen 3σ Limit Katsayı Tablosu [8] sabitidir. Eşitlik 1'deki C_p indisi, $\hat{\sigma}$ ile hesaplandığında \hat{C}_p şekline dönüşür [1, 8]. C_{pk} indisi ise, proses ortalamasının hedef değere göre konumunu ve spesifikasyon limitleri arasındaki konumunu göstermektedir. C_{pk} indisi Eşitlik 3'teki gibi hesaplanır.

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right) \quad [3]$$

Eşitlik 3'de μ proses ortalaması olup, bilinmediği durumlarda $\bar{\bar{X}}$ ile tahmin edilir. $\bar{\bar{X}}$, bu çalışmada günlük alınan 3 örneğin ortalamalarının ay sonundaki ortalaması olarak ifade edilebilir.

Proses yeterlilik analizinde geçerli olan varsayımlardan biri prosesin istatistiki olarak kontrol altında olmasıdır. Bu aşamada yaygın olarak kontrol grafikleri kullanılmaktadır. Kalite karakteristiğinin ölçülebilir değişken olarak tanımlanabildiği durumlarda bu karakteristiğin ortalaması ve değişkenliği sürekli olarak kontrol edilmelidir. Proses ortalaması \bar{X} kontrol grafiği, proses değişkenliği ise standart sapmayı temsilen S kontrol grafiği veya R kontrol grafiği ile kontrol edilir [1, 8]. Bu çalışmada \bar{X} ve örneklem büyüklüğü küçük olduğu için R kontrol grafikleri kullanılmıştır.

Proses yeterlilik analizi çalışmalarında proses ortalamasının merkezlenme koşulu ile ilgili olarak C_{pm} indisinin hesaplanması gerekmektedir. C_{pm} indisi,

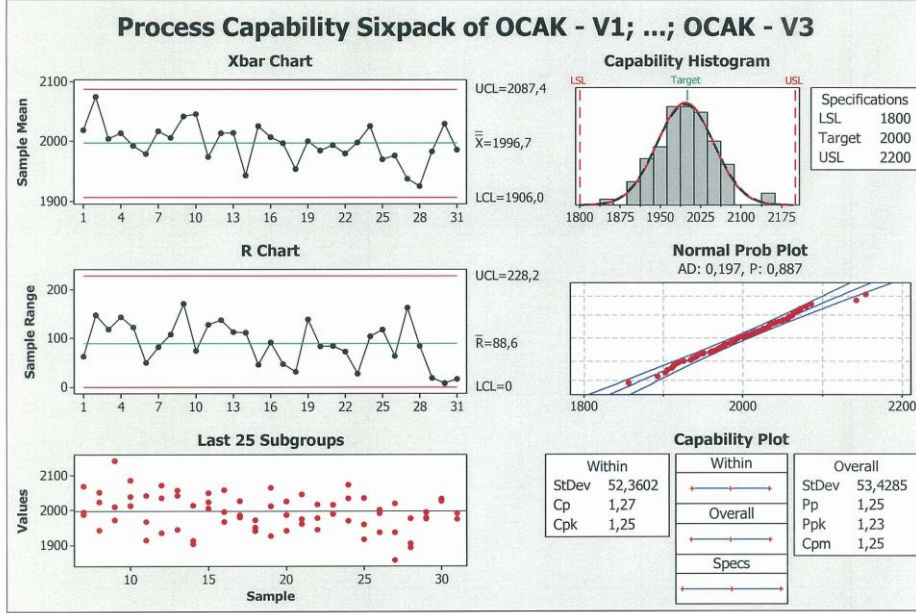
$$T = \frac{USL + ASL}{2} \quad \text{ve} \quad \xi^2 = \frac{\mu - T}{\sigma} \quad \text{olmak üzere,}$$

$$C_{pm} = \frac{C_p}{\sqrt{1 + \xi^2}} \quad [4]$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır Burada $C_{pm} \geq 1$ olması durumunda proses ortalaması merkezlenmiştir [1].

2004-2008 yılı verileri için 0,05 anlamlılık düzeyinde $USL=2.200$, $ASL=1.800$ ve hedef değer 2.000 kalori olmak üzere Minitab 15 Paket Programı kullanılarak proses yeterliliği analizi yapılmıştır. Yeterlilik analizi sonuçlarına göre \bar{X} ve R kontrol grafikleri incelendiğinde prosesin istatistiksel olarak kontrol altında olduğu görülmektedir. Normal dağılım grafiği ve AD (Anderson-Darling) katsayısı incelendiğinde, AD katsayısının kritik değer olan 0,752 değerinden küçük çıkması veya p değerinin kritik $\alpha=0,05$ değerinden büyük çıkması verilerin normal dağıldığını göstermektedir. Örneğin, Ocak 2004 için elde edilen sonuçlara göre, C_{pm} indisi 1,25 olarak hesaplanmıştır. Bu değer 1'den büyük olması proses ortalamasının merkezlendiği anlamına gelmektedir. Bu sonuçlara göre yapılan proses yeterliliği analizi 0,05

düzeyinde anlamlıdır. Hesaplanan C_p ve C_{pk} değerleri 1,27 ve 1,25'dir ve proses marjinal yeterlidir. Ocak 2004 ayına ilişkin sonuçlar Şekil 2.3' te ve elde edilen toplu sonuçlar EK-A'da verilmiştir.



Şekil 2.3. Ocak 2004 İçin Kontrol Grafikleri ve Yeterlilik Analizi Sonuçları

Tüm yıllara ait gözlemlerde verilerin normal dağıldığı görülmektedir. Örneğin, 2004 yılı incelendiğinde Nisan ve Temmuz aylarında proses istatistiksel olarak kontrol dışındadır ve bu ayların C_p ve C_{pk} değerleri anlamlı değildir. Burada temel sorun, maliyetin oldukça yüksek olduğu özellikle Şubat, Mart, Ekim ve Kasım'da C_p , C_{pk} ve C_{pm} indislerinin 1'den küçük çıkmasıdır. Dolayısı ile bu aylarda proses ortalaması kaymış, proses spesifikasyonları karşılamada ciddi sorunlar yaşanmıştır. Bu durumun maliyetleri artırma olasılığı yüksektir. Benzer durum, diğer yıllarda da görülmektedir (EK-A).

Proses kontrol altında olmadığına parametreler durağan değildir ve bu değerlerin gelecekte alacağı değerler tahmin edilemez. Bu nedenle verilere proses yeterliliği analizi uygulamak anlamlı değildir. Dolayısı ile istatistiksel olarak kontrol altında olmayan süreçler analizlere dahil edilmemektedir. Maliyetin yüksek olduğu aylarda, proses ortalamasının merkezlenmediği görülmektedir. Bu durumda C_{pk} indisi önem kazanmaktadır [1].

II.2.3. Maliyetler İle C_{pk} İndisinin İlişkilendirilmesi

Bu aşamada maliyetler ile C_{pk} indisi arasında bir ilişki bulunup bulunmadığının belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için öncelikle veriler gruplanarak kendi içlerinde karşılaştırılacaktır. Bu bölümde, C_{pk} indisi için 1,33 baz alınmış, C_{pk} 1,33'den yüksek ise proses "Yeterli", 1 ile 1,33 arasında ise proses "Kabul", 1'den küçük ise proses "Yetersiz" olarak tanımlanmıştır [1, 8]. Gruplanan veriler için hesaplanan C_{pk} ve maliyet değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. C_{pk} ve Maliyet Değerleri

Yeterli Olarak Adlandırılan Aylar			Kabul Olarak Adlandırılan Aylar			Yetersiz Olarak Adlandırılan Aylar		
Ay	C_{pk}	Maliyet (x10 ³ \$)	Ay	C_{pk}	Maliyet (x10 ³ \$)	Ay	C_{pk}	Maliyet (x10 ³ \$)
Haz 04	2,06	838	Oca 04	1,25	2.715	Şub 04	0,85	2.936
Ağu 05	1,35	964	May 04	1,09	2.149	Mar 04	0,84	2.917
Kas 05	2,47	1.038	Ağu 04	1,27	2.388	Eki 04	0,83	2.410
Haz 06	2,26	924	Eyl 04	1,18	1.986	Kas 04	0,75	3.522
Ağu 06	1,93	979	Oca 05	1,05	1.639	May 05	0,92	2.613
Eki 06	2,29	1.130	Mar 05	1,05	1.804	Haz 05	0,87	2.227
Ağu 07	2,61	1.136	Nis 05	1,13	2.028	Oca 06	0,73	2.677
Haz 08	2,29	929	Tem 05	1,03	2.037	Mar 06	0,40	2.422
Ağu 08	1,94	1.051	Eyl 05	1,16	2.154	Nis 06	0,45	2.511
			Eki 05	1,06	1.612	Şub 07	0,93	3.144
			Şub 06	1,10	1.974	Mar 07	0,57	3.444
			May 06	1,23	1.772	Nis 07	0,56	2.485
			Tem 06	1,32	1.403	Şub 08	0,53	3.575
			Eyl 06	1,11	2.274	Mar 08	0,96	2.277
			Oca 07	1,00	2.563	Nis 08	0,86	3.124
			May 07	1,04	1.668	Eki 08	0,44	3.152
			Eyl 07	1,24	2.268	Kas 08	0,98	2.587
			Eki 07	1,29	2.015			
			May 08	1,18	1.934			
			Tem 08	1,24	1.746			
			Eyl 08	1,27	1.617			

Çizelgeye göre C_{pk} 'nin 1,33'ün üzerinde olduğu aylarda maliyetlerin spesifikasyon değerleri arasında olduğu görülmektedir. Genel olarak ikinci grubun maliyetlerinin üçüncü gruba göre daha düşük olduğu düşünülebilir. Ancak gruplar arasında istatistiksel olarak farklılık olup olmadığı belirlenmesi için maliyet ortalamalarının istatistiksel yöntemlerle karşılaştırılması gerekmektedir.

İkiden fazla popülasyonun ortalamalarının karşılaştırılması amacıyla kullanılabilen parametrik (varsayımlar öngören) yöntemlerden en sık kullanılanı ANOVA'dır. Ancak, ANOVA uygulanırken örneklerin birbirlerinden bağımsız olmaları, normal dağılım göstermeleri ve sabit varyanslı olmaları ön koşuldur [9]. Bu nedenle, ortalamaların karşılaştırılması için önce bu varsayımların doğrulanması gerekmektedir. Normal dağılıma uygunluk koşulu, her bir veri grubuna ayrı olarak $\alpha=0,05$ anlamlılık seviyesinde AD Normal Dağılıma Uygunluk Testi ile incelenmiştir. "Yeterli" olarak adlandırılan aylara ait test sonuçları için $p=0,778$; "Kabul" aylara ait p değeri 0,782; "Yetersiz" aylar için $p=0,228$ olarak hesaplanmıştır. Buna göre, tüm gruplarda normal dağılım koşulu sağlanmıştır. ANOVA yönteminin bir başka varsayımı olan varyansların eşitliği için Bartlett Testi uygulanmıştır. Test istatistiği hesaplanarak Bartlett Testi Kritik Değerleri Tablosu ile karşılaştırılmıştır [8]. $\alpha=0,05$ için test istatistiği değeri $(b)=0,7133$; tablodan elde edilen test değeri $b_3(0,05;9,21,17) = 0,8688$ değerinden küçük olduğu için, varyansların eşit olmadığı kararı verilmiştir. Bu nedenle, ortalamaların karşılaştırılması için ANOVA yerine, parametrik olmayan Kruskal-Wallis (K-W) Testi kullanılmıştır. K-W Testi, k bağımsız örneğin aynı populasyondan alındığı durumlarda kullanılır [10]. Bu çalışmada bütün maliyetlerin aynı tesiste hesaplandığı varsayılırsa K-W testinin uygulanmasının daha uygun olacağı görülmektedir. K-W Testi ile C_{pk} indislerine göre gruplanan maliyet ortalamalarının istatistiksel olarak birbirlerinden farklı oldukları görülmüştür. Grupların bağımsız ortalamaları, $\bar{X}_{yeterli} = 998,78 \times 10^3 \$$; $\bar{X}_{kabul} = 1.987,90 \times 10^3 \$$; $\bar{X}_{yetersiz} = 2.824,88 \times 10^3 \$$ olarak hesaplanmıştır. "Kabul" ve "Yetersiz" olan aylarda ise maliyetler gerek ayrı gerekse ortalamaları bazında öngörülen fizibilite değerlerinin üzerine çıkmıştır. Özellikle "Yetersiz" olan aylarda maliyetin yüksek olduğu görülmektedir. Bunun en önemli nedenlerinden biri kömür kalorisinin istenen seviyede olmamasıdır.

II.3. ÇÖZÜM ÖNERİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

II.3.1. Kömür Kalori Değerlerinin İstenilen Seviyelere Çekilmesi

Santralde maliyetlerin yüksek olmasının temel nedeni, kömür kalori değerlerinin istenen özelliklerde olmamasıdır. Buna bağlı olarak proses, maliyet ve kalori değerine ait spesifikasyon değerlerini karşılayamamaktadır. “Yeterli” aylarda kömür kalori değerleri istenen seviyelerde seyretmiş ve maliyet problemi ile karşılaşılmamıştır. Ancak, “Kabul” ve “Yetersiz” olan aylarda maliyetler USL üzerine çıkmıştır. Bu durum, kömürün taş vb. kömür kalorisini düşürecek katmanlara rastlaması sonucu oluşabilir. Böylece, kazan dizaynında öngörülen ASL ve USL değerleri proses tarafından karşılanamamakta ve kazanın sıkça arıza yapmasına, hatta devreden çıkmasına bağlı olarak aylık üretim maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Bu sorunla karşılaşıldığında, kömür kalorisinin istenen seviyede olduğu başka bir maden ocağı kullanılabilir. Ancak, yerli kömür yakıtlı termik santralleri kurulurken, taşıma maliyetlerinin düşük tutulması amacıyla santral madene yakın yerlere kurulmalıdır. Bu nedenle, başka bir maden ocağı kullanmak mümkün değildir ve bu santral, ocağa 7–8 km yakınlıkta kurulmuştur. Bu tip problemlerde, önerilen bir başka seçenek de ASL-USL'nin prosesin rahatlıkla karşılayabileceği seviyelere çekilmesidir. Ancak ASL–USL değerleri kazan dizaynında belirlenmiştir. Her kazanın kendine özgü dizayn değerleri olduğundan, yeni ASL-USL değerleri için yeni bir kazan imal ettirmek ve eski kazanı kullanım süresinin çok öncesinde hurdaya çıkarmak gerekmektedir. Yaklaşık maliyeti 50.000×10^3 \$ olan ekipmanın kullanım süresinden önce hurdaya atılması ekonomik bir çözüm olmamaktadır.

Bir başka seçenek ise aynı maden ocağının kullanılması ve sürekli kalori ölçümü ile kazana istenen seviyelere yakın kömür beslenmesidir. Ancak, bu çözümde de üretilen kömür miktarı düşecek ve bu süreç oldukça fazla zaman gerektirecektir. Termik santrallerin yapım aşamalarında maden ocağını temsil edecek sayıda ve miktarda kömür sondajı yapılır ve gerekli numuneler alınır. Ancak yeraltı maden ocağının tüm yapısının bu sondajlar ile tanımlanamayacağı açıktır. Bu problem birçok maden ocağında yaşanan genel bir sorundur. Sonuç olarak bu problem için en uygun çözüm, kömürün kalori değerlerinin istenen seviyelere çekilmesini sağlayacak bir kömür zenginleştirme işleminin uygulanmasıdır.

II.3.2. Kömür Kalori Zenginleştirilmesi

Yapılan teknik araştırma sonrasında ek bir kömür zenginleştirme tesisi kurularak kömürün istenen kaloriye çıkabileceği anlaşılmıştır. Gupta, Banerjee ve Mishra tarafından yapılan araştırmada flotasyon (yüzdürme) yöntemi ile kömür zenginleştirme prosesi detayları ile anlatılmıştır [11]. Bu proseste, kömürün saflığını bozan ve kalorisini düşüren taş vb. materyal kömürden ayrıştırılarak kömürün kalorisini, orijinal değeri olan 2.000 kaloriye oldukça yakın bir değere yükselir. Bu amaçla kurulabilecek ek bir tesisin yapımını üstlenebilecek firmalar kömürün $2.000 \pm \%2,5$ kalori değerlerine çekilebileceklerini hesaplamışlardır. Bu değerlerin istenen C_{pk} değerlerine uyup uymayacağını kontrolü için 30 günlük bir deneme ayında üç vardiyalı ölçüm sistemine ilişkin, normal dağılıma uygun 1950-2050 kalori değerleri arasında Minitab 15 paket programının “Random Data” modülü kullanılarak hipotetik veri türetilmiş ve C_{pk} değeri hesaplanmıştır. Analizlerde 0,05 anlamlılık düzeyi ve USL 2.200; ASL 1.800 ve hedef değer 2.000 olarak alınmıştır. \bar{X} ve R kontrol grafikleri incelendiğinde prosesin istatistiksel olarak kontrol altında olduğu ve normal dağıldığı görülmüştür. C_{pm} 3,15 olarak hesaplanırken, C_p ve C_{pk} 3,41 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlardan hareketle $2.000 \pm \%2,5$ kalori değerleri ile üretim yapıldığında, C_{pk} 'nin 1,33'den büyük olduğu görülmüştür. Buna göre, ek bir tesis kurulduğunda maliyetlerin azalacağı tahmin edilmektedir. Bir sonraki bölümde tesis kurulmadan önceki ve sonraki maliyetler karşılaştırılarak tesisin kurulup kurulmayacağına karar verilecektir.

II.3.3. Ek Tesisin Kurulum Maliyeti

Termik santral, devletten 2000 yılında işletme hakkı devri yoluyla 18 yıllığına kiralanmıştır ve 2018 yılında devredilecektir. Belirli bir süresi olan yatırımlarda sabit amortismanına göre toplam yatırım miktarı toplam süreye bölünür [12]. Ek tesisin Mayıs 2009'da devreye girdiği varsayımıyla, yatırım yapılmadığı durumdaki maliyetler ile yatırım yapıldıktan sonraki maliyetler karşılaştırılacak ve Kasım 2018 sonu itibarıyla ek tesis yatırımının kârlı olup olmayacağı tartışılacaktır. Tesisin kurulum maliyeti ($M_{kurulum}$) 10.900×10^3 \$ ve aylık işletme maliyeti 90×10^3 \$'dir. Ek tesis yapılması durumunda C_{pk} değerleri her zaman 1,33'ün üzerine çıkacağından, ek tesis sonrası maliyet tahmininde $\bar{X}_{yeterli} = 998,78 \times 10^3$ \$ değeri dikkate alınmıştır. Buna göre aylık maliyetler için 0,95'lik güven aralığı (903,35; 1.094,25) olarak

hesaplanmıştır. En kötü durumda aylık termik santral işletme maliyeti $1.094,25 \times 10^3$ \$ olmaktadır.

$$TM_{ek\ tesis\ oncesi} \geq TM_{ek\ tesis\ sonrasi}$$

$$TM_{ek\ tesis\ oncesi} = \sum_{i=1}^{105} i.ayin\ isletme\ maliyeti = 1.803 * 10^3 * 105 = 189.315 * 10^3 USD$$

$$\begin{aligned} TM_{ek\ tesis\ sonrasi} &= M_{kurulum} + \sum_{i=1}^{105} i.ayin\ ek\ tesis\ isletme\ maliyeti + \sum_{i=1}^{105} i.ayin\ termik\ santral\ isletme\ maliyeti \\ &= (10.900 * 10^3) + (90 * 10^3 * 105) + (1.094 * 10^3 * 105) \\ &= 135.220 * 10^3 \$ \end{aligned}$$

Ek yatırım yapılmadığında beş yılın maliyet ortalamaları arasındaki farklılık K-W Testi ile incelenmiştir. Test değeri (719,798), (k-1)=4 serbestlik dereceli tablo değeri olan $\chi_{0,05}^2 = 9,488$ ile karşılaştırıldığında, maliyet ortalamalarının birbirlerinden farklı olduğu sonucuna varılmıştır. Ek tesis öncesi maliyet hesaplanırken, Mayıs 2009- Kasım 2018 tarihleri arasındaki 105 ay dikkate alınmıştır. 2004-2008 yılları arasında, aylık ortalama maliyetler sırasıyla $\bar{X}_1 = 2.153 \times 10^3$ \$; $\bar{X}_2 = 1.803 \times 10^3$ \$; $\bar{X}_3 = 1.827 \times 10^3$ \$; $\bar{X}_4 = 2.310 \times 10^3$ \$ ve $\bar{X}_5 = 2.207 \times 10^3$ \$ olarak hesaplanmıştır. Nakit akış tablosunda, en düşük maliyet olan 1.803×10^3 \$ değeri alınmış ve tablo buna göre düzenlenmiştir.

Mayıs 2009 ile Kasım 2018 yılları arasında yer alan dönem için oluşturulan nakit akış tabloları incelendiğinde firmanın ek yatırım yapıldığında 105 ayda 54.095×10^3 \$ tasarruf sağladığı görülmektedir.

III. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bir termik santralde maliyetlerin beklenen değerlerin üzerinde seyretmesi problemini çözmek için yapılan bu çalışmada, kazana beslenen kömür kalorisinin düşük olmasının maliyetleri arttırdığı ortaya konmuş ve bu sorunun çözüm yolları araştırılmıştır. Genellikle analiz amacıyla kullanılan proses yeterliliği katsayılarının, kendi genel işlevinin yanında verileri ayrıştırma aracı olarak da kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu sorunun ek bir yatırım olarak yapılabilecek kömür zenginleştirme tesisi ile çözülebileceği gösterilmiş ve yatırımın gerek teknik gerekse ekonomik olarak firmaya yarar sağlayacağı belirtilmiştir.

Yapılan analizlerde ortalama değerlerin karşılaştırılmasına olanak sağlayan ANOVA yöntemi denenmeye çalışılmış ancak varyansların eşitliği sağlanmadığı için ANOVA uygulanamamıştır. Gerçek hayat verilerinin kullanıldığı bu tip örneklerde böyle sorunlarla sıklıkla karşılaşmaktadır. Analiz süreci Kruskal Wallis testi kullanılarak sürdürülmüştür.

İlerleyen çalışmalarda ilgili kalite karakteristiği (C_{pk}) sürekli olarak izlenmeli böylece hem santralin üretim maliyetleri kontrol altında tutulmalı hem de ek yatırım gerektiren tesisin uygun çalışıp çalışmadığı gözlemlenmelidir. Bunun doğal sonucu olarak da ilgili kalite karakteristiğinin istenen seviyelerin altına indiği durumlarda sisteme derhal müdahale mümkün olmaktadır.

IV. KAYNAKLAR

- [1] D. C. Montgomery, "Introduction to Statistical Quality Control", John Wiley & Sons, Inc. 4th Edn., 2001.
- [2] K. Ishikawa, "What is Total Quality Control", The Prentice Hall, 1991.
- [3] M. Imai, "Kaizen, Japonya'nın Rekabetteki Başarısının Anahtarı", Kalder Yayınları, İstanbul, 1997.
- [4] C.J. Corbett, J. Pan, Evaluating environmental performance using statistical process control techniques, Stochastics and Statistics, Vol. 139, pp. 68-83, 2002.

- [5] H. Aykul, I.G. Ediz, H. Akcakoca, K. Erarslan, M. Taksuk, D.W. Dixon-Hardy, “Statistical process control for coal fired power plant system”, *Journal of the Energy Institute* , Vol. 83 (1), pp. 41-47, 2010.
- [6] R. Ganguli, J.C. Yingling, “Algorithms to control coal segregation under non-stationary conditions Part I: Moving window and SPC-based updating methods”, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 61, pp. 241–259, 2001.
- [7] R. Ganguli, J.C. Yingling, “Algorithms to control coal segregation under non-stationary conditions Part II: Times series-based methods”, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 61, pp. 261–271, 2001.
- [8] W.J. Kolarik, “*Creating Quality*”, McGRAW – Hill Int. Eds. Industrial Engineering Series, 1995.
- [9] R.E. Walpole, R.H. Myers, S.L. Myers, “*Probability and Statistics for Engineers and Scientists, Prentice Hall International Inc.*”, 6th Edition, 1998.
- [10] J.E. Freund, “*Modern Elementary Statistics*”, Pearson Prentice Hall, 11th Edition, 2004.
- [11] A.K. Gupta, P.K. Banerjee, A. Mishra, Influence of chemical parameters on selectivity and recovery of fine coal through flotation, *International Journal of Mineral Processing*, doi: 10.1016/j.minpro.2009.02.001, pp.1-6, 2009.
- [12] R.A. Brealey, S. Meyers, “*Principles of Corporate Finance*”, The McGraw Hill Companies, 7th Edition, 2003.

EK-A. 2004-2008 Yılları Arası Proses Yeterliliği Analiz Sonuçları

2004						
AY	C_p	C_{pk}	C_{pm}	AD*	İKK**	Maliyet (x10 ³ \$)
Ocak	1,27	1,25	1,25	0,197	+	2,715
Şubat	0,91	0,85	0,94	0,507	+	2,936
Mart	1,15	0,84	0,82	0,18	+	2,917
Nisan	1,43	1,38	1,3	0,323	-	990
Mayıs	1,1	1,09	1,09	0,578	+	2,149
Haz.	2,06	2,06	2,1	0,326	+	838
Tem.	2,31	2,3	2,48	0,437	-	831
Ağustos	1,33	1,27	1,28	0,183	+	2,388
Eylül	1,24	1,18	1,15	0,299	+	1,986
Ekim	0,86	0,83	0,81	0,144	+	2,410
Kasım	0,88	0,75	0,77	0,312	+	3,522

2004						
AY	C_p	C_{pk}	C_{pm}	AD*	İKK**	Maliyet (x10 ³ \$)
Ocak	1,06	1,05	1,05	0,556	+	1,639
Şubat	1,12	1,08	1,04	0,309	-	1,714
Mart	1,06	1,05	1,03	0,362	+	1,804
Nisan	1,13	1,13	1,05	0,634	+	2,028
Mayıs	0,93	0,92	0,97	0,178	+	2,613
Haz.	1,09	0,87	0,9	0,538	+	2,227
Tem.	1,08	1,03	1,1	0,293	+	2,037
Ağustos	1,42	1,35	1,43	0,605	+	964
Eylül	1,21	1,16	1,24	0,41	+	2,154
Ekim	1,1	1,06	1,11	0,131	+	1,612
Kasım	2,47	2,47	2,37	0,375	+	1,038

2006						
AY	C_p	C_{pk}	C_{pm}	AD*	İKK**	Maliyet (x10 ³ \$)
Ocak	0,79	0,73	0,83	0,337	+	2,677
Şubat	1,18	1,1	1,06	0,147	+	1,974
Mart	0,43	0,4	0,47	0,646	+	2,422
Nisan	0,48	0,45	0,52	0,298	+	2,511
Mayıs	1,28	1,23	1,32	0,326	+	1,772
Haz.	2,29	2,26	2,06	0,261	+	924
Tem.	1,35	1,32	1,35	0,365	+	1,403
Ağustos	1,97	1,93	2,11	0,432	+	979
Eylül	1,2	1,11	1,15	0,25	+	2,274
Ekim	2,32	2,29	2,35	0,362	+	1,130
Kasım	1,32	1,28	1,29	0,406	-	2,030

2007						
AY	C_p	C_{pk}	C_{pm}	AD*	İKK**	Maliyet (x10 ³ \$)
Ocak	1	1	1,01	0,388	+	2,563
Şubat	0,96	0,93	1,05	0,768	+	3,144
Mart	0,82	0,57	0,66	0,622	+	3,444
Nisan	0,76	0,56	0,65	0,566	+	2,485
Mayıs	1,07	1,04	1,14	0,374	+	1,668
Haz.	3,1	3,04	2,7	0,547	-	962
Tem.	1,3	1,3	1,25	0,447	-	2,170
Ağustos	2,67	2,61	2,6	0,407	+	1,136
Eylül	1,28	1,24	1,31	0,339	+	2,268
Ekim	1,31	1,29	1,21	0,415	+	2,015
Kasım	0,81	0,51	0,6	0,167	-	3,557

2008						
AY	C_p	C_{pk}	C_{pm}	AD*	İKK**	Maliyet (x10 ³ \$)
Ocak	1,33	1,28	1,26	0,619	-	2,285
Şubat	0,77	0,53	0,65	0,447	+	3,575
Mart	1,05	0,96	1,08	0,326	+	2,277
Nisan	0,9	0,86	0,92	0,09	+	3,124
Mayıs	1,23	1,18	1,19	0,161	+	1,934
Haz.	2,32	2,29	2,19	0,418	+	929
Tem.	1,25	1,24	1,24	0,201	+	1,746
Ağustos	2,01	1,94	2,06	0,158	+	1,051
Eylül	1,28	1,27	1,32	0,226	+	1,617
Ekim	0,61	0,44	0,58	0,481	+	3,152
Kasım	1,04	0,98	0,97	0,241	+	2,587

(*) AD : Hesaplanan Anderson- Darling test değeridir,

(**) İKK : Sürecin istatistiksel olarak kontrol altında olup olmadığını gösteren semboldür + işareti sürecin kontrol altında olduğunu, - işareti kontrol altında olmadığını belirtmektedir.