

GÜVENİRLİK ANALİZLERİNE DAYALI ÖNLEYİCİ BAKIM PLANLANMASI

Yard.Doç.Dr.ARZU UZUN
Çukurova Üniversitesi
İİBF İşletme Bölümü
Balcalı /ADANA
garzu@cu.edu.tr

Dr.Ahmet ÖZDOĞAN
Anadolu Cam San. AS
Mersin Plant
Mersin/TURKEY
aozdogan@sisecam.com

ÖZET

İşletmeler, makine ve donanımlarını teknolojik gelişmelere paralel olarak yenilemekte ve değiştirmektedirler. İşletmeler açısından makine ve donanımlarını arıza yapmadan çalıştırmak ve süreç verimini bu şekilde yükseltmek giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bundan dolayı, makinelere uygulanacak olan bakımlar, bakımları geliştirecek metotlar ve duruş sürelerini kısaltmak için arıza bulma yöntemleri geliştirmek gerekmektedir. Yöntemleri geliştirirken maliyet, verim, değiştirme kararları, duruş süreleri vb. optimize edilmesi gereken birçok parametre mevcuttur. İşletmeler, ayrıca beklenilmeyen duruşlardan kaçınmak, arıza yapmadan makinelerin teknik özelliklerini korumaya devam ettirmek amacıyla sistem ve donanım güvenilirliklerini inceleyen modeller üzerinde çalışmaktadırlar. Altyapı olarak kurulması zor ve maliyet açısından pahalı olan güvenilirlik sistemleri uzun vadede süreçlerin güvenilir biçimde işlenmesini sağlayacaktır.

Bu çalışmada güvenilirlik analizine dayalı bir önleyici bakım uygulamasına yer verilmiştir. Örnek sistem ele alınarak, bir üretim hattının güvenirliliği ve bu sistemin alt parçası olan üretim makinesi ile ilgili bazı ekipmanların güvenirliliği ve bu ekipmanların duruş frekanslarından yararlanılarak belirli bir güvenirlilik katsayısı için ekipmanların optimum bakım zamanlarının belirlenmesi ve bakım maliyetlerine dayanarak bakım modelinin seçiminin nasıl yapılacağı konusunda uygulama yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bakım, Güvenirlilik Modelleri, Weibull Modeli Güvenirlilik Fonksiyonu, Önleyici Bakım

RELIABILITY ANALYSIS BASED ON PREVENTIVE MAINTENANCE PLANNING

ABSTRACT

Companies have been changing their machinery and equipments due to technological developments. However, the mechanical efficiency, despite the ever-evolving technology has not increased too much businesses to operate without malfunction of machinery and equipments and increase process efficiency in this manner is becoming

more important. In this context, maintenance of machines, methods to improve maintenance, to develop fault finding techniques and to shorten downtimes are becoming extremely important. Developing these methods, many parameters should be optimized like cost, efficiency, downtimes etc.

Whilst optimizing parameters, businesses are working on system and machine reliability models to avoid unexpected malfunctions and keep machines without failure to protect technical specifications. Despite infrastructure of reliability system setting is difficult and expensive, reliability systems will ensure reliable processing over long term.

In this study, preventive maintenance implementation based on reliability analyses is done. A sample system; a production line and sub-part of this system product machine equipments reliability is calculated utilizing frequency of malfunctions and for a given reliability coefficient, optimum maintenance time for equipments is figured out and also maintenance model is estimated based on maintenance cost applications are carried out

Keywords : Maintenance, Reliability Models, Reliability Function of Weibull Model, Preventive Maintenance

1. GİRİŞ

Teknolojide bilgi işlem ve otomasyon sistemlerinin gelişimi ile birlikte Üretim Yönetimindeki; Tam Zamanında Üretim ve Yalın Üretim gibi yeni yaklaşımların gerekli kıldığı yeni yapılanmalar, bakım faaliyetlerinin önemini de artırmıştır.

Bakım, her üretim kuruluşunda olması gerekli bir faaliyet olarak kabul edilirken, günümüzde ise şirketin gelir ve giderlerini etkileyen kritik bir işletme fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır (Jambekar, 2000, s.123).

İşletmelerde bakım hizmetleri, büyük yatırım yapılan teknolojik makine ve donanımlarını çalışır durumda korumak, toplam arıza sayısını düşürmek ve duruş maliyetlerini azaltmak için mevcuttur. Makine ve donanımlardaki arızalar süreçte duruşlara yol açacaktır. Arızalar; arızayı giderme sırasında duruştan dolayı oluşan üretim kaybı maliyetleri, inceleme ve tamir maliyetleri ve ürün kalitesinin düşmesi maliyetleri nedeniyle toplam maliyetleri yükseltecektir.

Beklenmeyen makine duruşları, arızaları şirketler için pahalı bir tecrübe olmakta ve büyük kayıplara da yol açabilmektedir. Kitlesel üretim, yeni üretim yaklaşımları; Tam Zamanında Üretim ve Çevik Üretim gibi hatanın dönüşü zor olan üretim sistemlerinde güvenilirlik (**reliability**), bakım yapılabilirlik (**maintainability**) ve bulunabilirlik (**availability**) problemleri kritik önem arz etmektedir.

Günümüz teknolojisi ve üretim tekniklerindeki gelişmeler otomasyona olan bağlılığın sürekli artmasına sebep olmuştur. Sürekli olarak artan sistem karmaşıklığı, sistem ve sistemi oluşturan makinelerin güvenilirliğini önemli bir konu haline getirmiştir. İşletmeler tarafından daha ciddi algılanan güvenilirlik felsefesi bir süreç mantığına benzemiştir.

2. İŞLETMELERDE BAKIM VE BAKIM POLİTİKALARI

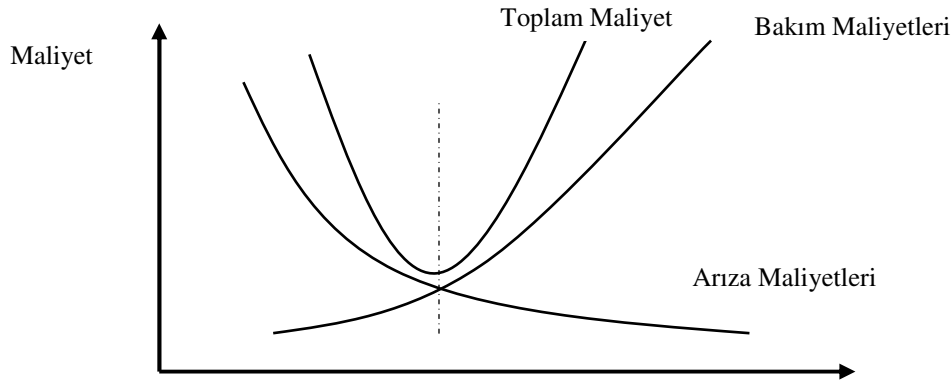
Bakım, fonksiyonel bir birimin (aygıt, araç, gereç, tesis, vb.), önceden belirlenmiş koşullarda beklenen işlevlerini yerine getirmek üzere test etme, parça değiştirme, ayarlama, tamir etme gibi faaliyetlerle düzeltilmesi ve devamlılığının sağlanmasıdır. Diğer bir ifadeyle, fonksiyonel bir birimi, belli bir durumda tutmayı, eski

durumuna getirmeyi ya da belli işleyiş özellikleri kazandırmayı sağlayan işlemlerin tümüdür. Modifikasyon bir bakım faaliyeti değildir (Lyonnet,1991).

Bakım, geleneksel felsefede yüksek maliyet gerektirdiği için fayda sağlanamayan bir yapı olarak değerlendirilmekteydi. Ancak yeni felsefede varlık bulunabilirliğinin korunması ve geliştirilmesi, üretim verimliliğinin ve etkinliğinin iyileştirilmesi, toplam işletme maliyetlerine katılımı ve ürünlerin kaliteli, zamanında üretilmesine yardımcı olması nedeniyle stratejik önemi artmıştır.

Bakım, üretim bütçesine bağlı olarak gerekli harcamaların yapılması zorunlu bir faaliyet olması nedeniyle, maliyet azaltma programları arasında çoğunlukla ilk sırada yer almaktadır (Tsang, 2002, s.7) .Bütçeler azaldıkça, şirketler küçüldükçe ve ürün değişkenlikleri artıkça modern endüstri “az kaynak ile daha fazlasını yapmak” durumu ile karşı karşıya kalmıştır. Endüstriyel ekipmanların çoğu için başlangıç tasarım performansından daha üst düzeylerde performans beklenmekte ve gerçek hayatta da bu şekilde çalıştırılmaktadırlar (Cassady, vd, 2001, s.104). Bakım felsefesi sadece arızanın giderilmesi fonksiyonundan, donanımın çalışmasına ve sistem güvenilirliği felsefesine kaymıştır. Bu yüzden bakım yönetimi teknik sistemlerin (fabrika, makine, donanım ve tesisler) yaşam ömürlerinin her kademesinde bulunmalı ve satınalma, planlama, üretim, araştırma geliştirme, performans değerlendirme, değiştirme ve bertaraf vb. konularında mutlaka değerlendirilmelidir. Daha geniş anlamda, bakım fonksiyonu “fiziksel varlık yönetimi” kapsamında ele alınır (Tsang, vd, 1999, s.692 içinde Murray,1996).

Bakımın amacı işletmede bulunan her türlü bakımı yapılan makine ve donanımlarının ne şartlarda olursa olsun arıza yapmadan çalışmasını sağlamaktır. Dikkat edilmesi gereken, “ne şartlarda olursa olsun” anlamından, “ne maliyetle olursa olsun” anlamını çıkartmamak gerekir. Daha ziyade amaçlanması gereken, artan bakım karmaşıklığının artan maliyetleri ile birlikte artan yüksek arıza oranları sonucunda oluşan maliyetleri gözönüne alarak optimum bir durum oluşturmaktır (Şekil 1).



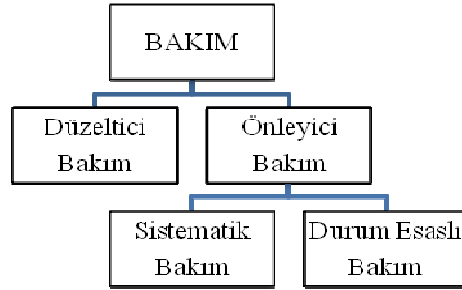
Şekil 1 : Bakım ve Arıza Maliyetleri

Kaynak :Lyonnet,P.,*Maintenance Planning:Methods and Mathematics*, Chapman&Hall, 1991, s: 2

Optimum noktayı yakalamak için bakım bölümünde çalışan personelinin bakım çeşitleri konusunda bir fikri olması ve her duruma göre uygun bir seçimin yapılması gerekir.

Geleneksel anlamda bakım, kırılan ve bozulan parçaların tamiri veya değiştirilmesi olarak algılanır. Bu anlayış arıza bakımı veya düzeltici bakım gibi reaktif bir yaklaşımı göstermektedir. Günümüzde bakım, düzenli servis, periyodik inceleme ve gözetleme, koruyucu değiştirme ve durum esaslı inceleme gibi proaktif yaklaşımları içeren geniş bir anlayışa sahip olmuştur.

Bakım çeşitleri bakım felsefelerinin gelişimine paralel olarak ortaya çıkmıştır. Bakım faaliyetleri farklı bakım türleri ile gerçekleştirilir. İşletmelerde gerçekleştirilen bakım faaliyetleri Şekil 2’de sınıflandırılmıştır (Lyonnet, 1991).



Şekil 2: Bakım Türleri

Kaynak :Lyonnet,P.,*Maintenance Planning: Methods and Mathematics*, Chapman&Hall, 1991, s: 3.

Bakım faaliyetleri “Düzeltilici Bakım” ve “Planlı Bakım” olmak üzere ikiye ayrılabilir. Düzeltilici Bakım, bir arızayı düzeltmek ya da ortadan kaldırmak için yapılır. Bu faaliyetler kapsamında tamir, parça değiştirme, yenileme faaliyetleri yer alır. Genellikle küçük işletmelerde ve henüz bakım planlaması yapacak teknik düzeye ulaşmamış işletmelerde uygulanan yöntemdir.

Planlı bakım faaliyeti olan Önleyici Bakım, fonksiyonel bir birimin gelecek bir dönemde arızalanıp arızalanmayacağını değerlendirmek ve bu arızanın engellenmesi için gerekli önlemlerin alınması esasına dayanan bakım politikasıdır. Önleyici Bakım, “Sistemantik Bakım” ve “Durum Esaslı Bakım” olmak üzere ikiye ayrılır. Sistemantik Bakım, makine veya donanımın arıza olasılığını düşürmeyi amaçlar, zaman tabanlıdır. Amaç sistemin performansını orijinal seviyesinde korumaktır. Durum esaslı bakımda yapılan teşhis çalışması sonrasında parçanın durumunu görerek, değiştirilip değiştirilmeyeceğine karar verilir. Bir donanımı değiştirmek için makineyi kapatılarak üretimi durdurmak hem zaman kaybı, hem de üretim kaybı nedeniyle pahalı bir durumdur.

Makinelerin üretim açısından kritikliği, makine tipleri, sürekli veya aralıklı çalışma durumu, arıza veya problemin oluşum sıklığı, çalışma ve çevre şartları vb. konular dikkate alınarak uygun yöntem seçilmeli ve maliyet fayda analizi yapılmalıdır.

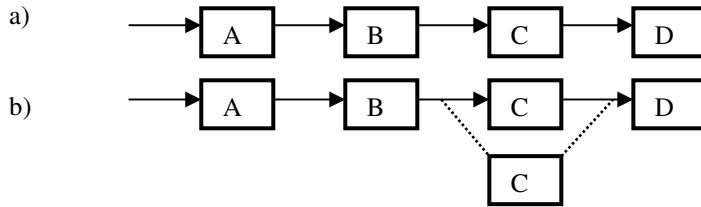
3. GÜVENİRLİK KAVRAMI VE ANALİZİ

Güvenirlilik, ürünün teknik özelliklerini karşılamaya devam etme olasılığı ve belirli koşullar altında, belirli bir zamana kadar hatasız olarak fonksiyonlarını yerine getirebilmesidir. Dolayısıyla, güvenirlilik zamana ve koşullara bağlı bir fonksiyondur. Marka imajı sağlanması, müşteri memnuniyeti ve beklentilerinin karşılanması, işin devamlılığının sağlanması, maliyet ve rekabet avantajı açısından önem taşır.

Güvenirlilik esaslı bakım, sistem fonksiyon maliyetini etkin olarak korurken üretim faaliyetleri içerisinde herhangi bir fiziksel varlığın bakım gereksiniminin belirlenmesi için bir yapı sağlar. Sistem fonksiyonların ve fonksiyonel arızaların belirlenmesi ile birlikte arıza modu ve etkileri analizi güvenirlilik esaslı bakımın önemli araçlarıdır.

Güvenirlilik, tasarım aşamasından başlanılarak, imalat ve kullanma sürecinde analiz edilen ve geliştirilen bir kavramdır. Bakım mühendisleri sistemin daha güvenilir çalışması için çaba gösterir. Daha güvenilir olabilme, parçaların tasarımında daha güvenilir teknoloji kullanma ya da sistem - alt sistem içerisindeki parçaların yapılarılarına bağlıdır.

Bir ürünün üretilmesi için, üretildiği hatta bulunan bir makinenin çalışabilmesi kendinden bir önceki makinenin çalışmasına bağlıdır. Şekil 3-a'da üretilen ürün, akış gereği olarak sırasıyla A,B,C,D makinelerinden geçmektedir. Bu makinelerden birisi durduğunda sistem duracak ve üretim kaybı yaşanacaktır. Potansiyel kaybı azaltmak için kritik makinelere paralel bağlı eş makineler bağlanır. Şekil 3-b'deki C makinesi kritik üretim ekipmanı olarak kabul edilirse, C'deki bir arıza ve duruş durumunda C'ye paralel bağlanan stand-by (beklemedeki) makine devreye girerek hatta bir duruş meydana gelmeksizin üretim kaybı engellenecektir.



Şekil 3: Kritik Donanım Yapılanışı

Sistemler, kendilerinden beklenen fonksiyonları gerçekleştirmek üzere tasarlanmış ve organize edilmiş parçalardan, bileşenlerden ve alt sistemlerden oluşur. Birbirlerine paralel ve seri olarak bağlanmış alt sistemlerden meydana gelirler. Alternatif donanım yapıları farklı maliyet, yer gereksinimi, güvenirlilik seviyeleri vb. sonuçlar doğurabilir (Jardine, 1973, s.167-271). (Şekil 3)

3.1. Seri Yapılanışlar

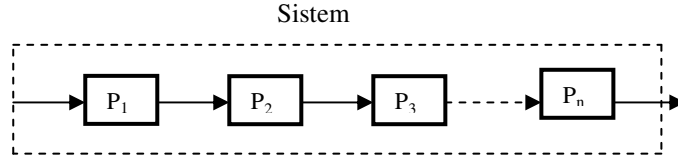
Bu dizilişte donanımlar birbirine ardı ardına sıralanır (Şekil 4).

p_i ; i parçanın başarılı çalışma olasılığı olarak adlandırılır ise;

Sistemin güvenilirliği;

$$R_s = p_1 \times p_2 \times p_3 \dots \times p_n = \prod_{i=1}^n p_i$$

eşitliği ile hesaplanır.



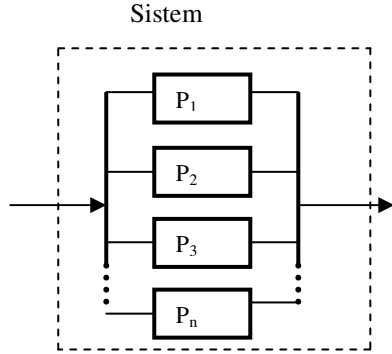
Şekil 4: Seri Yapılanış

Kaynak : J.P.Bentley, Reliability&Quality Engineering,Longman Scientific&Technical, John Wiley&Sons, 1993, s:31.

3.2. Paralel Yapılanışlar

Bu dizilişte donanımlar birbirine paralel olacak şekilde sıralanır. Sistem tek bir i parçası başarılı çalışana kadar çalışmaya devam edecektir (Şekil 5).

p_i ; i. parçanın başarılı çalışma olasılığı olarak adlandırılır ise,



Şekil 5: Paralel Yapılanış

Kaynak : J.P.Bentley, Reliability&Quality Engineering,Longman Scientific&Technical, John Wiley&Sons, 1993, s:33.

Sistemin güvenilirliği ;

$$\begin{aligned} R_s &= 1 - \text{sistemin durma olasılığı} \\ &= 1 - (1-p_1) (1-p_2) (1-p_3) \dots (1-p_n) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n q_i \quad (q_i = i. \text{ parçanın arıza olasılığı; } q_i = 1-p_i) \end{aligned}$$

eşitliği ile elde edilir.

Seri ile paralel yapıları karşılaştırılırsa;

1. Seri sistemin güvenilirliği, en zayıf güvenilirliğe sahip tek bir parçanın güvenilirliğinden daha küçüktür.
2. Paralel sistemin güvenilirliği ise güvenilirliği en yüksek olan parçadan bile daha yüksektir.

3.3. Güvenirlilik Modelleri

Bir sistemin – üretim hattının veya onu oluşturan alt sistemlerin, makinelerin- güvenilirlik fonksiyonlarının hesaplanmasında çeşitli güvenilirlik modelleri kullanılır.

Sıkça kullanılan modeller;

- Üstel Dağılım (sabit hata oranları için)
- Weibull Dağılımı (sabit, artan ya da azalan hata oranları için)
- Lognormal Dağılım (artan sonra azalan hata oranları için)
- Normal Dağılım (artan hata oranları için)
- Diğerleri (Gamma, Logistic, Gumbell, Competing Failure Mode)

Hesaplamalarda birçok model test edilerek hangi model yeterli sonuç veriyor ise o modeli seçmek en uygun olacaktır. Ayrım 4'te yer alan örnekte, uygulamada da yoğun şekilde kullanılan Weibull dağılımı kullanılmıştır. Modelin açıklanmasından önce, modelde kullanılan fonksiyonlar tanımlanacak olursa (Smith,2001);

Anlık arıza oranı ; $\lambda(t)$

$\lambda(t) \Delta(t)$: t zamanında doğru çalışan fakat (t,t+ Δt) aralığında arıza gösterme olasılığı

Arıza dağılım fonksiyonu ; $f(t)$

$f(t) \Delta(t)$: 0-t aralığında arıza göstermemiş fakat (t,t+ Δt) aralığında arıza gösterme olasılığı

Kümülatif arıza dağılım fonksiyonu ; $F(t)$

$F(t)$: 0-t aralığında arıza gösterme olasılığı

Güvenirlilik fonksiyonu ; $R(t)$

$R(t)$: 0-t aralığında arıza gösterme olasılığı .(örnek ; ekipman t zamanı sonuna kadar çalışacak)

Yukarıdaki fonksiyonların birbirleri arasındaki temel ilişkiler :

1. $f(t) = R(t) \lambda(t)$
2. parça (0-t) aralığında arıza gösterme veya göstermeme durumunda
 $F(t) + R(t) = 1$
3. parçanın (0,t+Δt) aralığında arıza göstermesi durumunda

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ya (0-t) aralığında arıza gösterecek (olasılık; F(t))} \\ \text{ya da (0-t) aralığında arıza göstermeyecek fakat (t, t + Δ(t))' de} \\ \text{arızalanacak. (olasılık ; f(t) Δ(t))} \end{array} \right.$$

Dolayısıyla ; $F(t+\Delta t) = F(t) + f(t) \Delta t$
 $f(t) = \{ F(t+\Delta t) - F(t) \} / \Delta t$
 $\Delta t \rightarrow 0$ için $f(t) = dF(t) / dt$

4. Yukardaki 3. eşitlikten ;
 $dF / dt = f(t) = R(t) \cdot \lambda(t) = 1 - \{F(t)\} \lambda t$
 $\lambda(t) d(t) = d(F) / (1-F) = - d[\ln(1-F)]$

ve

$$F(t) = - \exp \left\{ - \int_0^t \lambda(u) du \right\} , t = 0 \text{ iken } F(t) = 0$$

elde edilir.

Diğer önemli bir parametre ise, arızalar arasındaki ortalama süre (mean time between failure - MTBF)'dir. Arızalanmadan çalışmanın beklenen değeridir. Matematiksel olarak,

$$MTBF = E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

$$MTBF = E(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

şeklinde ifade edilir.

Weibull modeli özel durumlar için kullanılan diğer güvenilirlik modellerin aksine genel bir modeldir. Arıza dağılım fonksiyonu;

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left\{ - \left(\frac{x - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right\}$$

β, **η** ve **γ** parametreleri sırayla şekil, ölçek (zaman ya da uzunluk boyutu) ve yer parametrelerini temsil eder.

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp \left[- \left\{ (t - \gamma) / \eta \right\}^\beta \right] ; \lambda(t) = f(t) / R(t) = (\beta / \eta) (t - \frac{\gamma}{\eta})^{\beta-1}$$

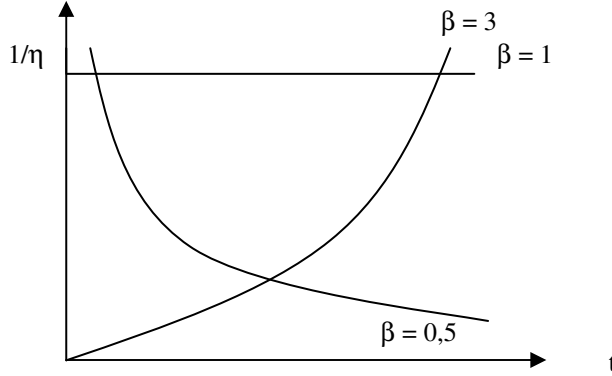
$\lambda(t)$ ile ilgili ifadeden eğer ;

$\beta < 1$, $\lambda(t)$ t'nin azalan bir fonksiyonudur.

$\beta = 1$, $\lambda(t)$ sabit ve $1/\eta$ 'ye eşittir (Weibull, negatif üssel dağılıma denktir).

$\beta > 1$, $\lambda(t)$ t'nin artan bir fonksiyonudur (1'den uzaklaştıkça Weibull normal dağılıma yaklaşır).

Yukarıda belirtilen her üç durum için $\lambda(t)$ grafiğine Şekil 6'da yer verilmiştir.



Şekil 6: Weibull Dağılımı $\gamma = 0$

Kaynak :Lyonnet,P., *Maintenance Planning: Methods and Mathematics*, Chapman&Hall, 1991.

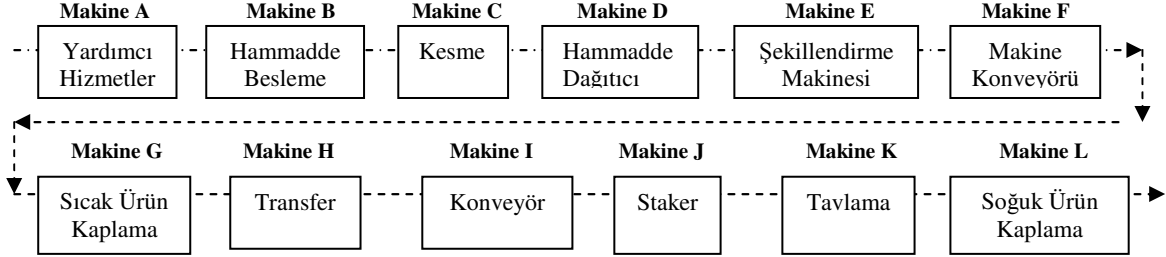
Weibull modelini herhangi bir olaya uygulamak için öncelikle parametrelerin uygun bir şekilde belirlenmesi gerekir. Bu amaçla iki yöntem mevcuttur. Biri diferansiyel eşitlikleri içeren ve çözümü zor olan, tamamen hesaplamaya dayalı bir yöntemdir; diğeri ise, Allen Plait metodu olarak isimlendirilen grafiksel yöntemdir (P.Lyonnet, 1991).

4. GÜVENİRLİK ANALİZİNE DAYALI ÖNLEYİCİ BAKIM PLANLAMASI UYGULAMASI

4.1. Uygulama Yapılan İşletme Hakkında Genel Bilgiler

Bu çalışmada, 15 ayrı üretim hattı kapasitesine sahip bir cam üretim tesisinin yalnızca bir üretim hattı incelenmiştir. Söz konusu üretim hattında ayrı ayrı işlevleri yerine getiren birbirine seri bağlı 12 makine bulunmaktadır (Şekil 7).

Akış gereği bir makinenin çıktısı, bir sonraki makinenin girdisini oluşturmaktadır. Üretim sürecine göre yerleşimin esas olduğu bu üretim hattında 12 makineden birinin durması halinde üretim de durmaktadır. Tesis yılda 365 gün, günde 24 saat olmak üzere hiç durmaksızın üretim yapmaktadır. Ancak, zaman zaman planlı ya da plansız duruşlar da yaşanmaktadır. Geçmiş veriler incelendiğinde, duruşların toplam çalışma süresine oranı yaklaşık %3 olarak belirlenmiştir.



Şekil 7: Üretim Hattı Makine Parkı

4.2. Fiili Verilere Dayalı Güvenilirlik Analizi ve Önleyici Bakım Planlaması

Uygulamanın gerçekleştirildiği üretim hattının üç yıllık verileri kullanılarak, makinelerin duruş frekansları, arızasız çalıştıkları süreler ve duruş süreleri “SPSS 10.0”

istatistik paket programı yardımıyla analiz edilmiş, güvenilirlik fonksiyonları $R(t)$ araştırılmıştır. Güvenilirlik fonksiyonlarının “Weibull” dağılımına uyduğu belirlenmiştir. Dağılımların oran (η) ve şekil (β) parametreleri hesaplanarak, herhangi bir t zamanına ilişkin güvenilirlik fonksiyonları

$$R(t) = \exp \left[- \left\{ (t - \gamma) / \eta \right\}^\beta \right]$$

şeklinde elde edilmiştir. Makinelerin ilgili parametre değerleri ile birlikte güvenilirlik fonksiyonları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1 : Makine Güvenilirlik Fonksiyonları

Makine	Parametre Değerleri		Güvenilirlik Fonksiyonu
A	η	64,66	$R_A(t)=\exp[-(t/64,66)^{1.238}]$
	β	1,238	
B	η	42,504	$R_B(t)=\exp[-(t/42.50)^{1.335}]$
	β	1,335	
C	η	60,30	$R_C(t)=\exp[-(t/60.30)^{1.143}]$
	β	1,143	
D	η	78,09	$R_D(t)=\exp[-(t/78.09)^{1.075}]$
	β	1,075	
E	η	166,43	$R_E(t)=\exp[-(t/166.43)^{1.238}]$
	β	1,820	
F	η	132,86	$R_F(t)=\exp[-(t/132.86)^{1.820}]$
	β	3,058	
G	η	25,53	$R_G(t)=\exp[-(t/25.53)^{1.083}]$
	β	1,083	
H	η	41,31	$R_H(t)=\exp[-(t/41.31)^{1.619}]$
	β	1,619	
I	η	0	$R_I(t)=1$
	β	0	
J	η	38,13	$R_J(t)=\exp[-(t/38.13)^{1.258}]$
	β	1,258	
K	η	0	$R_K(t)=1$
	β	0	
L	η	528,62	$R_L(t)=\exp[-(t/528.62)^{12.73}]$
	β	12,73	

Güvenilirlik fonksiyonları ile, ilgili t değerlerine karşılık gelen makine güvenilirlikleri yüzdesel (%) olarak hesaplanmaktadır. Tablo 2’de t=20 gün için örnek hesaplamaya yer verilmiştir.

Tablo 2 : Makine Güvenilirlikleri (t = 20gün)

	Mak A	Mak B	Mak C	Mak D	Mak E	Mak F	Mak G	Mak H	Mak I	Mak J	Mak K	Mak L
R(t)	79,14	69,38	75,33	79,35	97,91	99,69	46,41	73,42	100	64,14	100	100

Tablo 2’deki makine güvenilirlikleri incelendiğinde, özellikle, yatırım maliyetinin en fazla olduğu ve üretimin göreceli olarak büyük hacimlerde gerçekleştirildiği E makinesinin güvenilirliğinin %97,9 olduğu görülmektedir. Üretim hattında bulunan diğer birçok makineye göre güvenilirlik oranı yüksektir. Ancak, üretim hattının seri yapılanış olması nedeniyle, genel olarak sistem güvenilirliği

$$R_{\text{sistem}}=R_A * R_B * R_C * R_D * R_E \dots \dots \dots * R_L$$

eşitliği ile hesaplandığından, üretim hattında B, G ve J makinelerinin güvenilirliklerinin düşük olması nedeniyle üretim hattının güvenilirliği de olumsuz şekilde

etkilenmektedir. Dolayısıyla, üretim hattının güvenilirliği (R_{sis}) % 7'dir. Uygulama kapsamında, üretim hattında yer alan makinelerin güvenilirliklerinin en az %70 olması için yapılması gereken önleyici bakımın periyotları, güvenilirlik fonksiyonlarından yararlanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara Tablo 3'te yer verilmiştir.

Tablo 3: Makine Önleyici Bakım Periyotları

MAK	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Periyot (saat)	674	470	588	717	2265	2275	236	524	∞	403	∞	11703

Tablo 3'e göre, Makine I ve Makine K için herhangi bir önleyici bakım çalışmasına gerek olmadığı, yalnızca düzeltici bakım yapılması uygun olduğu görülmektedir.

4.3. Önleyici Bakım Çerçevesinde Değiştirilme Zaman Aralıklarının Belirlenmesi

Uygulamanın bu bölümünde, yatırım maliyetinin en fazla olduğu ve üretimin göreceli olarak büyük hacimlerde gerçekleştirildiği E makinesine ilişkin 9 donanım incelenmiştir. Donanımların optimum değiştirilme zaman aralıklarının hesaplanabilmesi için grafik yöntem kullanılacaktır.

E Makinesinin donanımlarının duruş frekansları, arızasız çalıştıkları süreler ve duruş süreleri de "SPSS 10.0" istatistik paket programı yardımıyla analiz edilmiş, güvenilirlik fonksiyonları $[R(t)]$ araştırılmıştır. Güvenilirlik fonksiyonlarının "Weibull" dağılımına uyduğu belirlenmiştir. Donanımların ilgili parametre değerleri ile birlikte güvenilirlik fonksiyonları Tablo 4'de verilmiştir.

Donanımların önleyici bakım maliyetlerinde; makineyi durdurma maliyeti, donanım değiştirme maliyeti ve bakım için harcanan işçilik maliyetleri ele alınmıştır. Düzeltici bakım maliyetlerinde ise, makineyi durdurma maliyeti, donanım değiştirme maliyeti, bakım için harcanan işçilik maliyet ve hatalı ürün maliyetleri dikkate alınarak,

$$\begin{aligned} \text{Önleyici Bakım Maliyeti} &= \text{Makineyi Durdurma Maliyeti} + \text{Donanım Değiştirme Maliyeti} + \text{İşçilik Maliyeti} \\ \text{Düzeltilici Bakım Maliyeti} &= \text{Makineyi Durdurma Maliyeti} + \text{Donanım Değiştirme Maliyeti} + \text{İşçilik Maliyeti} + \text{Kusurlu Ürün Maliyeti} \end{aligned}$$

şeklinde hesaplanmıştır.

Tablo 4 : E Makinesi Donanımlarının Güvenilirlik Fonksiyonları

Donanım	Parametre Değerleri		Güvenilirlik Fonksiyonu
1	η	87,47	$R_1(t)=\exp[-(t/87.47)^{0.792}]$
	β	0,792	
2	η	169,93	$R_2(t)=\exp[-(t/169.93)^{1.650}]$
	β	1,650	
3	η	82,17	$R_3(t)=\exp[-(t/82.17)^{1.174}]$
	β	1,174	
4	η	34,95	$R_4(t)=\exp[-(t/34.95)^{1.795}]$
	β	1,795	
5	η	0	$R_5(t)=1$
	β	0	
6	η	166,30	$R_6(t)=\exp[-(t/166.30)^{1.880}]$
	β	1,880	
7	η	148,07	$R_7(t)=\exp[-(t/148.07)^{1.802}]$
	β	1,802	
8	η	83,31	$R_8(t)=\exp[-(t/83.31)^{1.112}]$
	β	1,122	
9	η	90,541	$R_9(t)=\exp[-(t/90.541)^{1.124}]$
	β	1,124	

E makinesinin donanımlarının önleyici ve düzeltici bakım sürelerinin hesaplanmasında kullanılacak genel maliyet değerleri ise Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5 : Önleyici ve Düzeltici Bakım Maliyet Değerleri

İşçilik Maliyeti (TL/dakika)	0.10
Kusurlu Ürün Maliyeti (TL)	135.00
Önleyici Bakım-Makineyi Durdurma Maliyeti(TL/dak)	0.70
Düzeltilici Bakım-Makineyi Durdurma Maliyeti(TL/dak)	2.80

Donanımlara ait önleyici bakım ve düzeltici bakım maliyetlerinin hesaplanabilmesi için, bakım yapıldığı takdirde ekipmanların değişim süreleri ve donanım değişim maliyetleri geçmiş dönem verileri analiz edilerek elde edilmiş ve ilgili değerler Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6 : E Makinesinin Donanımlarının Değişim Süreleri ve Maliyetleri

	Düzeltilici Bakım Yapıldığı Zaman Donanımın Ortalama Değişim Süresi (dakika)	Önleyici Bakım Yapıldığı Zaman Donanımın Ortalama Değişim Süresi (dakika)	Donanım Değişim Maliyeti (TL)
DONANIM 1	35	10	75.50
DONANIM 2	21	10	43.60
DONANIM 3	21	15	23.40
DONANIM 4	28	15	15.00
DONANIM 5	26	15	6.40
DONANIM 6	26	10	27.50
DONANIM 7	18	10	15.00
DONANIM 8	20	15	47.40
DONANIM 9	20	10	43.60

Örnek olması bakımından Donanım 1 için, önleyici bakım maliyeti, düzeltici bakım maliyeti ve maliyet oranı ;

$$\begin{aligned} \text{Önleyici bakım maliyeti} &= (10 \cdot 0.70) + (75.50) + (10 \cdot 0.10) \\ \text{Önleyici bakım maliyeti} &= 83.50 \text{ TL} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Düzeltilici Bakım Maliyeti} &= (35 \cdot 2.80) + (75.50) + (35 \cdot 0.10) + (135.00) \\ \text{Düzeltilici Bakım Maliyeti} &= 312.00 \text{ TL} \end{aligned}$$

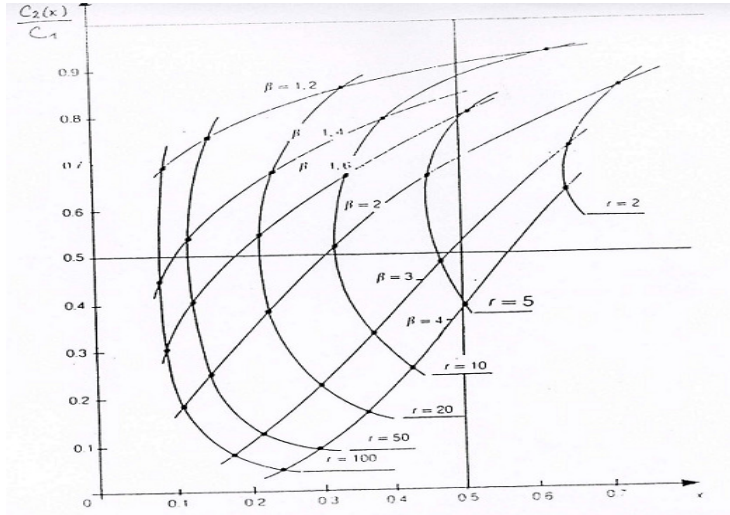
$$\begin{aligned} r &= \text{Düzeltilici Bakım Maliyeti} / \text{Önleyici Bakım Maliyeti} \\ r &= 312,00 / 83,50 = 3,73 \end{aligned}$$

biçiminde hesaplanarak, diğer ekipmanlar için benzer hesaplamalar yapılmış ve Tablo 7 elde edilmiştir.

Tablo 7: Donanımların Önleyici Bakım Maliyetleri, Düzeltici Bakım Maliyetleri ve Maliyet Oranları

	Önleyici Bakım Maliyeti (YTL)	Düzeltici Bakım Maliyeti (YTL)	" r " Katsayısı
DONANIM 1	83,50	312,00	3,74
DONANIM 2	51,60	239,50	4,64
DONANIM 3	35,40	219,30	6,19
DONANIM 4	27,00	231,20	8,56
DONANIM 5	18,40	216,80	11,78
DONANIM 6	35,50	237,90	6,70
DONANIM 7	23,00	202,20	8,79
DONANIM 8	59,40	240,40	4,05
DONANIM 9	51,60	236,60	4,59

Şekil 8'de farklı Weibull β parametre değerleri ile maliyet oranları için çizilmiş eğri aileleri yer almaktadır. Bu eğriler yardımıyla ($\chi = t/\eta$) bağımsız değişkeni dolayısıyla, optimum değiştirme aralığı hesaplanabilmektedir (Lyonnet,1991).



Şekil 8 : Weibull B Parametresi ve Maliyet Oran Grafiği

Kaynak : Lyonnet,P., *Maintenance Planning: Methods and Mathematics*, Chapman&Hall, 1991, s: 121.

Donanım 1 için Şekil 8'deki grafik esas alınarak, daha önceden hesaplanmış olan $\beta = 0,792$ (Tablo 4) ve $r = 3,74$ (Tablo 7) kullanılarak χ katsayısı yaklaşık 0,7 olarak belirlenir. χ katsayısının oran parametresi $\eta = 87,47$ (Tablo 4) ile çarpımından optimum değiştirilme aralığı 61 gün olarak bulunur. Diğer ekipmanlar içinde aynı şekilde hesaplamalar yapılarak Tablo 8'deki optimum değiştirilme süreleri elde edilir.

Tablo 8 : Önleyici Bakım Kapsamında Optimum Değiştirilme Aralığı

Donanım No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Değiştirilme Aralığı (gün)	61	119	49	16	∞	80	70	58	63

5. SONUÇ

Bakım, bir işletmede hem donanımın çalışma süresini hem de üretim maliyetlerini artırır. Donanım çalışma sürelerinin artması işletmelerin performans ve üretim verimliliklerinin artmasını sağlar. Bakım faaliyetlerinde yapılacak gelişmeler de sürecin verimliliğini, toplam maliyetleri ve ürün kalitesini olumlu yönde etkileyerek ve firmalara rekabet avantajı kazandırır.

Üretim sistemleri, başlangıç aşamasından itibaren operasyonel etkinlik sağlayacak şekilde güvenilirlik, bakım yapılabilirlik, desteklenebilirlik ölçütleri de göz önüne alınarak tasarlanmalıdır.

Çalışmada bakım politikaları ve türleri, bakım yönetimi için faydalı olacak araçlar, güvenilirlik modelleri ve örnek bir üretim hattı incelenmiştir. Birbirine seri bağlı 12 makineden oluşan bir üretim hattında üretim kaybına yol açan duruşların frekansları, arızasız çalıştıkları süreler ve duruş süreleri çıkarılarak her bir makinenin güvenilirlik fonksiyonları hesaplanmıştır. Fonksiyonlar oluşturulduktan sonra herhangi bir t zamanı için makinenin güvenilirlik değerleri ve sistemin güvenilirliği bulunmuştur. Daha sonra E Makinesinin donanımları üzerinde farklı bir çalışma yapılarak β , η , r (Düzeltilici Bakım Maliyeti / Önleyici Bakım Maliyeti) değerleri kullanılarak bu donanımların optimum değişim zamanları hesaplanmıştır.

Yapılan çalışma, süreçlerin sorunsuz işleyebilmesi için uygulanacak olan bakım faaliyetleri ile güvenilirlik modellerinin birlikte ele alınması gerektiğini göstermiştir. Üretim makinelerinde güvenilirlik hesaplamaları ile makine donanımlarının önleyici bakım zamanları belirlenebilmiştir.

KAYNAKÇA

1. Bentley J.P.(1993), Reliability&Quality Engineering,Longman Scientific&Technical S., John Wiley&Sons, Malaysia, 1993.
2. Cassidy C.R.,Pohl,E.A. & Murdock W.P.,(2001), "Selective Maintenance Modeling for Industrial Systems", Journal of Quality in Maintenance Engineering,Vol 7 ,No:2,pp 104-117.
3. Crocker J.,(1999), "Effectiveness Of Maintenance" Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol 5 ,No:4, pp 307-313.

4. Cross M.,(1988), "Raising the Value of Maintenance in the Corporate Enviroment", Management Research News, Vol 11, No:3, pp 8-11.
5. Dekker R., (1996), "Application Of Maintenance Optimization Models ; A Review And Analysis" Reliability Engineering and System Safety, Vol 51,pp 229-40.
6. Jambekar A.B, (2000) , "A Systems Thinking Perspective Of Maintenance, Operations,and Process Quality" , Journal of Quality in Maintenance Engineering,Vol 6 ,No:2,pp 123-132.
7. Jardine A.K.S., (1973), "Maintenance Replacement and Reliability", Pitman,USA.
8. Lyonnet,P., (1991), *Maintenance Planning:Methods and Mathematics* , Chapman&Hall
9. Moubray J.,(1997), "Reliability Centered Maintenance, 2nd ed.", Butterworth-Heinemann,Oxford.
10. Smith,D.J.,(2001), "Reliability, Maintainability & Risk" Butterworth-Heinemann,Oxford.
11. Tsang A.H.C, Jardine A.K.S & Kolodny,H. (1999),"Measuring Maintenance Performance : A Holistic Approach" International Journal of Operation & Production Management, Vol 19,No:7,pp.691-715.
12. Tsang A.H.C.,(2002),"Strategic Dimensions Of Maintenance Management", Journal of Quality in Maintenance Engineering,Vol 8 ,No:1,pp 7-39.

