

PhD Research Article / Doktora Çalışması Araştırma Makalesi  
**THE EFFECT OF PAPER DRYNESS TO THE NUMBER OF DRYING  
CYLINDER IN DRYING CYLINDERS**

**Andaç YAKUT<sup>\*1</sup>, Galip TEMİR<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim dalı, Yıldız-İSTANBUL

<sup>2</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL

Received/Geliş: 20.04.2012 Accepted/Kabul: 06.09.2012

---

**ABSTRACT**

The most energy consuming section of the paper production facilities is the drying section. In general, the dryness of the paper at the entrance of the drying section is about 40 to 50%. If the degree of dryness of the paper entering the drying unit will be increased (moisture content will be decreased) energy savings can be achieved in drying unit. Shoe press units are used to improve the press effectiveness recently. In this study, it is observed that the number of drying cylinders can be reduced by 8 units according to our calculations when the dryness of the paper entering to the drying section of a paper production facility is increased from 49 to 55% with the desired degree of dryness.

**Keywords:** Paper drying, drying cylinders, dryness, energy savings.

**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLEBİLİR KULLANILMIŞ KÂĞITTAN KÂĞIT ÜRETEBİR TESİSTE SHOE  
(PABUÇ) PRES ÜNİTESİ UYGULANMASININ, KURUTMA ÜNİTESİNİN İŞLETME VE YATIRIM  
MALİYETİNE OLAN ETKİSİ**

**ÖZET**

Kâğıt üretim tesislerinde en fazla enerji tüketimi kurutma ünitesinde olur. Genel olarak kurutma ünitesine girişte kâğıdın kuruluk derecesi %40-50 arasındadır. Kurutma ünitesine giren kâğıdın kuruluk derecesi arttırılacak (nem miktarı azaltılacak) olursa kurutma ünitesinde enerji tasarrufuna gidilebilir. Son zamanlarda presleme etkinliğini arttırmak için shoe (pabuç) pres ünitesi uygulaması yapılmaktadır. Bu çalışmada bir kâğıt üretim tesisinin kurutma ünitesine giren kâğıdın %49 olan kuruluk derecesi, shoe (pabuç) pres ünitesi uygulanması ile %55'e çıkartıldığında, yapılan hesaplamalar sonucunda 8 adet daha az buharla ısıtılan kurutma silindiri ile istenilen kuruluk derecesinde kâğıt elde edilebildiği görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler:** Kâğıt kurutma, kurutma silindiri, kuruluk derecesi, enerji tasarrufu.

---

**1. GİRİŞ**

Kâğıt üretim tesislerinde en fazla enerji tüketiminin olduğu kurutma ünitesinde yapılacak bir iyileştirme kâğıt üretim tesisinin bütününde enerji ekonomisi yönünden büyük fayda sağlayacaktır. Kurutma ünitesinin girişinde (pres ünitesi çıkışında) kâğıdın kuruluk derecesi arttırıldığında, kurutma ünitesine daha kuru kâğıt girecek ve böylece kurutma ünitesinin yükü hafifletilmiş olacaktır [1], [2].

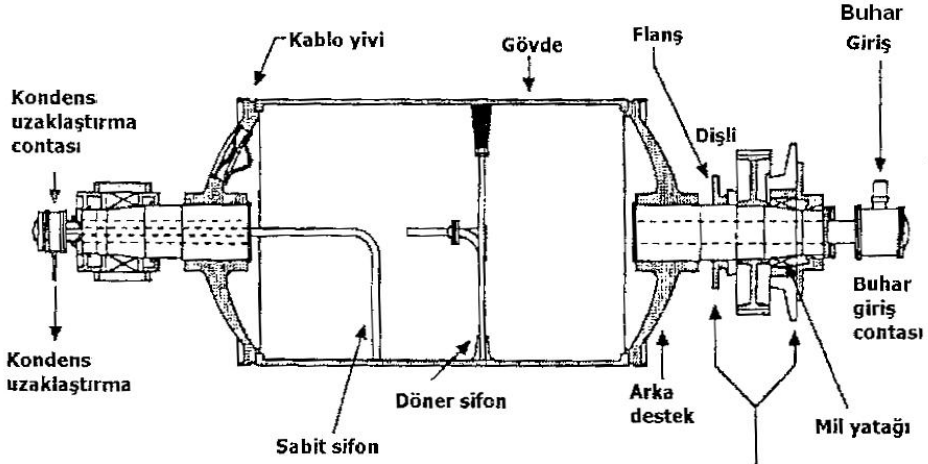
---

\*Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: andac2001@hotmail.com, tel: (532) 708 77 58

## 2. KURUTMA ÜNİTESİ VE KURUTMA SİLİNDİRLERİ

Mekanik olarak kağıttan en fazla su çıkarılması elek ve pres partisinde gerçekleşmekte olup bu kısımlarda uzaklaştırılmayan su kurutma ünitesinde buharlaştırılarak uzaklaştırılır. Eleklerden sonra ıslak kağıt hamurunun kuruluğu %16-23, pres ünitesinden sonra %40-50 ve kurutma ünitesinden sonra %91-95 olur. Bu elek ünitesinde 1 kg kağıt üretimi için 100-170 kg, pres kısmında 2-4 kg, kurutma ünitesinde ise 1,0-1,5 kg suyun uzaklaştırıldığını ifade etmektedir. Kurutma ünitesinde çıkarılan su, toplam suyun çok az bir kısmına karşılık gelmesine rağmen kurutma partisi bir kâğıt veya karton makinesi için ana enerji tüketicisi durumundadır [3].

Kurutma silindirleri dökme demir, kromlu dökme demir veya çelikten yapılmış olup çapları 1,5-2,2 m arasında olabilmektedir. İki yanda kapaklar bulunup buhar girişi ve kondens çıkışı ortadan yapılır. Silindirler buhar basıncına dayanıklı olup belirli aralıklarla kontrol edilmelidir. Bir silindirin yarıması; patlama ve buhar yanıkları gibi ciddi kazalara neden olabilir. Şekil 1 buhar girişi, kondens uzaklaştırıcı aygıtlar, silindir desteği gibi parçaların tamamını içeren bir kurutucu silindirin boyuna kesitini göstermektedir. Kurutucu yüzey genişliği 1,5-10 m'dir. Silindirin et kalınlığı 1000 kPa'lık basınca dayanacak şekilde olup yaygın olarak 25-40 mm kalınlığa sahiptir [4].



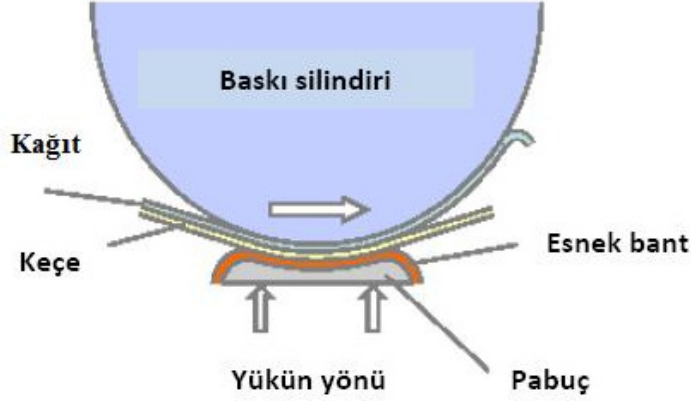
Şekil 1. Bir kurutma silindirinin boyuna kesiti

Pratikte hemen hemen bütün kâğıtlar atmosferik basınç altında, buharla ısıtılmış kurutma silindirleri üzerinden geçirilerek kurutulur. Bir kâğıt makinesinin kurutma partisinde 40 ile 70 adet 1,5 m çapında, et kalınlığı 22-35 mm arasında olan pürüzlü iç tarafı kondensden ısı iletilmesine yardım eden, dış tarafı kâğıda ısının geçmesini sağlamak için taşlanmış ve parlak, bataryalar halinde 3 veya 5 grup kurutma silindiri bulunur. Her üst veya alt grup kendine ait bir kurutma keçesine sahip olup bir makine üzerinde 4-10 adet kurutma keçesi vardır [5].

## 3. SHOE (PABUÇ) PRES

Son yıllarda presleme etkinliğini arttırmak için geliştirilmiş bir pres türüdür. Bu tür preslerde, klasik preslere göre baskı süresi 10 kata kadar uzatılabilmektedir. Bu preslerde iç bükey bir pabuç üzerinde dönen plastik veya esnek bir bant bulunmaktadır. Üstte ise baskı silindiri bulunur. Şekil 7.5'de Shoe (pabuç) Pres yapısı görülmektedir. Klasik bir pres yerine shoe (pabuç) pres kullanarak hem kağıdın pres yüzeylerine olan temas yüzeyi hem de preslerin kağıda olan baskı

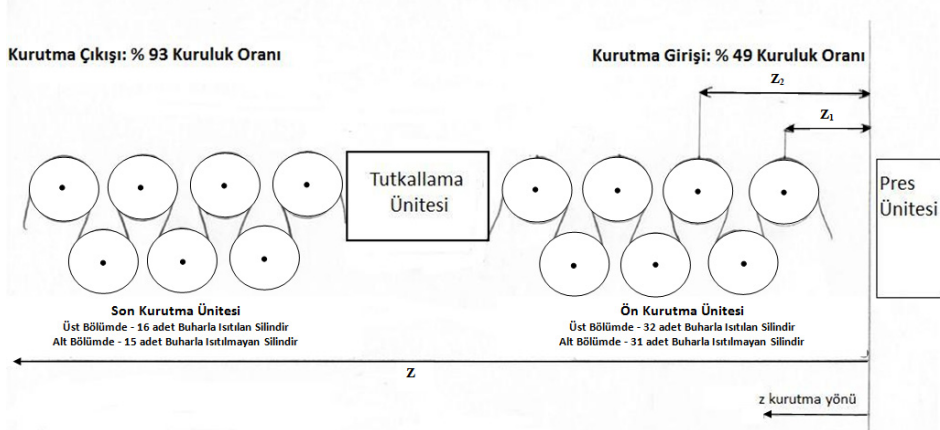
süresi artmış olur. Bu tür presler sayesinde, presleme işlemi sonunda kuru madde oranı elyaf tipine bağlı olarak %55'e kadar çıkabilir [6].



Şekil 2. Shoe (pabuç) pres yapısı

#### 4. KURUTMA SİLİNDİRLERİ BOYUNCA KÂĞIT NEM MİKTARI DEĞİŞİMİNİN HESAPLANMASI

İncelenen kâğıt üretim tesisinde Kurutma Ünitesi 32 adet buharla ısıtılan kurutma silindirinin bulunduğu "Ön Kurutma Ünitesi" ile 16 adet buharla ısıtılan kurutma silindirinin bulunduğu "Son Kurutma Ünitesi"nden oluşur. Bu üniteye ısıtılan ve ısıtılmayan olmak üzere toplam 94 adet silindir mevcuttur. Bu iki kurutma ünitesi arasında kâğıda mukavemet arttırıcı malzemenin (nişasta) çözelti halinde verildiği "Tutkallama Ünitesi" bulunur. Kâğıt kurutma ünitesine % 49 kuruluk oranında girip üniteye % 93 kuruluk oranında çıkar. Şekil 3'de kurutma ünitesi görülmektedir.



$$J = \frac{1}{C_{p,kuruhava} + X^* C_{p,su}} h_{kağıt-hava} (X^* - X_{giren hava}) \quad (1)$$

şeklinde verilir [7].

Eşitlik (1)'de,

$C_{p,kuru\text{hava}}$ ; kuru havanın özgül ısısı (J/kgK)

$C_{p,su}$ ; suyun özgül ısısı (J/kgK)

$X^*$ ; kâğıt sıcaklığındaki doymuş havanın nemi (kgsu/kgKH),

$h_{kâğıt-hava}$ ; kâğıt ile hava arasındaki ısı transfer katsayısı ( $W/m^2K$ ),

$X_{giren\text{hava}}$ ; kurutma bölümüne verilen havanın nemi (kgsu/kgKH),

$J$ ; Buharlaşma akısı ( $kg/m^2s$ )

şeklinde dir.

Ayrıca kâğıt silindire temas halindeyken,

$$Re_1 < 5 \times 10^5 \text{ ise } h_{kâğıt-hava} = \frac{k}{l} \left( 0,664 Re_1^{1/2} Pr^{1/3} \right) \quad (2)$$

$$Re_1 > 5 \times 10^5 \text{ ise } h_{kâğıt-hava} = \frac{k}{l} Pr^{1/3} \left( 0,037 Re_1^{4/5} - 871 \right) \quad (3)$$

$$Re_1 = \frac{v * l}{\nu} \quad (4)$$

$$Pr = \frac{C_p * \mu}{k} \quad (5)$$

olarak tanımlanmıştır [7].

Radyasyon ile kâğıttan havaya olan ısı transferi ihmal edilip, kurutma yönü (z) olarak tanımlanıp, diğer yönlerdeki değişimler ihmal edilirse, kütle ve enerji denklemlerinden;

$$\frac{dw}{dz} = - \frac{n}{vB} J \quad (6)$$

elde edilir [4].

Eşitlik (6)'da

$V$ ; kâğıdın makine boyunca çizgisel hızı (m/s),

w; kâğıt nem miktarı (kgsu/kgkurukâğıt),

B; kâğıdın gramajı ( $kg/m^2$ ),

z; kurutma yönü (m),

J; Buharlaşma akısı ( $kg/m^2s$ ),

n; katsayı (n=1 kâğıt silindire temas halinde, n=2 kâğıt iki silindir arasında)

olarak verilir [7].

İncelenen kâğıt üretim tesisinde elde edilen kâğıt sıcaklıkları Çizelge 1'de, kâğıt makinesinden elde edilen işletme şartları Çizelge 2'de, kurutma havası şartları ise Çizelge 3'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Kurutma ünitesinde buharla ısıtılan silindirler üzerindeki kâğıt sıcaklık dağılımı

SİLİNDİR NO:	KÂĞIT SIC (°C)	SİLİNDİR NO:	KÂĞIT SIC (°C)	SİLİNDİR NO:	KÂĞIT SIC (°C)	SİLİNDİR NO:	KÂĞIT SIC (°C)
1.	47	13.	87	25.	97	37.	75
2.	56	14.	87	26.	97	38.	72
3.	62	15.	87	27.	96	39.	75
4.	66	16.	90	28.	92,5	40.	76
5.	70	17.	91	29.	93	41.	80
6.	75	18.	94,5	30.	93	42.	80
7.	75	19.	95	31.	92,5	43.	80
8.	77,5	20.	93,5	32.	91	44.	75
9.	77,5	21.	94	33.	62,5	45.	75
10.	81	22.	95	34.	61	46.	77,5
11.	82,5	23.	95,5	35.	65	47.	79
12.	82,5	24.	96	36.	70	48.	80

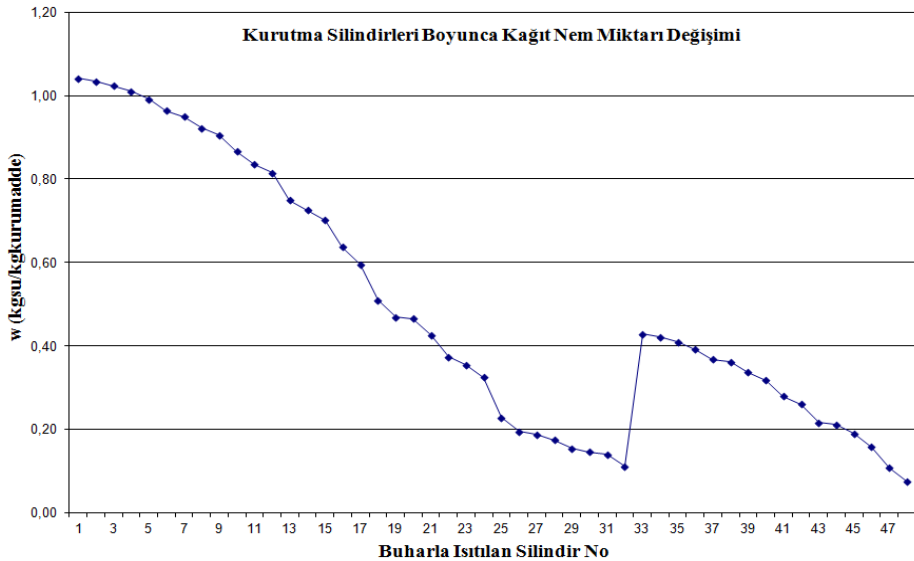
**Çizelge 2.** Kâğıt makinesi işletme verileri

Kâğıt Cinsi:	Fluting 112
Gramaj:	112 g/m <sup>2</sup>
Çizgisel Hız:	18,37 m/s
Kâğıt Genişliği:	8,09 m
Ön Kurutma Girişi Kuruluk(Pres Çıkışı):	% 49 Kuru madde
Ön Kurutma Çıkışı Kuruluk(Tutkallama Ünitesi Girişi):	% 88-90 Kuru madde
Tutkallama Ünitesi Çıkışı(Son Kurutma Girişi):	% 70 Kuru madde
Son Kurutma Çıkışı:	% 91,90-93 Kuru madde
Kurutmaya Toplam Buhar Akışı:	66600 kg/h
Kurutma Silindiri Çapı:	1,83 m
Ön Kurutmada Isıtılan Silindir Sayısı:	32
Ön Kurutmada Ortalama Buhar Sıcaklığı:	148,30 °C
Son Kurutmada Isıtılan Silindir Sayısı:	16
Son Kurutmada Ortalama Buhar Sıcaklığı:	111,50 °C
İki Silindir Arası Uzaklık:	2,1 m
Sarma Açısı:	220°

**Çizelge 3.** Kurutma havası şartları

Ön Kurutma Verilen Hava		Ön Kurutma Çıkış Havası	
Sıcaklık:	95 °C	Sıcaklık:	82 °C
Nem:	0,020 kgsu/kgKH	Nem:	160 gsu/kgKH
Debi:	76,6 kgKH/s	Debi:	95,8 kgKH/s
Son Kurutma Verilen Hava		Son Kurutma Çıkış Havası	
Sıcaklık:	95 °C	Sıcaklık:	80 °C
Nem:	0,020 kgsu/kgKH	Nem:	140 gsu/kgKH
Debi:	35,6 kgKH/s	Debi:	44,5 kgKH/s

Çizelge 1, Çizelge 2 ve Çizelge 3’deki verilerden yararlanarak, Eşitlik (1) ve Eşitlik (6)’dan kurutma ünitesi boyunca kâğıdın nem miktarının değişimi hesaplanmıştır. Şekil 4’de kâğıdın nem miktarının kurutma ünitesi boyunca değişimi görülmektedir.



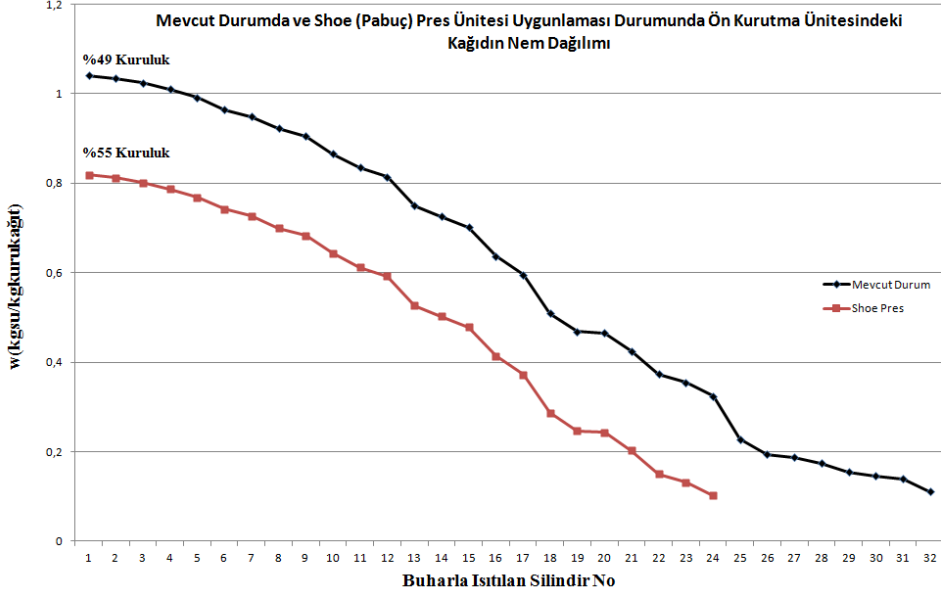
**Şekil 4.** Kurutma ünitesinde kâğıdın nem miktarının değişimi

## 5. SHOE (PABUÇ) PRES ÜNİTESİ UYGULAMASI

İncelenen kâğıt üretim tesisinde kâğıt, kurutma ünitesine % 49 kuruluk oranında girmekte ve kurutma ünitesinden % 93 kuruluk oranında çıkmaktadır. Kurutma ünitesinde iyileştirme yapmak amacıyla kurutma ünitesine giren kâğıdın kuruluk derecesi arttırılacak (nem miktarı azaltılacak) olursa kurutma ünitesi için gerekli buhar miktarında azalma meydana gelir. Bu amaçla incelenen kağıt üretim tesisinde shoe (pabuç) pres ünitesi uygulanması ile kağıdın pres ünitesinden çıkıştaki

kuruluk oranı % 55'e çıkarılabilir. Böylece kâğıt, kurutma ünitesine daha kuru girer ve kurutma ünitesinin yükü azaltılarak enerji tasarrufuna gidilebilir.

Şekil 5'de mevcut durumda ve shoe (pabuç) pres ünitesi uygulanması ile kurutma ünitesine giren kâğıdın kuruluk derecesinin % 55 olması durumunda, Eşitlik (6) yardımıyla elde edilen, ön kurutma ünitesi boyunca kâğıdın nem dağılımı görülmektedir.



Şekil 5. Ön kurutma ünitesinde shoe (pabuç) pres ünitesi uygulanmasıyla yapılan iyileştirme

Şekil 5'de görüldüğü üzere shoe (pabuç) pres ünitesi uygulanması ile kurutma ünitesine giren kâğıdın kuruluk derecesinin % 55 olması durumunda, ön kurutma ünitesinde istenilen kuruluk derecesinin 8 adet daha az buharla ısıtılan kurutma silindiri ile elde edilebileceği görülmüştür.

Yapılabilecek bu iyileştirme ile buharla ısıtılan kurutma silindiri sayısı azaldığından kurutma ünitesinde buhar tüketimi de azalacaktır. Yapılan hesaplamalar sonucunda kurutma ünitesinde 8 adet buharla ısıtılan kurutma silindirinin azalması sonucunda %16,68 buhar tasarrufu yapılabileceği belirlenmiştir.

## 6. SHOE (PABUÇ) PRES ÜNİTESİNİN AMORTİSMAN SÜRESİNİN BELİRLENMESİ

### 6.1. Shoe (Pabuç) Pres Ünitesi Uygulanması ile Kurutma Ünitesinde Buhardan Elde Edilen Tasarruf

Shoe (pabuç) Pres Ünitesi uygulanması ile kurutma ünitesinde 8 adet buharla ısıtılan silindirden tasarruf edilir. 8 adet kurutma silindiri 11100 kg/h buhar tüketir. Ocak 2011 yakıt fiyatlarıyla buharın maliyeti 0,0195 €/kg'dır. Buradan;

$$11100 \frac{kg}{h} \times 0,0195 \frac{€}{kg} = 216,45 \frac{€}{h}$$

olarak buhardan elde edilen tasarrufun parasal değeri bulunur.

### **6.2. Shoe (Pabuç) Pres Ünitesi Uygulanması ile Kurutma Ünitesinde Elektrik Tüketiminden Elde Edilen Tasarruf**

Kurutma Ünitesinde silindirlerin tükettiği elektrik enerjisi 2463 kWh'dir. Shoe (pabuç) pres ünitesi uygulanması ile kurutma ünitesinde 8 adet buharla ısıtılan ve 8 adet ısıtılmayan olmak üzere toplam 16 adet silindirden tasarruf edildiğinden bu silindirlerin elektrik tüketimi 419 kWh olarak tespit edilmiştir. Elektriğin Ocak 2011 için birim fiyatı 0,0754 €/kWh olduğundan,

$$419 \text{ kWh} \times 0,0754 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 31,6 \frac{\text{€}}{\text{h}}$$

olarak elektrik tüketiminden elde edilen tasarruf hesaplanmış olunur.

### **6.3. Shoe (Pabuç) Pres Ünitesi Yatırım Maliyeti**

Shoe (pabuç) Pres Ünitesinin ilk yatırım maliyeti 20.000.000 €'dur. Sistemdeki mevcut klasik pres ünitesinin maliyeti ise 7.000.000 €'dur. Shoe (pabuç) Pres Ünitesi uygulanması durumunda kurutma silindiri sayısı azalacağından kurutma ünitesinin yatırım maliyetinde 5.106.383 € tasarruf edilmektedir. Dolayısıyla mevcut sistem yerine Shoe (pabuç) pres ünitesinin uygulanması durumunda toplam yatırım maliyeti;

$$\text{Yatırım Maliyeti} = (20.000.000 \text{ €} - 7.000.000 \text{ €}) - 5.106.383 \text{ €} = 7.893.617 \text{ €}$$

olarak elde edilir.

### **6.4. Amortisman Süresinin Hesaplanması**

Shoe (pabuç) pres ünitesinin amortisman süresi (t);

$$t = \frac{\text{Toplam yatırım maliyeti}}{\text{Elde edilen toplam tasarruf}} \quad (7)$$

ifadesinden hesaplanabilir. Gerekli değerlerin yerine koyulmasıyla Eşitlik (7)'den;

$$t = \frac{7.893.617 \text{ €}}{216,45 \frac{\text{€}}{\text{h}} + 31,6 \frac{\text{€}}{\text{h}}} = 31823 \text{ h} = 1326 \text{ gün} = 3,68 \text{ yıl}$$

olarak amortisman süresi bulunur.

## **7. SONUÇ VE ÖNERİLER**

Bu çalışmada bir kâğıt üretim tesisinin kurutma ünitesine giren kâğıdın %49 olan kuruluk derecesi shoe (pabuç) pres ünitesi uygulanması ile %55'e çıkartıldığında yapılan hesaplamalar sonucunda 8 adet daha az buharla ısıtılan kurutma silindiri ile istenilen kuruluk derecesinde kâğıt elde edilebildiği tespit edilmiştir.

Kurutma ünitesinde kurutma silindiri sayısı azaldığından %16,68 buhar tasarrufu ve kurutma ünitesinin yatırım maliyetinden de Ocak 2011 fiyatlarıyla 5.106.803 € tasarruf yapılabileceği görülmüştür.

Shoe (pabuç) pres ünitesi hem kendini 3,68 yılda amorti ettiğinden hem de kurutma ünitesinde işletme ve yatırım masraflarını azalttığından, yeni kurulacak kâğıt üretim tesislerinde



bu tür bir ünitenin kullanılması enerji ekonomisine ve çevre kirliliğinin azaltılmasına önemli ölçüde katkı sağlayacaktır.

## REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] De Beer, J., Worrell, E. ve Blok, K., “Long-Term Energy-Efficiency Improvements in The Paper and Board Industry.”, Energy, 23:21-42, 1998.
- [2] Eroğlu, H. ve Usta, M., “Kâğıt ve Karton Üretim Teknolojisi”, I. Cilt, Selüloz ve Kâğıt Sanayii Vakfı, Trabzon, 2004.
- [3] Slätteke, O., “Modeling and Control of the Paper Machine Drying Section”, Doktora Tezi, Department of Automatic Control Lund University, 247, İsveç, 2006.
- [4] Eroğlu, H. ve Usta, M., “Kâğıt ve Karton Üretim Teknolojisi”, II. Cilt, Selüloz ve Kâğıt Sanayii Vakfı, Trabzon, 2004.
- [5] Koper, G., Kjelstrup, S., Ven, T., Sadeghi, M. ve Douglas, W., “Entropy Production for Cylinder Drying of Linerboard and Newsprint”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50:1344-1355, 2006.
- [6] Holik, H., “Handbook of Paper and Board”, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006.
- [7] Zvolinschi, A., Johannessen, E. ve Kjelstrup, S., “The Second-law Optimal Operation of a Paper Drying Machine”, Chemical Engineering Science, 61:3653-3662, 2006.

## SİMGE LİSTESİ

B	Kâğıt gramajı ( $\text{kg/m}^2$ )
$C_p$	Sabit basınçta özgül ısı ( $\text{kJ/kgK}$ )
$h_{\text{kağıt-hava}}$	Kâğıt ile hava arasındaki ısı transfer katsayısı ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
J	Buharlaştırma akısı ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ )
k	Isı iletim katsayısı ( $\text{W/m.K}$ )
l	Karakteristik uzunluk (m)
n	Katsayı ( $n=1$ kağıt silindire temas halinde, $n=2$ kağıt iki silindir arasında)
Pr	Prandtl sayısı
Re	Reynolds sayısı
v	Kâğıdın makine boyunca çizgisel hızı (m/s)
w	Kâğıt nem miktarı ( $\text{kgsu/kgkurukağıt}$ ),
$X_{\text{giren hava}}$	Kurutma bölümüne verilen havanın nemi ( $\text{kgsu/kgKH}$ )
$X_{\text{p}}$	Kâğıt üzerindeki havanın doyma nemi ( $\text{kgsu/kgKH}$ )
z	Kurutma yönü (m)
t	Amortisman süresi (yıl)
$\mu$	Dinamik viskozite ( $\text{kg/m.s}$ )
$\nu$	Kinematik viskozite ( $\text{m}^2/\text{s}$ )