

DERLEME /REVIEW

BİR EKSKAVATÖRÜN BAKIM KOLAYLIĞI HESAPLAMALARI VE HASSASLIK ANALİZLERİ

Nevin UZGÖREN¹, Sermin ELEVLİ², Mehmet TAKSUK³

ÖZ

Belirli bir zaman süreci içerisinde bir işletmenin işlerliliğinin devamı, herşeyden önce sistemi oluşturan ekipmanların arızalanmadan çalışmasına ve bir arıza durumunda da mümkün olduğu kadar hızlı bir şekilde çalışır hale getirilebilmesine bağlıdır. Bu nedenle sistemi oluşturan ekipmanların güvenilirlik analizlerinin (reliability analysis) yanı sıra, bakım kolaylığı analizlerinin de (maintainability analysis) etkin bir şekilde yapılması büyük bir önem arz eder.

Bu bağlamda çalışmanın temel amacı, belirli bir ekipmanın geçmiş dönem tamir sürelerini istatistiksel olarak analiz ederek, bir arıza durumunda ilgili ekipmanın verilen bir süreye eşit veya daha kısa sürede tamir edilebilme olasılıklarını gösteren bakım kolaylığı analizlerinin nasıl yapılacağını uygulamalı olarak göstermektir. Ayrıca ele alınan olasılık dağılımlarının hassaslık analizlerinin yapılması ise, çalışmanın diğer bir amacını oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler : Bakım kolaylığı, Bağımsız ve benzer dağılım, İstatistiksel dağılımlar (Normal, Lognormal, Üstel ve Weibull dağılımları)

MAINTAINABILITY ESTIMATIONS OF AN EXCAVATOR AND SENSITIVITY ANALYSIS

ABSTRACT

Sustainability of an operation basicly depends on two factors. The first one is the equipments failure occurs, then they should be returned to on operational state as soon as possible. Therefore it is very important to carry out maintability analysis as well as reliability analiysis of equipments of a system.

Thus, the objective of this study is to show how maintability analysis, which describes the probability that an equipment can be required within a given period, can be carried out by analyzing east repair times of a given equipment statistically. In addition to that, sensitivty analysis of probability distribution used in maintainability analysis is other objective of the study.

Key Words: Maintainability, Independent and Identically Distributed, Statistical Distiributions (Normal, Log-normal, Exponential and Weibull distributions)

İngilizce abstract bölümü

Keywords: Maintainability, Independent and identically distributed, Statistical distiributions (normal, lognormal, exponential and Weibull distributions)

¹Dumlupınar Üniversitesi İ.İ.B.F. İşletme Bölümü Sayısal Yöntemler A.B.D., Kütahya,
Tel: 02742652193; **E-posta:** nuzgoren@dumlupinar.edu.tr

²Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Endüstri Mühendisliği A.B.D. Kütahya.
E-posta: selevli@dumlupinar.edu.tr

³Garp Linyitleri İşletmesi Müdürlüğü, 43300 Tavşanlı/ Kütahya,
Tel: 0274 614 1007

1. GİRİŞ

Bir sistemin toplam yeteneğini tanımlamada en fazla kullanılan terim; “*sistem etkinliği*” dir. Sistem etkinliği, verilen bir süre içinde sistemin bir iş talebini başarılı bir şekilde karşılama olasılığı olarak tanımlanır. Sistem etkinliği tasarım uygunluğu (design adequacy), performans ölçüleri (performance measures), güvenlik (safety), güvenilirlik (reliability), kalite (quality) ve **bakım kolaylığı** (maintainability) gibi faktörlerin bir fonksiyonudur (Rothbart, 1986: 2). Bu faktörlerden bakım kolaylığı sistemde bir arıza olması durumunda, sistemin tekrar çalışabilir hale gelmesi konusunda olasılıksal sürece bağlı olarak karar verilmesine olanak tanıyan bir analiz türüdür. Bu doğrultuda çalışmanın temel amacı, sistem etkinliğinin bir parçası olan bakım kolaylığı kavramını tanıtmak ve bakım kolaylığı analizlerinin nasıl yapılacağını uygulamalı olarak göstermektir.

Bakım kolaylığı bozulan bir ekipman ya da bir sistemin verilen bir süre içinde yeniden çalışabilir hale getirebilme olasılığı olarak tanımlanır. Bu durumda **Arızalar Arası Ortalama Süre (AAOS)** ve arıza oranı güvenilirlik ölçüleri olurken, **Tamir İçin Ortalama Süre (TİOS)** ve tamir oranı ise bakım kolaylığının ölçüleri olmaktadır. Bu nedenle bakım kolaylığında temel amaçlardan biri TİOS’ u tahmin edebilmektir (Dieter, 1983: 456).

Bozulan bir ekipman ya da sistemi yeniden çalışabilir hale getirmede gerekli olan süre, aşağıdaki unsurlardan oluşmaktadır (Dieter, 1983: 457).

1. Arızayı tespit etmek ve tamir işini planlamak için gerekli olan süre
2. Gerekli yedek parçanın temin süresi
3. Tamir için gerekli olan süre
4. Tamirin başarılı olduğunu ve sistemin tekrar çalıştığını kanıtlamak için gerekli olan süredir.

Dolayısıyla bakım kolaylığı, bu dört zaman faktörüne bağlı olacaktır. Bakım kolaylığını etkileyen diğer faktörler ise; tamir organizasyonu ve önleyici bakım uygulamalarıdır. İyi bir bakım kolaylığı düşük güvenilirliği az çok telafi edebilir. Bu nedenle arzu edilen güvenilirlik seviyesine ulaşamadığı durumlarda sistemin bakım kolaylığını artırma olanaklarını araştırmak gerekir (Rothbart, 1986: 4). Buradan bakım kolaylığı ve güvenilirlik kavramları arasında sıkı bir ilişki olduğu ve dolayısıyla bir sistemin etkinliğinin belirlenmesinde güvenilirlik analizlerinin yanısıra bakım kolaylığı analizlerinin de başarılı bir şekilde yapılmasının oldukça önemli olduğu anlaşılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında ilk olarak bakım kolaylığı analizi teorik olarak açıklanmış ve daha sonra bu analizin nasıl yapılacağı Garp Linyitleri İşletmesinde (GLİ) kullanılan S17 nolu ekskavatörün tamir süreleri kullanılmak suretiyle ayrıntılı bir şekilde gösterilmiş-

tir. Yapılan analizler sonucunda S17 nolu ekskavatörün mekanik arızalarının Weibull dağılımına, elektrik arızalarının ise lognormal dağılıma uygunluk gösterdiği tesbit edilmiştir. Daha sonra bu dağılımlar yardımıyla çeşitli süreler için bakım kolaylığı değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise, mekanik tamir süreleri üzerinde denenen çeşitli dağılımların hassaslık analizi yapılmıştır.

2. BAKIM KOLAYLIĞI ANALİZİ (MAINTAINABILITY ANALYSIS)

Bir ekipmanın bakım kolaylığı, arızalanan bir ekipmanın verilen bir zaman periyodu içerisinde belirli kaynakları kullanarak yeniden çalışır hale getirilebilme olasılığı olarak tanımlanır ve bakım kolaylığı genel olarak

$$\text{Bakım kolaylığı} = M(t) = f(\text{TİOS})$$

şeklinde, yani Tamir İçin Ortalama Sürelerin bir fonksiyonu olarak ifade edilir (Kumar; 1989: 325; Dieter, 1983: 455-456; Rao, 1992: 400).

Tamir için gerekli süre tesadüfi bir değişken olup, T ile tanımlanır. Bu durumda bakım kolaylığı fonksiyonu M(t)

$$M(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t) dt$$

şeklinde ifade edilir (Rao, 1992: 407; Rothbart, 1986: 5). Tamir süresi tesadüfi bir değişken olduğundan olasılık dağılımı altında ifade edilebilir. Tamir süreleri için tanımlanan dağılımlar genel olarak tamir dağılımları, arıza sürelerine ilişkin dağılımlar ise arıza dağılımları olarak isimlendirilir (Rothbart, 1986: 3). Bununla birlikte tamir dağılımlarında kullanılan yöntemler arıza dağılımlarında kullanılan yöntemlerden farklı değildir. Temel fark onların nasıl kullanıldığıyla ilgilidir. Arıza verilerini içeren dağılımlar ise, güvenilirlik analizinin yapılması ve verilen bir zaman süreci içinde arızanın ortaya çıkmaması olasılığı ile ilgiliyken, tamir sürelerini içeren dağılımlar bakım kolaylığı analizinin yapılması ve arızalanan bir ekipmanın verilen sürede tamir edilebilme olasılığıyla ilgilidir (Reliasoft, 2005: 198).

Bakım kolaylığı analizi uygun teorik dağılımın belirlenmesi esasına dayanır ve genel olarak aşağıdaki aşamaları içerir:

1. Her ekipman için tamir sürelerinin belirlenmesi.
2. Teorik olasılık dağılımlardan yararlanabilmek için, tamir süreleri üzerinde bağımsızlık (Independent) ve benzer dağılım (Identically Distributed) varsayımlarının geçerliliğinin araştırılması.
3. Tamir süreleri bağımsız ve benzer dağılıma sahip ise, tamir süreleri için en uygun teorik olasılık dağılımının (üstel, normal, lognormal, Weibull) be-

lirlenmesi. Eğer tamir sürelerinde trend tespit edilirse, trendi tanımlamaya olanak veren ve tamir sürelerini zamanın bir fonksiyonu olarak ifade eden, homojen olmayan Poisson sürecine dayanan Power Law Process (PLP) modelinin kullanılması (Kumar & Klefsjö, 1990: 217).

4. Belirlenen dağılımlar yardımıyla Tamir İçin Ortalama Süre (TİOS) ve bakım kolaylığı değerlerinin hesaplanması.

Bu aşamalardan anlaşılacağı üzere bakım kolaylığı analizinde iki temel analitik aşama söz konusudur. Bunlardan birincisi bağımsızlık ve benzer dağılım analizi, ikincisi ise uygun teorik dağılımın belirlenmesidir.

2.1 Bağımsızlık ve Benzer Dağılım Analizi

Bakım kolaylığı analizinde ilk analitik aşama tamir sürelerinin bağımsız ve benzer dağılıma sahip olup olmadıklarının testidir. Bağımsızlık, gelecekteki tamir sürelerinin geçmişteki tamir sürelerinden etkilenmediği, yani serisel korelasyon olmadığı anlamına gelir. Benzer dağılım ise, tamir sürelerinden elde edilen olasılık dağılımının değişmeyeceği ve dolayısıyla ele alınan zaman periyodunda aynı olasılık dağılımının kullanılacağı anlamına gelir. Benzer dağılım varsayımı, verilerin kronolojik sırasının önemli olmadığına (trend olmadığına) işaret eder ve bu durumda sistemin daha iyiye yada daha kötüye gitmediğini gösterir (Jones, 1995: 39-41).

Bir seride trendin ve serisel korelasyon varlığının araştırılmasında basit grafiksel tekniklerden yararlanır. Trend testi için kümülatif tamir sürelerine karşı kümülatif tamir sayısı grafiğinin çizilmesi söz konusudur. Bu çizim sonucunda bir doğrunun elde edilmesi tamir sürelerinin trend içermediğini gösterir. Serisel korelasyon testi ise, X_i, i . tamir süresi ve X_{i-1} (i-1). tamir süresi olmak üzere $(X_i, X_{i-1}) i=1,2,\dots,n$ (n=tamir sayısı) veri çiftlerinin bir grafiğidir. Eğer X' ler bağımsız ise noktalar diyagram üzerinde rassal bir şekil-

de dağılırlar. Eğer X' ler bağımlı ya da ilişkili ise noktalar bir doğru üzerinde yer alır (Vagenas, Runciman & Clement, 1997: 36; Kumar, 1989: 328-329). Ayrıca çeşitli gecikme değerlerine karşı otokorelasyon katsayılarının çizimini yapan korelogram yardımıyla da serisel korelasyonun ve trendin varlığını araştırmak mümkündür (Kumar, 1989: 329).

2.2 Uygun Teorik Dağılımın Belirlenmesi

Tamir sürelerinin bağımsız ve benzer dağılıma sahip olduğu belirlendikten sonra, bakım kolaylığı analizinde ikinci temel aşama tamir sürelerinin yapısını en iyi açıklayacak teorik dağılımın belirlenmesidir. Tamir süreleri için en çok kullanılan dağılımlar, üstel, normal, lognormal ve weibull dağılımlarıdır (Rao, 1992: 406). Bu dağılımlara ilişkin özet bilgiler Tablo 1' de verilmiştir (Rothbart, 1986: 6; Meyer, 1978: 190-234; Rao, 1992: 400-409).

Tamir süreleri üzerinde "Tablo 1" deki teorik dağılımlar denendikten sonra Kolmogrov-Smirnov (KS) testi yardımıyla en uygun dağılım modeli belirlenir. Belirlenen uygun dağılım modeli ise bakım kolaylığı değerlerinin hesaplanmasına olanak verir.

3. UYGULAMA: BİR EKSKAVATÖRÜN BAKIM KOLAYLIĞI ANALİZİ

Bu çalışmada Garp Linyitleri İşletmesinde (GLİ) kullanılan S17 nolu ekskavatörün mekanik ve elektrik alt sistemlerinin 2004 yılına ait tamir süreleri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Analizde ele alınan S17 nolu ekskavatör (PH 2300 XP), dekapaj işinde kullanılmakta olup 20 yd³ kapasiteye sahiptir. Yıllık iş miktarı ortalama 2.5 milyon m³ seviyesinde olan S17, 1987 yılında hizmete alınmış ve bugüne kadar 43095 saat çalışmıştır.

Çalışmada ilk olarak tamir sürelerinin trend ve serisel korelasyon analizleri yapılmıştır. Bu analizler ile tamir sürelerinin bağımsız ve benzer dağılıma sahip ol-

Tablo 1. Tamir Sürelerine Yönelik Başlıca Dağılımlar

Dağılım	Olasılık yoğunluk fonksiyonu	Dağılımın parametreleri	Tamir İçin Ortalama Süre (TİOS)	Bakım kolaylığı M(t)
Üstel	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	λ =Tamir oranı	$TİOS = 1 / \lambda$	$M(t) = 1 - e^{-\lambda t}$
Normal	$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	μ = Ortalama σ =Standart sapma	$TİOS = \mu$	$M(t) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$
Lognormal	$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}$	μ = $\ln t$ 'nin ortalaması σ = $\ln t$ 'nin standart sap.	$TİOS = e^{\mu + (\sigma^2/2)}$	$M(t) = \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)$
Weibull	$f(t) = \beta\alpha^{-\beta} t^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$	α =Ölçek parametresi β =Şekil parametresi	$TİOS = \alpha\Gamma(1 + 1/\beta)$ Γ = Gama fonksiyonu	$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$

Tablo 2. İstatistiksel Özet Bilgiler

Alt sistem	Arıza sayısı	Max. Arıza Süresi (saat)	Min. arıza süresi (saat)	Aralık (saat)	Toplam arıza süresi (saat)	Ortalama tamir süresi (saat)	Standart sapma (saat)
Mekanik	54	16.30	0.20	16.10	212	3.9259	3.7527
Elektrik	16	3.20	0.30	2.90	21	1.3125	0.9346

dukları belirlendikten sonra, teorik dağılımlara uygunlukları araştırılmıştır. Bu amaçla KS testinden yararlanılmıştır. Belirlenen teorik dağılımlar yardımıyla TİOS ve çeşitli sürelerle ilişkin bakım kolaylığı değerleri hesaplanmıştır. Son olarak da denenen teorik dağılımların TİOS ve bakım kolaylığı değerleri üzerinden hassaslık analizleri yapılmıştır. İlgili analizlerde **Stat Graph** ve **Eviews 4** paket programları kullanılmıştır.

3.1 Verilerin İstatistiksel Analizi

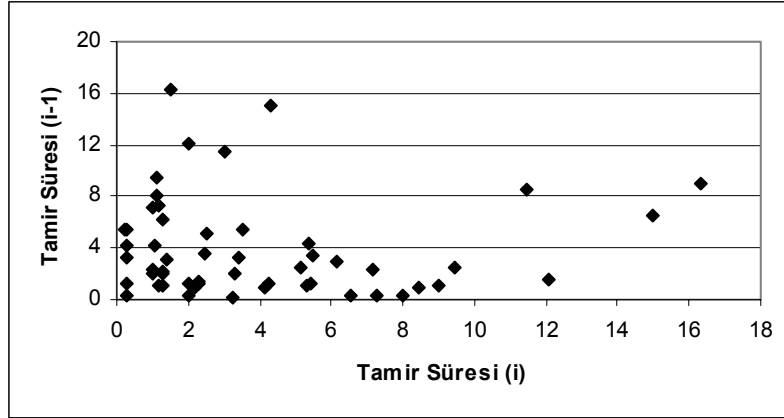
S17 nolu ekskavatöre ait tamir süreleri ile ilgili toplanan bir yıllık veriler “Ek 1” de yer alan tabloda verilmiştir. Teorik dağılım sonuçlarının daha iyi kavranılması amacıyla S17 nolu ekskavatörün mekanik ve elektrik alt sistemlerinin tamir sürelerine ilişkin istatistiksel analizler yapılmış ve sonuçlar “Tablo 2” de verilmiştir.

“Tablo 2” ye göre mekanik arızalar için ortalama tamir süresi 3.9 saat iken, elektrik arızaları için bu

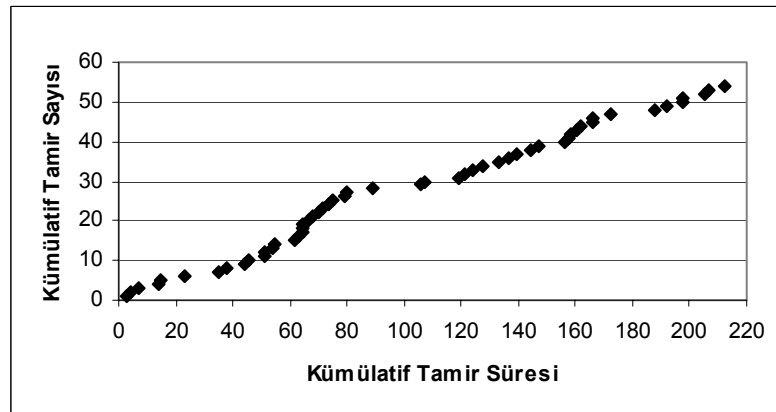
süre 1.3 saattir. Buradan da elektrik arızalarının çok daha kısa sürede giderilebildiğini söylemek mümkündür.

3.2 Seri Korelasyon ve Trend Testleri

S17 nolu ekskavatörün mekanik tamir süreleri arasında serisel korelasyon olup olmadığını belirlemek üzere i . tamir süresinin $(i-1)$. tamir süresine karşı grafiği çizilmiştir “Şekil 1”. “Şekil 1” incelendiğinde noktaların rassal bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Bu şekilde verilerin rassal dağılımı veriler arasında serisel korelasyon olmadığını göstermektedir (Kumar, 1989: 328). “Şekil 2” ise aynı ekskavatörün mekanik tamir sürelerinin trend testini göstermektedir. Şekilde kümülatif tamir süresi ile kümülatif tamir sayısı arasındaki ilişki yaklaşık bir doğru şeklindedir. Bu ilişkinin doğrusal olması da verilerin bir trend içermediğini işaret etmektedir (Kumar, 1989: 328).



Şekil 1 S17 nolu ekskavatörün mekanik tamir sürelerine ilişkin seri korelasyon testi



Şekil 2 S17 nolu ekskavatörün mekanik tamir sürelerine ilişkin trend testi

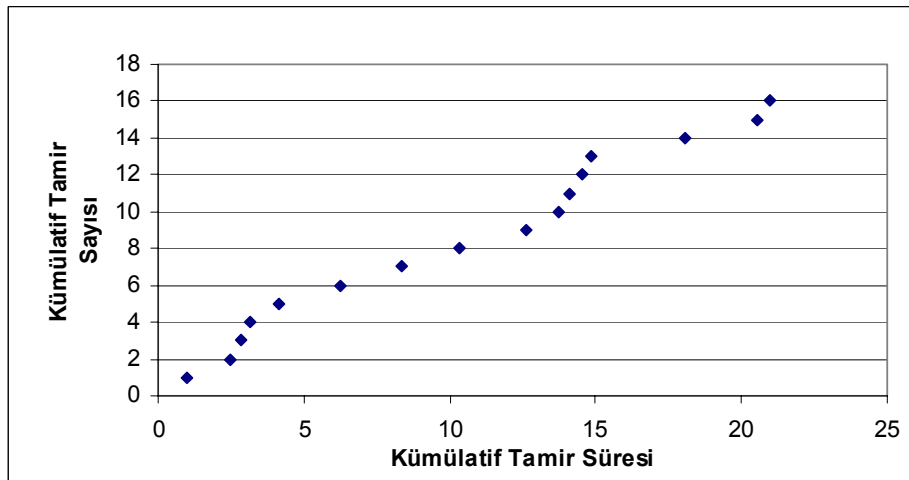
Otokorelasyon (AC)	Kısmi Korelasyon (PAC)	AC	PAC	Q-İstatistiği	Olasılık	
.|. .	.|. .	1	-0.010	-0.010	0.0053	0.942
.|**	.|**	2	0.221	0.221	2.8482	0.241
.|. .	.|. .	3	-0.005	-0.001	2.8496	0.415
.|. .	.|. .	4	-0.049	-0.103	2.9928	0.559
.|. .	.|. .	5	-0.048	-0.050	3.1327	0.680
.|. .	.|. .	6	-0.149	-0.123	4.5314	0.605
.|. .	.|. .	7	0.023	0.045	4.5655	0.713
.|. .	.|. .	8	-0.055	0.005	4.7633	0.783
.|. .	.|. .	9	0.083	0.067	5.2223	0.815
.|. .	.|. .	10	-0.175	-0.197	7.3231	0.695
.|. .	.|. .	11	-0.052	-0.112	7.5163	0.756
.|. .	.|. .	12	-0.109	-0.056	8.3659	0.756
.|. .	.|. .	13	-0.181	-0.145	10.794	0.628
.|. .	.|. .	14	-0.002	0.015	10.794	0.702
.|. .	.|. .	15	-0.231	-0.194	14.914	0.458
.|. .	.|. .	16	-0.006	-0.112	14.917	0.531
.|. .	.|. .	17	-0.036	-0.009	15.021	0.594
.|. .	.|. .	18	-0.013	-0.063	15.035	0.660
.|. .	.|. .	19	0.181	0.169	17.865	0.531
.|. .	.|. .	20	0.105	0.094	18.852	0.531
.|. .	.|. .	21	0.048	-0.121	19.062	0.581
.|. .	.|. .	22	0.123	0.069	20.499	0.552
.|. .	.|. .	23	0.076	0.041	21.062	0.577
.|. .	.|. .	24	0.026	0.038	21.128	0.631

Şekil 3. S17 nolu ekskavatörün mekanik tamir sürelerine ilişkin korelogramı

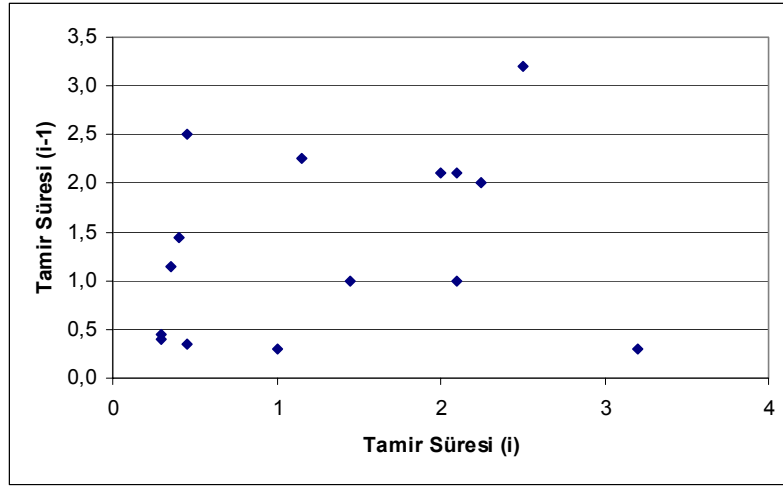
Serisel korelasyon ve trendin tespiti için diğer bir yol o verilerin korelogramını incelemektir. Bu amaçla oluşturulan S17 nolu ekskavatörün mekanik tamir sürelerine ilişkin korelogram “Şekil 3” incelendiğinde, bütün gecikme sayılarında otokorelasyon katsayılarının çok küçük değerler aldığı, yani gecikme sayısı ne olursa olsun serisel korelasyona rastlanmadığı görülmektedir. 1den 24. gecikmeye kadar bütün otokorelasyon katsayıları belirlenen güven aralığının $[\pm 1.96(\frac{1}{\sqrt{54}})]$; yani ± 0.2667 içinde yer aldığından her gecikme için ρ_k ’nin sıfıra eşit olduğunu %95 güvenle söylemek mümkündür. Ayrıca elde edilen bu

sonuçlar serinin durağan olduğunun ve dolayısıyla trend içermediğinin de bir belirtisidir (Ertek, 1996: 383-386; Gujarati, 1999: 714 -718).

Benzer şekilde S17 nolu ekskavatörün elektrik alt sistemlerinin tamir sürelerine ilişkin serisel korelasyon ve trend testleri “Şekil 4”, “Şekil 5” ve “Şekil 6” da verilmiştir. Şekiller benzer yöntemle incelendiğinde, elektrik alt sistemlerinin tamir sürelerinin de bağımsız (serisel korelasyon olmadığı) ve benzer dağılıma sahip olduğu (trend içermediği) gözlenmektedir.



Şekil 4. S17 nolu ekskavatörün elektrik tamir sürelerine ilişkin seri korelasyon testi



Şekil 5. S17 nolu ekskavatörün elektrik tamir sürelerine ilişkin trend testi

Otokorelasyon (AC)	Kısmi Korelasyon (PAC)	AC	PAC	Q-İstatistiği	Olasılık	
. |**| .	. |**| .	1	0.278	0.278	1.4863	0.223
. **| .	. ***| .	2	-0.282	-0.389	3.1181	0.210
. ***| .	. *| .	3	-0.314	-0.124	5.3091	0.151
. ***| .	. ***| .	4	-0.354	-0.401	8.3132	0.081
. *| .	. *| .	5	-0.106	-0.061	8.6080	0.126
. .| .	. **| .	6	0.041	-0.305	8.6556	0.194
. .| .	. .| .	7	0.153	-0.008	9.4036	0.225
. **| .	. .| .	8	0.273	-0.014	12.093	0.147
. *| .	. .| .	9	0.107	-0.024	12.561	0.184
. **| .	. *| .	10	-0.142	-0.152	13.523	0.196
. .| .	. .| .	11	-0.193	-0.055	15.662	0.154
. .| .	. *| .	12	0.028	0.174	15.718	0.204

Şekil 6. S17 nolu ekskavatörün elektrik tamir sürelerine ilişkin korelogramı

3.3 Uygun Teorik Dağılımın Belirlenmesi

S17 nolu ekskavatörün mekanik ve elektrik tamir sürelerinin bağımsız ve benzer dağılıma sahip olduğu bölüm 3.2' de yapılan testler ile ortaya konulmuştur. Analizin ikinci aşaması uygun teorik dağılımın belirlenmesine yöneliktir. Bu amaçla mekanik ve elektrik tamir süreleri üzerinde üstel, normal, lognormal ve Weibull dağılımları denenmiş ve denenilen bu teorik dağılımlardan en uygun olanı istatistiksel bir test olan Kolmogrov-Smirnov (KS) testi ile belirlenmiştir. KS testi bir dağılımın belirli ya da herhangi bir dağılıma uygunluğunu test etmek için yararlanılan bir test olup, teorik kümülatif dağılım ile gözlemlenen kümülatif da-

ğılımın karşılaştırılması esasına dayanır (Özdamar, 2002: 544 - 546). Elde edilen bulgular "Tablo 3" ve "Tablo 4" de özet halinde verilmiştir.

"Tablo 3" den de anlaşılacağı gibi, yapılan hipotez testleri ile mekanik tamir sürelerinin dağılımını açıklamada kullanılabilecek 4 teorik dağılımın da %95 güvenle uygun olduğu belirlenmiştir. Ancak bu dağılımlardan en iyisi D_{max} değeri en küçük olan Weibull dağılımıdır (Kumar, 1989: 331). Bu nedenle bakım kolaylığı değerlerinin hesabında Weibull dağılımı kullanılmıştır.

Tablo 3. S17 Nolu Ekskavatörün Mekanik Tamir Sürelerine İlişkin Teorik Dağılım Sonuçları

Dağılım	Tahmin edilen parametre	K-S istatistiği D_{max}	TİOS	İstatistiksel karar (K-S testi) ($\alpha=0.05$)
Üstel	$\lambda=0.2547$	0.113753	3.9259	$D_{max}=0.113753 < D_{tab}=0.185$ H_0 kabul, teorik model uygundur.
Normal	$\bar{X}=3.9259$ $s=3.75268$	0.174815	3.9259	$D_{max}=0.174815 < D_{tab}=0.185$ H_0 kabul, teorik model uygundur.
Lognormal	$\bar{X}=0.882$ $s=1.090$	0.0981624	4.3756	$D_{max}=0.0981624 < D_{tab}=0.185$ H_0 kabul, teorik model uygundur.
Weibull*	Ölçek (α)=4.04796 Şekil (β)=1.0794	0.0872363	3.9362	$D_{max}=0.0872363 < D_{tab}=0.185$ H_0 kabul, teorik model uygundur.

Tablo 4. S17 Nolu Ekskavatörün Elektrik Tamir Sürelerine İlişkin Teorik Dağılım Sonuçları

Dağılım	Tahmin edilen parametre	K-S istatistiği D _{max}	TİOS	İstatistiksel karar (K-S testi) ($\alpha = 0.05$)
Üstel	$\lambda = 0.7619$	0.204331	1.3125	$D_{\max} = 0.204331 < D_{\text{tab}} = 0.328$ H_0 kabul, teorik model uygundur.
Normal	$\bar{X} = 1.3125$ $s = 0.934612$	0.196956	1.3125	$D_{\max} = 0.196956 < D_{\text{tab}} = 0.328$ H_0 kabul, teorik model uygundur.
Lognormal*	$\bar{X} = -0.0245$ $s = 0.844$	0.195324	1.3938	$D_{\max} = 0.195324 < D_{\text{tab}} = 0.328$ H_0 kabul, teorik model uygundur.
Weibull	Ölçek (α) = 1.4526 Şekil (β) = 1.4603	0.209742	1.315	$D_{\max} = 0.209742 < D_{\text{tab}} = 0.328$ H_0 kabul, teorik model uygundur.

”Tablo 4” de görüleceği gibi, elektrik tamir sürelerinin dağılımını açıklamada yine 4 teorik dağılımın da %95 güvenle uygun olduğu belirlenmiştir. Ancak bu dağılımlardan en iyisi, D_{\max} değeri en küçük olan lognormal dağılımdır. Bu nedenle bakım kolaylığı değerlerinin hesabında lognormal dağılım kullanılacaktır.

3.4 Bakım Kolaylığı Değerlerinin Hesabı

Bölüm 3.3’ de yapılan testler sonucunda en uygun teorik dağılımların; mekanik alt sistemin tamir süreleri için **Weibull dağılımı**, elektrik alt sistemin tamir süreleri için **lognormal dağılım** olduğu bulunmuştur. Bu dağılımlar kullanılarak mekanik ve elektrik arızaları için bakım kolaylığı değerleri hesaplanmıştır. Diğer bir deyişle, S17 nolu ekskavatörde mekanik veya elektrik arızası olması durumunda, arızanın verilen çeşitli sürelerle ($t=1,2,\dots,10$) eşit veya daha kısa sürede giderilebilme olasılıkları hesaplanmıştır. “Tablo 5” çeşitli tamir süreleri (saat) için hesaplanan bakım kolaylığı $[M(t)]$ değerlerini göstermektedir.

“Tablo 5”e göre, S17 nolu ekskavatörde mekanik bir arıza olması durumunda, sözkonusu arızanın örneğin 2 saat veya daha kısa sürede giderilme olasılığı %37.3, elektrik arızası olması durumunda ise, bu olasılık değeri %80.2’ dir..

S17 nolu ekskavatörün mekanik sisteminde meydana gelebilecek bir arızanın %99 olasılıkla tamir edilebileceği süre, Weibull dağılımından yararlanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$t = \alpha [-\ln(1 - 0.99)]^{\frac{1}{\beta}} = 4.04796 [-\ln(1 - 0.99)]^{\frac{1}{1.0794}}$$

$$t = 16.67 \text{ saat}$$

S17 nolu ekskavatörün elektrik sisteminde meydana gelebilecek bir arızanın %99 olasılıkla tamir edilebileceği süre ise, yine lognormal dağılımı kullanmak suretiyle aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$M(t) = 0.99 = \phi\left(\frac{\ln t - \bar{X}}{s}\right) = \phi\left[\frac{\ln t - (-0.0245)}{0.844}\right]$$

$$\Rightarrow \frac{\ln t - (-0.0245)}{0.844} = 2.33 \Rightarrow \ln t = 1.94202 \Rightarrow$$

$$t = 6.97 \text{ saat}$$

Yapılan bu analizler, S17 nolu ekskavatörde meydana gelecek bir elektrik arızasının mekanik arızaya göre çok daha kısa sürede giderilebileceğini açıkça göstermektedir.

3.5 Hassaslık Analizi

Çalışmanın son aşamasında kullanılan dağılımların hassaslık analizine yer verilmiştir. Hassaslık analizi, uygun teorik dağılımın kullanılmaması durumunda TİOS ve $M(t)$ değerlerinde meydana gelebilecek hata değerlerinin ölçümünü içermektedir. Sözkonusu analiz sadece mekanik alt sistem örneğinde gösterilmiştir.

Bölüm 3.3’te mekanik alt sistem tamir sürelerinin Weibull dağılımına uygunluk gösterdiği ve TİOS = 3,93624 olduğu belirlenmiştir. Weibull dağılımı yerine diğer dağılımların kullanılması durumunda ortaya çıkabilecek hata oranları hesaplanmış olup, bulunan sonuçlar “Tablo 6” da gösterilmiştir.

Tablo 5. S17 Nolu Ekskavatöre İlişkin $M(t)$ Değerleri

Alt sistem	Uygun model	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8	t=9	t=10
Mekanik	Weibull	0.198	0.373	0.515	0.627	0.715	0.783	0.836	0.876	0.906	0.930
Elektrik	Lognormal	0.512	0.802	0.908	0.953	0.974	0.984	0.990	0.994	0.996	0.997

Tablo 6. Tamir İçin Ortalama Sürelere İlişkin Hata Oranları (%)

Dağılım	TİOS	Hata Oranları (%)
Üstel	3.9259	$100(3.9259 - 3.9362)/3.9362 = -0.26$
Normal	3.9259	$100(3.9259 - 3.9362)/3.9362 = -0.26$
Lognormal	4.3756	$100(4.3756 - 3.9362)/3.9362 = 11$

(*Uygun dağılım Weibull dağılımıdır)

“Tablo 6” incelendiğinde, Weibull dağılımı yerine üstel ya da normal dağılım kullanıldığında TİOS üzerinde önemli bir farklılık olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte Weibull dağılımı yerine lognormal dağılımın kullanılması durumunda, TİOS’ nde meydana gelen hata %11 seviyesinde gerçekleşmiştir.

TİOS’ un hassaslık analizinden sonra, farklı dağılımlar kullanılarak bakım kolaylığı hesaplamaları yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen $M(t)$ değerleri “Tablo 7” de verilmiştir.

Her dağılım için çeşitli süreler ($t=1,2,...10$) karşı $M(t)$ değerlerini gösteren “Şekil 7” den anlaşılacağı gibi, tamir süresi arttıkça $M(t)$ değerleri arasındaki fark gittikçe azalmaktadır. Bu nedenle uygun dağılımın kullanılmamasından dolayı ortaya çıkacak tahmin hatasının artan tamir süresi ile birlikte azaldığını söylemek de mümkündür.

“Tablo 7” de hesaplanan $M(t)$ değerlerine göre Weibull dağılımı yerine farklı dağılımlar kullanıldığında

her t değeri için oluşacak hata oranları “Tablo 8” de verilmiştir.

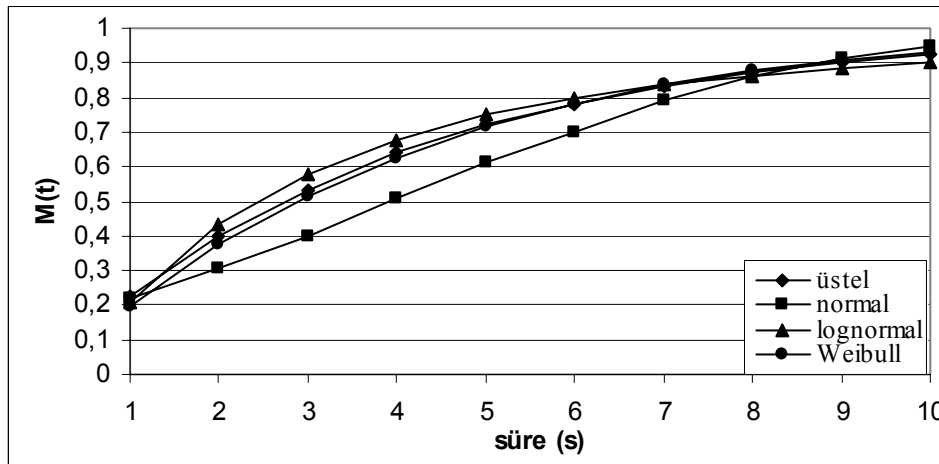
“Tablo 8”, uygun dağılım Weibull dağılımı olduğu halde normal dağılımın kullanılması durumunda genel olarak daha yüksek tahmin hatalarının ve üstel dağılım kullanılması durumunda da daha düşük tahmin hatalarının ortaya çıkacağını göstermektedir. (Yine tamir için ayrılan süre (t) arttıkça, farklı dağılımlara göre hesaplanan $M(t)$ ler arasında fark azalmaktadır.)

Yapılan bu hesaplamalardan anlaşılacağı gibi, hem TİOS hem de $M(t)$ hesaplamalarında Weibull dağılımı yerine üstel dağılımın kullanılması, normal ve lognormal dağılım kullanılmasına göre daha küçük bir hataya neden olmaktadır. Dolayısıyla Weibull dağılımının normal ve lognormal dağılıma karşı daha hassas olduğunu söylemek mümkündür.

Tablo 7. Farklı Dağılımlara Göre Mekanik Tamir Sürelerine İlişkin $M(t)$ Değerleri

Dağılım	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8	t=9	t=10
Üstel	0.225	0.399	0.534	0.639	0.720	0.783	0.832	0.870	0.900	0.922
Normal	0.221	0.305	0.401	0.508	0.614	0.701	0.794	0.860	0.912	0.947
Lognormal	0.209	0.433	0.579	0.677	0.749	0.797	0.837	0.864	0.885	0.903
Weibull*	0.198	0.373	0.515	0.627	0.715	0.783	0.836	0.876	0.906	0.930

(*Uygun dağılım Weibull dağılımıdır)



Şekil 7. Mekanik Tamir Sürelerine İlişkin 4 Teorik Dağılımın Çeşitli tamir Sürelerine Karşı $M(t)$ Değerleri

Tablo 8. $M(t)$ Değerleri İçin Hata Oranları (%)

Dağılım	(t:süre-saat)									
	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8	t=9	t=10
Üstel	13.64	6.97	3.69	1.91	0.70	0	-0.48	-0.68	-0.66	-0.86
Normal	11.62	-18.23	-22.14	-18.98	-14.13	-10.47	-5.02	-1.83	0.66	1.83
Lognormal	5.56	16.09	12.43	7.97	4.76	1.79	0.12	-1.37	-2.32	-2.90

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada GLİ' de kullanılan S17 nolu ekskavatörün geçmişteki mekanik ve elektrik alt sistemlerine ait tamir süreleri kullanılarak, bakım kolaylığı analizlerinin nasıl yapılacağı ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Analizin ilk aşamasında mekanik ve elektrik tamir sürelerinin bağımsız ve benzer dağılıma sahip oldukları ve dolayısıyla üstel, normal, lognormal ve Weibull dağılımı gibi teorik dağılımların kullanılmasında bir sakınca olmadığı tesbit edilmiştir. Analizin ikinci aşamasında bu tamir süreleri üzerinde bu dört dağılım denenmiş ve Kolmogrov-Smirnov testi aracılığıyla mekanik tamir süreleri için Weibull dağılımının, elektrik tamir süreleri için de lognormal dağılımın en uygun dağılımlar olduğu belirlenmiştir. Analizin üçüncü aşamasında mekanik ve elektrik arızalarına ilişkin bakım kolaylığı hesaplamalarına yer verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde elektrik arızası olması durumunda, arızanın verilen süreye eşit veya daha kısa sürede giderilebilme olasılık değerlerinin [M(t)] mekanik arızalara göre çok daha yüksek

düzeyde olduğu görülmüştür. Son aşamada ise, mekanik tamir süreleri üzerinde ele alınan dağılımların TİOS ve M(t) değerlerinin hassaslık analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar uygun dağılım Weibull olduğu halde üstel dağılımın kullanılmasının da çok fazla farklılığa neden olmayacağını göstermiştir.

Yapılan bu analizler sonucunda, mekanik ve elektrik tamir sürelerinin dağılımı incelenmiş ve olası bir arıza durumunda, arızanın giderilebilme olasılıklarının istatistiksel olarak nasıl hesaplanılabileceği ortaya konulmuştur. Sonuçlar incelendiği zaman mekanik bir arızanın %99 güvenle giderilme süresi 16.67 saat iken, elektrik arızasının %99 güvenle giderilme süresinin 6.97 saat olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar iş planlamasında ve mekanik arızanın giderilme süresinde zaman kaybına neden olan faaliyetlerin belirlenmesinin önemini göstermektedir. Ayrıca ileri bir çalışma olarak, söz konusu S17 nolu ekskavatörün arıza sürelerinin dağılımı da, yani güvenilirlik analizleri de benzer şekilde gerçekleştirilebilir. Böylece, geleceğe dönük kararların daha etkin bir şekilde alınması mümkün olabilir.

Ek 1. S17 NOLU EKSKAVATÖRÜN 2004 YILINA AİT MEKANİK ve ELEKTRİK TAMİR SÜRELERİ (Saat)

Mekanik tamir süreleri (n=54)						Elektrik tamir süreleri (n=16)	
3.15	5.45	1.30	12.05	1.10	0.30	1.00	0.35
1.40	0.20	2.30	2.00	1.30	8.00	1.45	0.45
2.30	3.25	1.00	3.30	2.00	1.10	0.40	0.30
7.15	0.30	2.20	3.40	1.00	5.30	0.30	3.20
1.00	7.25	1.30	5.50	4.15		1.00	2.50
8.45	1.15	4.25	3.50	0.30		2.10	0.45
11.45	1.20	1.05	2.45	6.55		2.10	
3.00	0.30	9.00	5.15	15.00		2.00	
6.15	0.30	16.30	2.50	4.30		2.25	
1.30	2.00	1.50	9.45	5.35		1.15	

KAYNAKÇA

- Dieter G., (1983). Engineering Design, McGraw-Hill Book Company, Japan.
- Ertek T., (1996). Ekonometriye Giriş, Beta Basım Yayım dağıtım A.Ş., İstanbul.
- Gujarati D. N., (1999). Temel Ekonometri, Literatür Yayıncılık, istanbul.
- Jones R., (1995). Risk-Based Manegement, Gulf Publishing Company, Houston.
- Kumar U., (1989). 'Availability Studies of Load-Haul_Dump Machines', 21 th Apcom Symposium, Ed. Weiss A. , 323-335.
- Kumar U. & Klefsjo B., (1991). 'Reliability Analysis of hydraulic systems of LHD Machines Using The Power Law Process Model', Reliability Engineering and System Safety, Elsevier Science Publishers Ltd., England, 217-224.
- Meyer P.L., (1978). Introductory Probability and Statistical Applications, Addison-Wesley Publishing company, USA.
- Özdamar K., (2002). Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi, Kaan Kitabevi, Eskişehir.
- Reliasof, (2005). System Analysis Reference 'Reliability, Availability and Optimization', www.Weibull.com, Reliasoft Publishing, 2005. Block Sim. 6, System Analysis Reference.
- Rao S.S., (1992). Reliability Based Design, McGraw Hill Inc., USA.
- Rothbart H.A., (1986). Mechanical Design and Systems Handbook, Mcgraw Hill Book Co..
- Vagenas N., Runciman N. & Clement S.R., (1997). 'A Methodology For Maintenance Analysis of Mining Equipment', International Journal of Surface Mining and Reclamation, Netherlands, 33-40.

Nevin UZGÖREN, 1967 yılında Eskişehir'de doğdu. 1988 yılında Lisansını (İstatistik Bölümü), 1991 yılında Yüksek Lisansını (İstatistik Anabilim Dalı) Anadolu Üniversitesi'nde ve 1996 yılında Doktorasını (İstatistik Anabilim Dalı) Osmangazi Üniversitesi'nde tamamladı. 1997 yılında Dumlupınar Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi'ne Yardımcı Doçent olarak atanmış olup, halen İşletme Bölümü Sayısal Yöntemler Anabilim Dalında görevine devam etmektedir. Evli ve iki çocuk annesi olan Nevin Uzgören'in ilgi alanları; Uygulamalı İstatistik, Ekonometri, Karar Teorisi ve Yöneylem Araştırmasıdır.

Sermin ELEVLİ, 1973 yılında Hollanda'da doğdu. Lisans (Maden Mühendisliği-1994), Yüksek Lisans (Maden İşletme ABD-1996) ve Doktora (Maden İşletme-2003) derecelerini Cumhuriyet Üniversitesi'nde aldı. 2004 yılından bu yana Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nde Yrd. Doç. Dr. olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk annesi olan Sermin Eevli'nin ilgi alanları; Maden Ekonomisi, Bakım Planlama ve İstatistiksel Süreç Kontrolü'dür.

Mehmet TAKSUK, 1967 yılında Kayseri – Develi'de doğdu. 1990 yılında İTÜ Maden Mühendisliği Bölümü'nden Lisans derecesini aldıktan sonra, aynı yıl TKİ-GLİ Müessesesi'nde maden mühendisi olarak göreve başladı. Halen aynı görevi yürütmekte olan Mehmet Taksuk, Yüksek Lisansını Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği ABD'nda tamamladıktan sonra 2004 yılında başlamış olduğu Doktorasına devam etmektedir.