

T.C.  
YILDIZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AÇICILI BİR ELYAF KURUTUCUNUN  
GELİŞTİRİLEREK  
OPTİMİZASYONUNUN YAPILMASI

Prof. Mehmet ÇAKIR  
(Jüri Başkanı ve  
Yönetici Öğretim  
Üyesi)

Prof. Dr. Doğan ÜZGÜR  
( Üye )

Doç. Sabri SAVAŞ  
( Üye )

M. Ümit KAMÇICI, Mak. Yük. Müh.

Teslim : 8 Temmuz 1982

Savunma : 24 Mart 1983

T. C.  
Yükseköğretim Kurulu  
Dokümantasyon Merkezi

## TE Ő E K K Ū R

Sevdiğim bir konuda çalışma olanağı vererek, sürekli ilgisi ile yardımcı olan hocam Prof.Mehmet Çakır'a, çalışmam süresince büyük yardım ve teşviklerini gördüğüm hocam Prof.Dr.Doğan Özgür'e, deneylerimi yapabilme olanağı sağlayan Balıkesir D.M.M.Akademisi yöneticilerine, deneyleri yaparken yardımcı olan öğrencilerim Ali Bülent Setbağ ve Ekrem Boyar'a ve titiz çalışması ile tezi daktilo eden Sabriye Ergin'e teşekkür ederim.

Temmuz, 1982

## Ö Z E T

Endüstride elyaf kurutması uygulamalarında, kurutma maliyetini düşürmek amacıyla, yaş elyafın bünyesinde bulunan nemin önemli bir kısmı santrifüjlerde alındıktan sonra kalan nem sıcak hava akımı içerisinde kurutulur. Fakat elyaf santrifüjlerde iyice sıkıştığından, sıcak hava ile kurutulması güç ve uzun olur.

Bu güçlüğü yenerek hızlı ve ekonomik bir kurutma sağlayabilmek için mekanik açıcılı bir kurutucu modeli geliştirilmiş, bu prototip kurutucuda yaş pamuk deneysel kurutulmuş, böyle bir kurutucunun endüstriyel kullanımlar için tasarımında gerekli formilasyon sağlanmıştır.

Bunun için önce; kritik noktanın belirlenmesine öneriler sunarak açıklık getirilmiş ve bu önerilerden Regresyon Analizi Metodu kullanılarak model kurutucu için, yaş pamuğun kritik noktası 0,31 kg su/kg K.Pamuk olarak bulunmuştur.

Sonra, gözenekli malzemelerde kurutma süresinin hesabı incelenmiş, Mekanik Açıcılı Elyaf Kurutucuda gerekli kurutma zamanının hesabı için aşağıdaki öneri sunulmuştur.

$$t_t = \frac{w_o - w_{cr}}{(dw/dt)_o} \cdot e^{- (w - w_{cr}) / (w_o - w_{cr})}$$

Daha sonra; ısı transferi hesabına esas olmak üzere " Hacimsal Isı Geçiş Katsayısı " tanımlanmış ve deneylerden yararlanarak, doldurma oranı (P) ve sıcak hava madde hızına ( $G_D$ ) bağlı olarak;

$$k_v = (27,76 P^2 - 102,6 P + 124,2) \cdot 10^{-3} \cdot G_D^{-(0,3186 P^2 - 1,1768 P - 0,7117)}$$

$P < 5 ; G_D > 5$

şeklinde formüle edilmiştir.

Böylece amaca ulaşıldıktan sonra kurutucunun optimizasyonuna geçilmiş ve optimum kurutmayı sağlayan doldurma oranı  $P = 1,85 \text{ kg.K.Pam./m}^3$  kurutucu hacmi olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca, harcanan ısı enerjisi sabit kalmak üzere kurutucu havanın miktar ve sıcaklığı incelenmiş ve sıcaklığı az fakat miktarı çok hava ile, daha hızlı bir kurutma elde edildiği bulunmuştur.

## S U M M A R Y

In the application of drying fibrous materials in the industry, the remaining humidity, which is the wet material, is dried within hot air flow after a considerable amount of humidity is extracted in the centrifuges in order to decrease the expenditure of the drying. But because the fibres are tightly closed together during the centrifuging, its drying by means of hot air flow is difficult and takes long.

A dryer model with mechanical opener has been developed to overcome this difficulty and realize a fast and economical drying. The formulation which is necessary to design this type of dryer for the purpose of industrial use has been provided by means of drying of wet cotton fibres in the above-mentioned prototype of this dryer.

For this purpose ; firstly, some explanations have been brought to confirm the critical point by bringing some suggestions. The critical point of wet cotton has been found to be 0.31 kg water / kg dry cotton by using the Regression Analysis Method among these explanations.

Then, the determination of the drying time for porous materials has been searched and the following suggestion been presented.

$$t_t = \frac{w_o - w_{cr}}{(dw/dt)_c} \cdot e^{-(w - w_{cr}) / (w_o - w_{cr})}$$

After that, to set a basis for the calculation of the heat transfer, " Volumetric Heat Transfer Coefficient " has been defined, and by making

use the experiments and depending on filling rate (P) and drier hot air mass velocity ( $G_D$ ) the coefficient has been formulated as follows :

$$k_v = (27.76 P^2 - 10.6 P + 124.2) \cdot 10^{-3} \cdot G_D^{-(0.3186 P^2 - 1.1768 P - 0.717)}$$

$$P < 5; G_D > 5$$

After reaching the purpose in this way, the optimization of the dryer has been made and the filling rate which provides optimum drying has been calculated to be

$$P = 1.85 \text{ kg cotton / m}^3 \text{ dryer volume.}$$

In addition to these, the quantity and the temperature of the drier air has been searched by keeping the heat energy, which is spent, at a constant level, and it has been found that using greater quantities of air at lower temperatures will increase the drying rate.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR

ÖZET

SUMMARY

İÇİNDEKİLER

### 1- GENEL ÇİZGİLERİ İLE KURUTMA PROSESİ

1.1- GİRİŞ

1.2- KURUTMA PROSESİNİN İÇ VE DIŞ KOŞULLARI

1.3- KURUTMA SÜRECİ

1.3.1- Sabit Kurutma Hızı Süreci

1.3.2- Azalan Kurutma Hızı Süreci

1.4- KURUTMA PROSESİ ETÜDÜ

1.5- PSİHROMETRİNİN KURUTMAYA UYGULANIŞI

### 2- ELYAF YAPILI MALZEMELERİN KURUTULMASINDA UYGULANAN YÖNTEMLER

2.1- TEPSELİ KÜTLE KURUTMASI

2.2- TEPSELİ SÜREKLİ KURUTMA

2.3- İÇTEN SİRKÜLASYONLU KURUTMA

2.4- VAR OLAN YÖNTEMLERİN TARTIŞILMASI ve YENİ BİR MODELE YAKLAŞIM

### 3- MEKANİK AÇICILI ELYAF KURUTUCU ve YAPILAN ÇALIŞMALAR

3.1- MEKANİK AÇICILI ELYAF KURUTUCU

3.2- KURUTMA DENEYLERİ

3.3- KURUTMA ÖRNEKLERİ

3.4- KURAMSAL YAKLAŞIMLAR

3.4.1- Kritik Noktanın Belirlenmesi

3.4.2- Kurutma Süresinin Hesabı

3.5- ISI GEÇİŞİNİN HESABI

3.5.1- Giriş

3.5.2- Isı Geçiş Katsayısının Hesabı

3.6- KURUTMA EĞRİLERİNİN TARTIŞILMASI

4- OPTİMİZASYON

4.1- DOLDURMA ORANI OPTİMİZASYONU

4.2- KURUTMA MİKTAR ve SICAKLIĞININ KURUTMA HIZINA ETKİSİ

5- SONUÇ

METİNDE KULLANILAN SEMBOLLER

REFERANS LİSTESİ

EK 1 : ÖRNEK TASARIM PROGRAMI

EK 2 : FOTOĞRAFLAR

ÖZGEÇMİŐ



## 1- GENEL ÇİZGİLERİ İLE KURUTMA PROSESİ (1,2,3)

### 1.1- GİRİŞ

Kurutma kelimesi, genel anlamıyla bir maddenin bünyesinde bulunan nemin alınmasını belirtir. Fakat teknikte bu işlem çok çeşitli metodlarla yapıldığından, bu metodları birbirinden ayırabilmek için daha dar bir anlamda kullanılır. Buna göre teknik anlamda kurutma; bir katının bünyesinde bulunan nemin, bir gaz akımı içinde buharlaştırılarak gaza geçirilmek suretiyle alınmasını belirtir.

Örnek olarak süt tozu ve hazır çorba üretiminde olduğu gibi bir çözeltinin sıcak bir gaz akımı içerisine damlacıklar halinde püskürtülmesi ve sıvısının buharlaştırılarak alınması teknik anlamda kurutma sayılmasına rağmen, aynı çözeltinin kaynatılarak sıvısının buharlaştırılması teknikte kurutma sayılmayıp "Kaynatma" sayılmaktadır. İkinci bir örnek olarak bir katının merdaneler arasında sıkıştırılarak ya da yüksek devirlerde dönen yataklar içerisinde santrifüj kuvvetlerden yararlanarak bir kısım neminin alınması teknikte kurutma olmayıp "Sıkma" dır.

Teknikte karşılaşılan uygulamalarda; nem genellikle su ve katının içerisinde kurutulduğu sıcak gaz da havadır. Ancak, temiz bir kurutmanın çok önemli olmadığı kum kurutulması gibi örneklerde, sıcak gaz olarak duman gazlarının kullanıldığı da görülür.

Teknikte birçok halde kurutulan katının kurutma sonunda tamamen kuru olması gerekmez. Bazen standartların ve yönetmeliklerin izin verdiği bir nemlilik seviyesine kadar kurutulmuş olmak yeterli sayıldığı gibi, bazen de aşırı kurutma daha sonraki işlemler veya malzeme özellikleri bakımından zararlı olduğu için katının bünyesinde belirli bir nemin bulunmasına izin verilir.

Örnek olarak tekstil sanayiinde kullanılan tabii elyafların genellikle % 7 nin altında nem ihtiva etmesi işlenmelerini güçleştirdiği için istenmez. Zaten; her katı kendini çevreleyen doğal atmosferle dengede olarak belirli bir miktar nemi bünyesinde bulundurur. Buna " Denge Nem Miktarı " denir ve birim kütledeki kuru katı içinde bulunan su kütlesi olarak belirtilir. Denge nem miktarı, katının bünyesel özelliklerine ve kendini çevreleyen atmosferin sıcaklık ve nem konsantrasyonuna bağlı olarak değişir. Özel durumlar dışında; katıların, çevre koşullarının belirlediği denge nem miktarının altında bir değere kurutulması gereksizdir. Çünkü kurutucudan çıkan aşırı kurumuş katı bünyesindeki nem, bir süre sonra, denge nem miktarına ulaşacaktır.

## 1.2- KURUTMA PROSESİNİN İÇ ve DIŞ KOŞULLARI

Bir katının yukarıdaki tanıma uygun şekilde kurutulması sırasında aynı anda iki temel proses birden oluşur. Bunlar;

- i) Sıcak gazdan, katı bünyesinden buharlaşan sıvıya doğru, " Isı Transferi " ve
- ii) Katının iç kısımlarından dış yüzeyine doğru, sıvı yada buhar olarak; dış yüzeyden sıcak gaz içine doğru ise, sadece buhar olarak, " Madde Transferi " prosesleridir.

Bu prosesleri belirleyen koşullar aynı zamanda kurutma prosesini de belirleyen koşullardır. Bunlar iki kısımda incelenebilir :

- i) Katı bünyesindeki sıvının katı yüzeyine gelmesi sürecinde oluşan; iç difüzyon, kılcallık gibi iç koşullar.
- ii) Kurutucu olarak kullanılan sıcak gazın; akım hızı, sıcaklığı, nemi gibi dış koşullar.

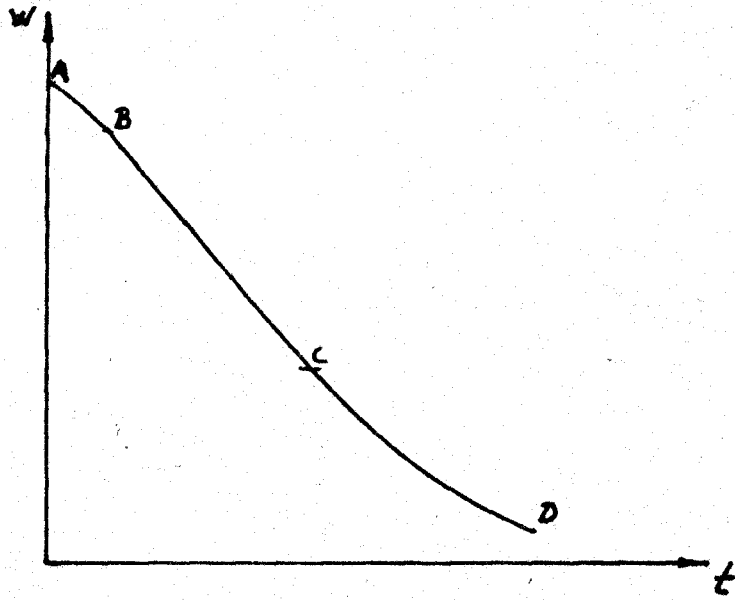
Eskiden, kurutma üzerine yapılan araştırmalarda i koşullara bağlı çalışmalar esas alınırdı. Őimdilerde ise, daha kolay uygulama olanakları vermesi, daha çabuk dizayn ve değerlendirmeler yapılabilmesi, en önemlisi de kumanda edilebilir olması nedeniyle diş koşullara bağlı çalışmalar genel-lik kazanmıştır.

### 1.3- KURUTMA SÜRECİ

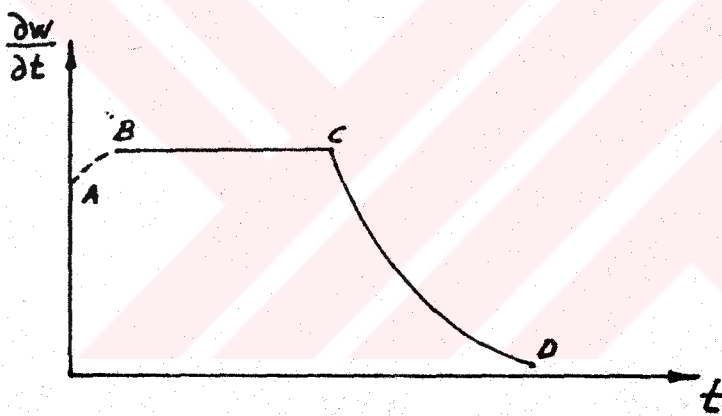
Bir katı bünyesindeki nemi, denge nem miktarında olduğu gibi, kuru katı birim kütlesi içerisindeki su kütlesi olarak belirtmek uygun olur. Bazı hallerde birim yaş katı kütlesi içerisindeki su kütlesi oranı da kullanılmaktadır. Ancak ilk belirleme, formülasyonu ve hesaplamaları basitleştirdiği için tercih edilmektedir. Bu ikisi arasındaki ilişki ;

$$w_{\text{kuru}} = \frac{w_{\text{yaş}}}{1 - w_{\text{yaş}}} \quad \text{şeklinde dir.}$$

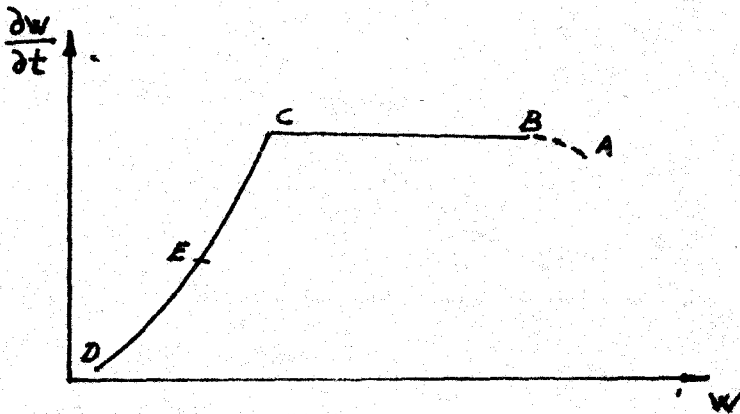
Bu çalışmada kuru katı kütlesine göre hesaplanan nem miktarı kullanılacaktır. Bir katı deneysel olarak kurutulur ve katının kuru kütlesine göre hesaplanan nem miktarının (w), zamana (t) göre değişimi incelenirse Şekil-1.1 deki eğriye benzer bir eğri elde edilir. Bu eğriden yararlanarak Şekil-1.2 deki (kurutma hızı-zaman) ve Şekil-1.3 deki (kurutma hızı-katının nem miktarı) eğrileri çizilebilir. Bunlarda; kurutma hızı katının nem miktarının birim zamandaki değişimini gösterir. Bu eğrilerin AB parçası başlangıcı, BC parçası sabit kurutma hızı sürecini, CD parçası azalan kurutma hızı sürecini belirtmektedir.



Şekil : 1.1



Şekil : 1.2



Şekil : 1.3

E noktası, bazı büyük katılarda, iç nem hareketinin kurutma hızını kontrole başladığı durumu, C noktası ise sabit kurutma hızı sürecinin bitip azalan kurutma hızı sürecinin başladığı kritik noktayı belirtmektedir.

### 1.3.1- Sabit Kurutma Hızı Süreci

Kurutma hızının sabit kalıp değişmediği bu bölgede katının tüm dış yüzeyi yaştır ve yüzeyin tamamından buharlaşan nem, kurutucu gaza geçer. Bu süreç esnasında katının iç nem hareketi tüm dış yüzeyi yaş olarak korumaya yeter çabukluktadır. Yani bu süreç boyunca dış yüzey her an neme doymuş durumdadır. Dolayısıyla yaş katının madde transfer alanı, ısı transfer alanına eşittir. Aynı zamanda sıcak gazdan yaş katıya olan ısı transferi yaş katından olan buharlaşma ile dengelenir. Başka bir deyişle; kurutma hızı ısı transferi tarafından kontrol edilir.

Diğer taraftan, katının dış yüzeyinin oluşturduğu bu transfer yüzeyinin sıcaklığı ısı ve madde transferi arasındaki denge nedeniyle sabit kalır. Isı transferinin yalnızca konveksiyonla (iletimle) olduğu durumlarda bu sıcaklık gazın yaş termometre sıcaklığına çok yakındır. Fakat aynı zamanda radyasyonla ısı transferinde olduğu durumlarda, yüzey sıcaklığı gazın yaş termometre sıcaklığının üzerinde ama kaynama noktasının altındadır. Bu artış radyasyonun şiddetine bağlıdır.

Sabit kurutma hızı sürecinde ;

- Kurutma hızının sabit kalışı,
- Kurutma hızının yüksek oluşu,
- Madde transferinin ısı transferi ile dengede oluşu nedeni ile ısı transferinin esas alınabilirliği,
- Yüzey sıcaklığının sabit oluşu,
- Kurutma hızının sıvı akımının iç oluş şekline bağlı olmayışı,

bu sürecin, azalan kurutma hızı sürecine göre üstünlük ve basitliğinin nedenleridir.

Bu süreç esnasında ısı ve madde transferi arasındaki denge şöyle yazılabilir.

$$M_k \cdot \left( \frac{dw}{dt} \right) = \frac{k \cdot A_H \cdot \Delta T}{r} = k_M \cdot A_M \cdot \Delta P$$

$$\Delta T = T_g - T_s$$

$$\Delta P = P_s - P'$$

$$A_H = A_M$$

Burada :

$M_k$  : Katı kütle (kg)

$t$  : Zaman (dak)

$w$  : Katının nem miktarı (kg nem/kg kuru katı)

$A_H, A_M$  : Isı ve madde transferi yüzeyleri ( $m^2$ )

$k$  : Isı geçiş katsayısı ( $KCal/m^2 \text{ dak } ^\circ C$ )

$k_M$  : Madde transferi katsayısı ( $kg/m^2 \text{ dak At.}$ )

$T_g$  : Gaz sıcaklığı ( $^\circ C$ )

$T_s$  : Yüzey sıcaklığı ( $^\circ C$ )

$P_s$  : Yüzey sıcaklığındaki sıvı buharının basıncı (At.)

$P'$  : Gazın içindeki sıvının kısmi buhar basıncı (At.)

Bu süreçte kurutma hızının büyüklüğü denklemlerden de görüldüğü gibi üç değişkene bağlıdır. Bunlar :

- i) Isı veya madde geçiş katsayısı,
- ii) Geçiş yüzeyinin büyüklüğü,
- iii) Gaz akımı ve katı yüzeyi arasındaki, geçişe sebep olan potansiyel farkıdır.

Burada katı yüzeyindeki sıvı buhar basıncı  $P_s$  'i yüzeyin sıcaklığı  $T_s$  'e bağlı olarak bulmak gereği vardır.  $T_s$  'in tahminindeki küçük hatalar  $(P_s - P')$  çarpanında  $(T_g - T_s)$  çarpanına göre daha büyük hatalara sebep olur.

Ayrıca ısı transferi katsayısı  $k$ , madde transferi katsayısı  $k_M$  'e göre daha güvenilirdir. Bu alanda yapılan çalışmaların çokluğu ısı transferi katsayısına hassaslık kazandırmıştır. Bu sebepler araştırmacıları mümkün olduğu kadar sabit kurutma hızı sürecinde, kurutmayı gerçekleştirme olanakları aramaya ve araştırmalarını ısı transferine dayamaya yöneltmiştir.

Bu çalışmada da geliştirmeye çalışılan bir kurutucu modeli ile bir yandan hızlı ve sabit kurutma hızı süreci uzun bir kurutma süreci gerçekleştirilmeye çalışılırken diğer taraftan sabit kurutma hızının hesabında ısı transferi esas alınmıştır.

### 1.3.2- Azalan Kurutma Hızı Süreci

Sabit kurutma hızı süreci devam ederken bir an gelirken, katının dış yüzeyinde kuru bölgeler görülür. Bu andan itibaren katının iç kısımlarından yüzeyine gelen sıvı miktarı buharlaşma miktarının altına düşer ve giderek azalır. Dolayısı ile katı yüzeyindeki kuru bölgeler büyümeye, yaş bölgeler azalmaya başlar. Yaş bölgeler madde transferinin meydana geldiği alanlar

olduğu için bu bölgelerin azalması ile kurutma hızı da giderek azalır.

Kurutma başlangıcından katı yüzeyindeki ilk kuru bölgenin görüldüğü ana kadar geçen süreye " Kritik Nem Miktarına Ulaşma Zamanı " bu anda katının bünyesinde bulunan nemin katı kütleline oranına " Kritik Nem Miktarı " ve kurutma eğrisi üzerindeki bu noktaya (C) " Kritik Nokta " denir.

Kritik noktadan itibaren sıcak gazdan yağ katıya transfer edilen ısı miktarı ile yağ katından sıcak gaza transfer olan nem miktarı arasındaki denge bozulur ve ısı transferindeki küçük azalmalara karşın, madde transferinde büyük azalmalar olur. Bu olay kurutma prosesinin sonuna kadar böylece devam eder ve kurutma hızı sürekli olarak azalır. İşte kurutma hızının sürekli olarak azaldığı bu bölgeye " Azalan Kurutma Hızı Süreci " denir.

Azalan kurutma hızı sürecinde yağ katıya transfer edilen ısının giderek artan bir kısmı yağ katının ısınmasına ve katı bünyesindeki nemin yüzeye taşınması için gerekli enerji olarak harcanır.

Katı yüzeyindeki yağ bölgelerin sıcaklığı sabit kalmakla birlikte kuru bölgelerin sıcaklığı sürekli artar. Kuru bölgelerin ve bu bölgelerin sıcaklığının sürekli artmasından dolayı, yüzey ortalama sıcaklığıda sürekli olarak artar.

Bu süreç boyunca, kurutma olayının katı bünyesine bağlı kurutma hızı; iç koşulları kontrol eder. Bunları başlıca iki grupta toplamak mümkündür :

i) Nemin katı içinden katı yüzeyine doğru ya sıvı yada gaz olarak difüzyonu (iç nem difüzyonu)

ii) Kapılar akışlar.

Geçmişte, azalan kurutma hızı süreci boyunca, bu süreci kontrol eden iç koşulun sabit kaldığı ve değişmediği varsayılırdı (2). Buna göre katılar sınıflandırılmış ve elyaf yapılı malzemeler azalan kurutma hızı sürecinde



## 1.5- PSİKROMETRİNİN KURUTMAYA UYGULANIŞI

Herhangi bir kurutma prosesinde sıvı buharlaşma hızı yani, kuruma hızı ve bu buharlaşmanın olduğu yüzey sıcaklığı, kurumakta olan malzemeyi çevreleyen atmosferin, sıcaklığına ve nem konsantrasyonuna bağlıdır.

Vakum kurutmada veya çevre atmosferinin tamamen sıvı buharından oluştuğu kurutma proseslerinde yüzey sıcaklığı sıvının sistem basıncındaki doyma sıcaklığına eşit olur. Diğer taraftan bir sıcak gaz akımı vasıtası ile kurutma yapılırken, buharlaşmanın meydana geldiği sıcaklık; nemin, kuruyacak malzemeyi çevreleyen bu gaz içindeki konsantrasyonuna bağlı olacaktır. Teknik uygulamalarda sıcak gaz çoğu zaman hava ve transfer edilen sıvıda su olduğuna göre, neme doymuş durumdaki katının sabit kurutma hızı sürecinde yüzey sıcaklığı kurutucu havanın nem konsantrasyonuna bağlıdır.

Sabit kurutma hızı sürecinde katının neme doymuş durumdaki dış yüzeyi bir hava film tabakası ile temasta ve eş sıcaklıktadır. Öte yandan katı yüzeyi ile temasta bulunan hava filmi aynı zamanda su ile de temastâ olduğuna göre bu film de neme doymuş durumdadır. Bu durumda, sıcaklığının da " Adyabatik Doyma Sıcaklığı " olması gerekir. Böylece katı yüzeyinin sıcaklığının da havanın adyabatik doyma sıcaklığına eşit olması gerekir.

Öte yandan hava için çok yüksek olmayan sıcaklıklarda ve çevre basıncında adyabatik doyma sıcaklığı, yaş termometre sıcaklığına eşittir.(4). Zaten kurutma prosesinde yaş termometre deneyine benzemektedir. Buna göre sabit kurutma hızı sürecinde yaş katının yüzey sıcaklığı havanın yaş termometre sıcaklığına eşittir.

Psikrometrik diyagram üzerinde havanın sabit basınçta ısıtma eğrisi; ısıtma esnasında havanın mutlak nemi değişmeyeceği için sabit mutlak nem değerinde olur. Yani, sıcaklığın arttığı şekilde, yatay bir eğridir. Havanın sıcaklığı arttıkça bünyesindeki buharın doyma basıncı da artar. Çünkü doyma

kapılar kuvvetlerin etkin olduğu malzemelerden sayılmıştı. Çağdaş teoride ise (1,3) katı cinsine bağlı olarak belirli bir katı kalınlığından sonra her iki etkenin de sıra ile etkin olduğu görüşü hakimdir. Bu görüşe göre; cinsine bağlı olarak kalın sayılan katılarda azalan kurutma hızı sürecinde önce kapılar kuvvetler daha sonra difüzyon etkin olmaktadır. Bu durum Şekil-1.3 te " E noktası " ile belirtilmiştir.

#### 1.4- KURUTMA PROSESİ ETÜDÜ

Buraya kadar anlatılanların ışığında, bir kurutma prosesinin etüdü için; önce sabit kurutma hızı sürecindeki kurutma hızını dış koşullara bağlı olarak hesaplamak, sonra bu hıza bağlı olarak azalan kurutma hızını hesaplamak ve kritik noktayı da bularak katının kurutulması için gerekli toplam zamanı formüle etmek gerekir. Böylece dış koşullara bağlı olarak kurutma zamanı formüle edilmiş olur ki buna göre kurutucu dizayn edilebilir. Daha önce (1.3.1) de açıklanan sebeplerden dolayı ısı transferi esas alındığında yapılması gerekli işler ;

- i) Transferin olduğu geometrik büyüklüğün tespiti ve ısı transfer katsayısının formülasyonu,
- ii) Kurutma zamanının formülasyonu,
- iii) Kritik noktanın tayinidir.

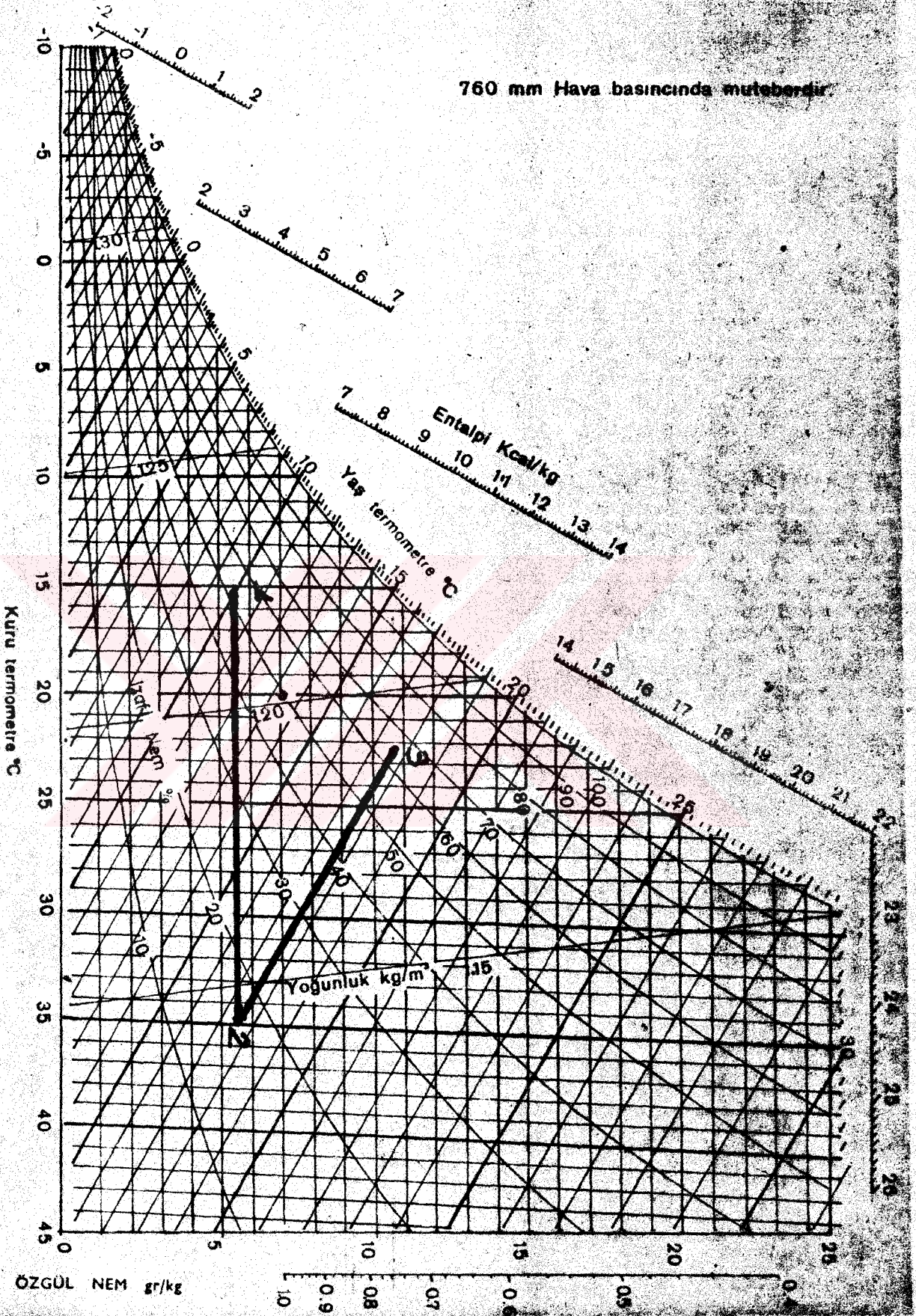
Bu çalışmada da bir kurutucu modeli geliştirilmiş ve bu prototip kurutucuda, santrifüjde sıkılmış yaş pamuğun kurutulması incelenerek yukarıdaki işlemler yapılmış; böylece endüstriye yeni bir kurutucu modeli sunulurken bu kurutucuyu dizayn etmek için gerekli formülasyon da sağlanmıştır. Bu arada literatürde bulunamayan kritik noktanın belirlenmesi gibi hususlara açıklık getirilirken kurutma zamanı hesabı için yeni bir formülasyon geliştirilmiş ve deneylerden yararlanarak ısı transferi katsayısı formüle edilmiştir.

basıncı, o sıcaklıkta suyun kaynama basıncına eşittir. Böylece hava ısıtıldıkça

$$\phi = \frac{P_b}{P_{b.d}}$$

eşitliği gereğince havanın bağıl nemi azalır. Yani havanın nem alma kabiliyeti artar. Bu durumu psikrometrik diyagramda da görmek mümkündür. Öte yandan, kurutulmakta olan katı yüzeyindeki buhar basıncı, yüzey sıcaklığındaki, yani havanın yaş termometre sıcaklığındaki suyun kaynama basıncına eşit olduğundan ve havanın sıcaklığı arttıkça yaş termometre sıcaklığıda artacağından madde transferi denklemindeki  $(P_s - P')$  çarpanı büyür ve kurutma hızıda büyür. Kurutma hızının büyüdüğünü ısı transferine göre yazılmış kurutma hızı denkleminde de görmek mümkündür. Hava sıcaklığının artışı yaş termometre sıcaklığının daha az artmasına sebep olduğundan bu denkleminde potansiyel farkını temsil eden  $(T_g - T_s)$  çarpanında büyür. Ayrıca, suyun buharlaşma ısısı yüzey sıcaklığına bağlı olduğundan, yüzey sıcaklığı arttıkça "r" böleni de azalır. Dolayısı ile kuruma hızı artar.

Rejim halindeki bir kurutma olayında, sabit kurutma hızı sürecinde, tamamen yalıtılmış bir kurutucu için havanın durum değiştirmesi bir adyabatik doyma olayıdır. Adyabatik doyma olayı ise hava ve su için atmosferik basınçlarda sabit yaş termometre sıcaklığı eğrileri üzerindedir. Yani havanın, kurutma esnasında yaş termometre sıcaklığı değişmez. Sıcak havadan yaş malzemeye transfer edilen ısı miktarı suyun buharlaşması için gerekli ısı miktarını karşılayacağından, bu duruma uygun  $\Delta w$  miktarında nemi bünyesine alarak, yani yaş malzemeyi kg kuru hava başına  $\Delta x$  kadar kurutarak kurutucuyu terk eder. Bu durumu Şekil-1.4 te görmek mümkündür. Burada 1-2 doğrusu çevre havasının sabit basınçta ısıtılmasını, 2-3 doğrusu da kurutucu içinde geçen durum değiştirmeyi temsil etmektedir.



Şekil : 1.4

## 2- ELYAF YAPILI MALZEMELERİN KURUTULMASINDA UYGULANAN YÖNTEMLER (1,2,3,5,6)

Endüstride yıkama, boyama, beyazlatma gibi işlemlere tabi tutulan elyaf yapılı malzemelerin daha sonraki işlemlerden önce kurutulmaları gerekir. Fakat doğrudan doğruya sıcak gaz akımlı bir kurutucuya alınmazlar. Çünkü bünyelerinde çok fazla nem vardır. Bu işlemi ucuzlatmak için; nemin bir kısmı önce mekanik yöntemlerle, meselâ santrifüjlerde sıkarak, alınır. Daha sonra kalan nemide gidermek için kurutucuya alınır ve sıcak gaz akımı içerisinde arzu edilen değere kadar kurutulurlar. Böylece daha ucuza sağlanan bir toplam kurutma elde edilmiş olur.

Endüstride uygulanan kurutma prosesleri biçimsel olarak farklar göstermekle birlikte, özde, genel olarak benzeşirler. Bu proseslerden bazıları aşağıda sıra ile tanıtılmıştır.

### 2.1- TEPSİLİ KÜTLE KURUTMASI

Şekil-2.1 de gösterilen bu yöntemle yağ malzeme tepsilere yerleştirilir. Sonra tepsiler bir kurutma odasının raflarına yerleştirilir. Odanın kapıları kapatıldıktan sonra tepsilerin üzerinden geçecek şekilde yönlendirilmiş sıcak hava vasıtası ile kurutulurlar. Kuruyan malzeme tepsilere alınır ve yerine yağ malzeme koyularak işlem yeniden başlatılır. Bu nedenle de " Kütle Kurutması " olarak adlandırılır. Bu kurutma esnasında kurutma prosesinin her iki sürecide geçerlidir. Yani malzeme önce sabit hız periyodunda kurumakta, bu periyod sürerken; malzemenin cinsine tepsinin kalınlığına bağlı olan kritik nem miktarına ulaşmakta ve azalan oran periyodunda kurumasına devam etmektedir.

Enerji harcamını azaltmak için kurutma sıcak havasının bir kısmı kullanıldıktan sonra taze hava ile karıştırılarak yeniden kullanılmak yoluna (By-Pass) gidilmektedir. Bu, bütün kurutucu sistemlere uygulanan bir yöntemdir.

Tepsili kurutmada kurutma olayının büyük bir kısmı, zaman bakımından azalan kurutma hızı sürecinde geçmektedir. Bu sebeple oldukça pahalı bir çözüm elde edilmektedir.

## 2.2- TEPİLİ SÜREKLİ KURUTMA

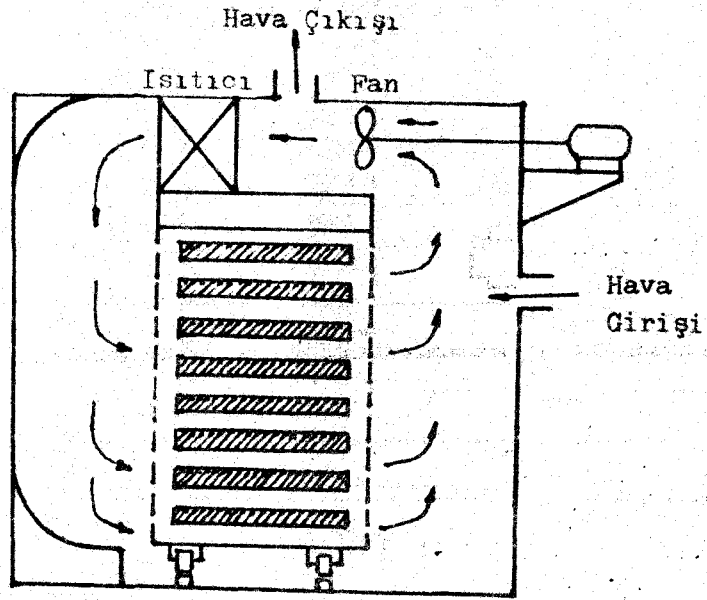
Bu sistemde; tepsiler ya taşıyıcı arabalar vasıtası ile sıcak hava akımına karşı veya aynı yönlü olarak hareket eder yada bir kurutma ünitesi içinde hareket eden taşıyıcı konveyör tepsi gibi kullanılır. (Şekil-2.2 - Şekil-2.3) Böylece bir taraftan giren yaş elyaf malzeme diğer taraftan kuru olarak çıkar ve sürekli bir kurutma elde edilmiş olur.

Teknolojik olarak sürekli kurutma sağlanması bakımından bir önceki sistemden farklı olmakla birlikte kurutma prosesi açısından tamamen aynıdır.

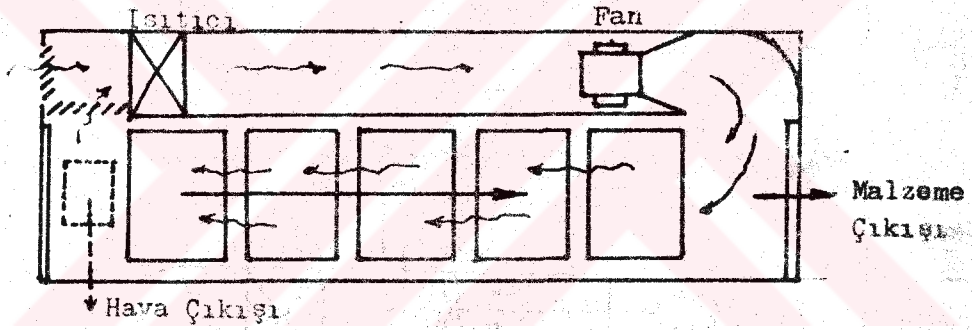
## 2.3- İÇTEN SİRKÜLASYONLU KURUTMA

Bu tiplerde tepsi veya konveyör bandı delikli yapılır ve kurutucu sıcak hava malzeme yüzeyine dik üflenerek, malzeme içerisinde bulunduğu kanallardan geçmesi sağlanır. Böylece sıcak havanın yaş malzemeyle daha çok temas etmesi sağlanarak transfer yüzeyi büyütülmüş olur. Sonuçta daha hızlı bir kurutma ve daha düşük seviyede kritik nem miktarı elde edilerek kurutma süresinin kısalması sağlanır. (Şekil-2.4)

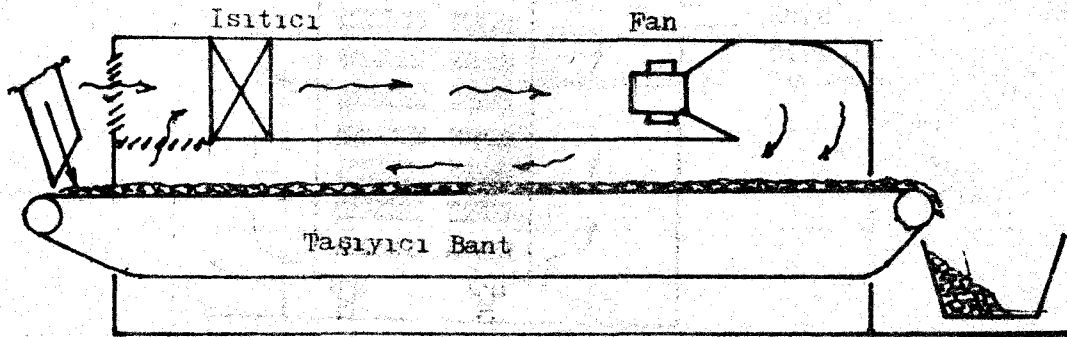
Bununla beraber; sağlanmış bulunan avantaj malzemenin cinsine santrifüjden çıktıktan sonraki yapısına ve gaz geçirgenlik durumuna bağlı olarak



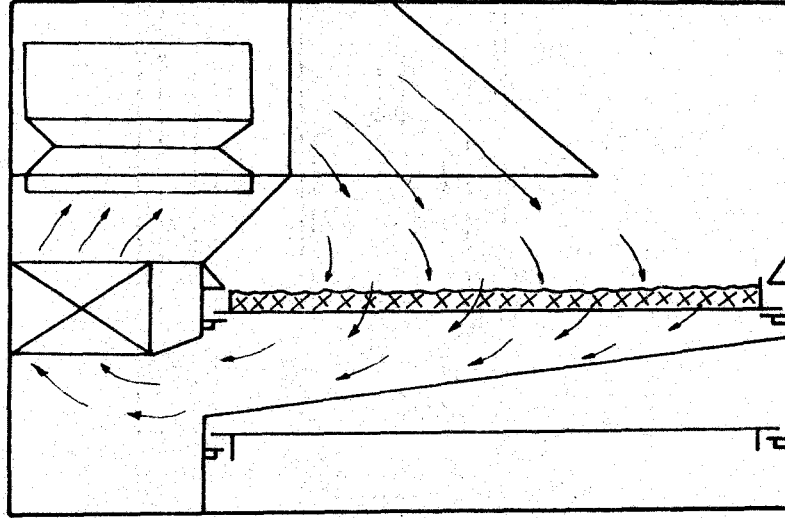
Şekil : 2.1



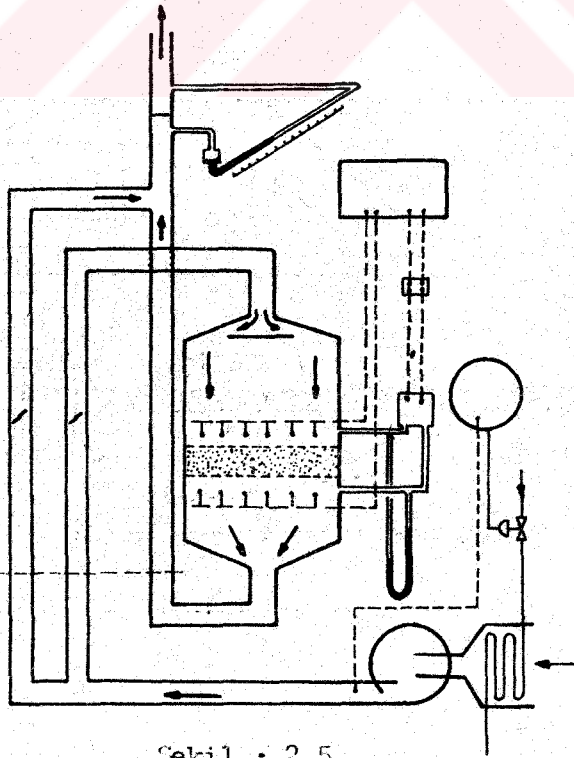
Şekil : 2.2



Şekil : 2.3



Şekil : 2.4



Şekil : 2.5



sınırlıdır. Örnek olarak yün kurutulmasında sağlanan avantaj pamuk kurutulmasında sağlanan avantajdan daha büyüktür. Tepsi diplerindeki delik sayısını arttırarak yada tepsi dibinde delikli sac yerine kafes teli kullanarak bu prosesi etkinleştirmek mümkündür.

Elyaf yapılı malzemeler ıslakken birbirlerine yapışmakta ve santrifüjde sıkma esnasında birbirlerine iyice bağlanarak, içinden gaz geçmesi çok güç olan malzeme topakları oluşturmaktadır. Bu yüzden, böyle bir kurutmaya tabi tutulmadan önce bu topakların parçalanması ve malzemenin homojen bir hale getirilmesi gerekmektedir. Bu işleme tekstil endüstrisinde " Yaş Açma " denmektedir.

Yaş açmaya tabi tutulmuş yün elyafları için kütle kurutması şeklinde bir içten sirkülasyonlu kurutucu modeli geliştirilmiş (Şekil-2.5) ve geliştirenler tarafından patenti alınmıştır (5).

#### 2.4- VAR OLAN YÖNTEMLERİN TARTIŞILMASI ve YENİ BİR MODELE YAKLAŞIM

Elyaf yapılı malzemelerin kurutulmasını hızlandırmak için madde transferini arttırmak gerektiği açıktır. Bu ise, kurutma olayı ısı transferinin zorladığı bir madde transferi olduğuna göre, ısı transferinin artırılması demektir.

Bunun için;  $Q = k \cdot F \cdot \Delta T$  denkleminde de açıkça görüldüğü gibi; ısı geçiş katsayısı  $k$ , ısı geçiş yüzeyi  $F$  ve ısı geçişini sağlayan potansiyel farkı  $\Delta T$  değişkenlerini arttırmak gerekir.

$\Delta T$  'yi büyütmek için havanın kurutucuya giriş sıcaklığının artırılması zorunludur. Hava giriş sıcaklığının artması; havanın yaş termometre sıcaklığına bağlı olduğu önceden görülmüş olan yaş malzemenin yüzey sıcaklığının da artması demektir. Oysa; elyaf yapılı malzemeler, diğer mal-

zemelerde de olduğu gibi, mekanik ve işlenebilme özellikleri bakımından belirli sıcaklıklara kadar ısıtılabilirler. Aksi takdirde bu özellikleri bozulur.

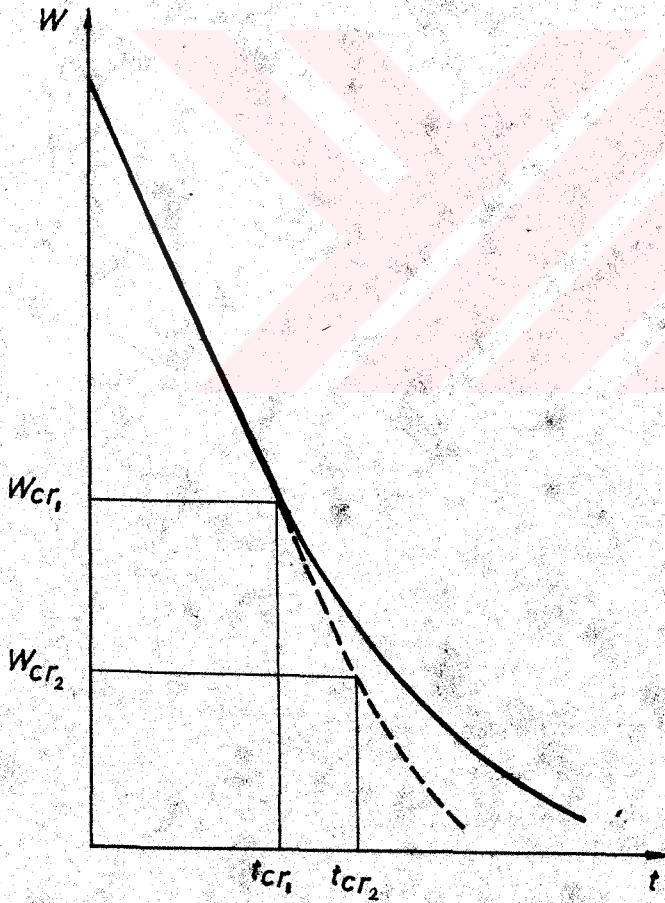
Öte yandan, hava sıcaklığını arttırmak işletme masraflarını da arttırmak demektir. Ayrıca, işletmelerde havanın ısıtılış usulleri bakımından da zorluklar ve ek yatırım masrafları çıkaracaktır. Sonuç olarak sıcaklık farkını fazla büyütmek mümkün değildir.

Yüzeyi büyütmek için ise; tepsilerdeki malzeme kalınlıklarını azaltmak, tepsi alt yüzeyinde kafes teli kullanarak çift yüzeyden kurumayı sağlamak, hatta sıcak havayı yaş malzemenin içinden geçirmek düşünülen önlemlerdir. Fakat bu şekilde sağlanan yüzey büyümesi tepsili kurutmalarda tepsi alt yüzeyinin ilâvesi ile sınırlı olduğu gibi, içten sirkülasyonlu kurutmada da sıcak havanın tüm kurutucu kesitine üniform dağılmayıp kendine elyaf- ların daha gevşek oldukları bölgeleri geçiş kanalları olarak seçmesi sebebiyle sınırlıdır. İçten sirkülasyonlu kurutmadaki bu durumun önüne geçebilmek için malzemeyi kurutmadan önce " Yaş Açma " işlemine tabi tutarak homojen ve gevşek bir yapıya getirdikten sonra sıcak havayı içerisinden geçirmek bir önlem olarak düşünülmüştür. Bu durumda da, prosese eklenen yaş açma işlemi göz ardı edilse bile, kurutma işlemi bazı sorunlar içerir. Bunların en önemlisi sonuçta homojen olmayan bir kurutmadır. Çünkü kurutucu içinde bulunan elyaf kümesinin sıcak hava ile ilk temas eden kısımları son kısımlara göre daha fazla kururlar. Baş taraftaki aşırı kuruma elyafların fiziksel özelliklerini, işlemlerini güçleştirecek şekilde bozduğu gibi, böyle elyaf- larla yapılmış ürünlerin kalitesini de kötüleştirdiği için hiç istenmeyen bir durumdur.

Isı geçiş katsayısı hava hızına bağlı bir güç fonksiyonudur (1,7). Hava hızları konstrüksiyona bağlı çeşitli sakinlerle sınırlandırılmıştır.

Örnek olarak; hava hızının artışı, dinamik basıncı, hızın karesi ile doğru orantılı olarak arttırır. Dinamik basınç yalnız akım yönünde olduğundan elyafların sıkışmasına sebep olur. Ayrıca, hava hızının artması, kullanılan sıcak hava miktarının da artması demek olduğundan; işletme masraflarını arttıracığı gibi, daha büyük kapasiteli tüfleçler kullanmayı gerektireceğinden tesis masraflarını da yükseltir.

Kurutma süresini kısaltmanın bir başka yolu da sabit kurutma hızı sürecini uzatarak azalan kurutma hızı sürecini kısaltmaktır. Bunun içinde kritik noktaya daha geç ulaşmak gerekir. Yani malzemenin kritik nem miktarını düşürmek gerekir (Şekil-2.6). Bu ancak malzemenin iyice açılıp gevşetilmesi



Şekil : 2.6

ile sağlanabilir. Böylece sıcak hava malzemeye daha iyi nüfuz eder. Öte yandan homojen bir kurutma elde etmek için de malzeme kurutma esnasında karıştırılmalıdır.

Bu düşüncelerden yola çıkarak ve birazda döner kurutucudan esinlenerek, kurutmadan önce ve kurutmadan sonra yapılan açma işlemleri ile kurutmayı aynı anda yapmak düşünülmüştür. Böylece bu çalışmanın esasını oluşturan yeni bir tip kurutucu üzerinde durulmuş ve " Mekanik Açıcılı Elyaf Kurutucusu " geliştirilmiştir.

### 3- MEKANİK AÇICILI ELYAF KURUTUCU ve YAPILAN ÇALIŞMALAR

#### 3.1- MEKANİK AÇICILI ELYAF KURUTUCU

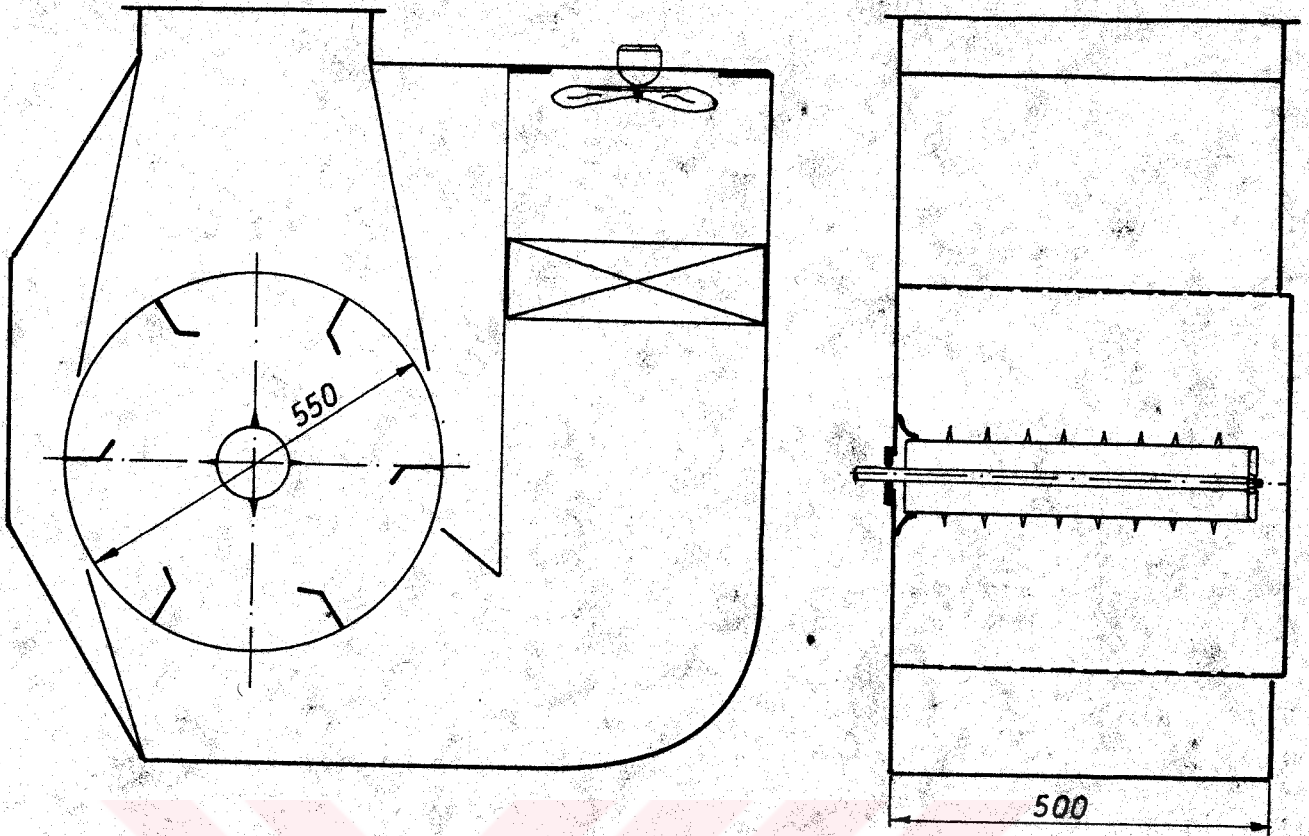
Şekil-3.1 de de görüldüğü gibi sistem iç içe döner iki tamburdan oluşmuştur. Bu tamburlardan büyük olanı, içinden radyal hava akımına izin verecek şekilde delikli olarak 304 kalitede paslanmaz çelikten yapılmıştır. Delikler Şekil-3.2 de görüldüğü gibi 5 mm. çaplı ve delik eksenleri arası 10 mm. dir. Bu ölçüler kurutma havasının kolayca geçişini sağlamak ve kısa elyafın taşınmasına önlem olarak seçilmiştir.

Şekil-3.3 küçük tambur hakkında bilgi vermektedir. Küçük tambur çevresinde, çevrede 4 sıra olmak üzere tambur ekseni boyunca elyafı fırlatmaya yarayan çiviler vardır. Düşük devirle (40 d/dak) dönen büyük tambur, içten çevresine radyal olarak yerleştirilmiş bulunan raflar vasıtası ile malzemeyi kaldırmakta ve yüksek devirle (1300 d/dak) dönen küçük tambur üzerine düşürmektedir. Küçük tambur, üzerine düşen elyaf kümesini fırlatarak atmakta ve böylece elyaf dağılarak açılmaktadır. Malzemenin kurutucu içinde bir bölgeye yığılmasını önlemek için her iki tambur da aynı yönde dönmektedir.

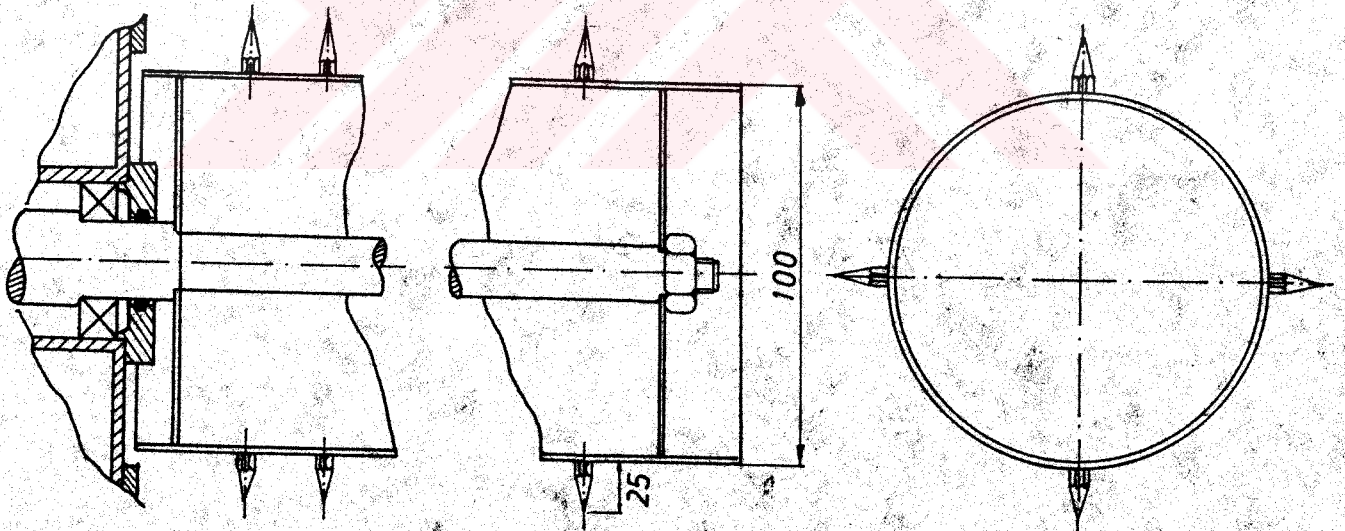
Bu tamburların yan tarafında, ayrı bir bölme içinde bulunan bir elektrikli ısıtıcı vasıtası ile ısıtılan taze hava, büyük tamburun alt tarafından gönderilip içinden geçirilerek yaş elyafı ile teması sağlandıktan sonra üst taraftan dışarıya atılmaktadır. Böylece homojen ve hızlı bir kurutma elde edilmektedir.

#### 3.2- KURUTMA DENEYLERİ

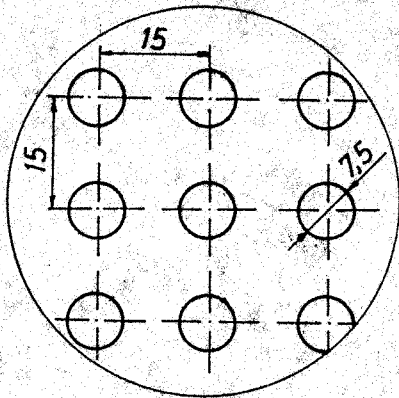
Deneyler esnasında; kurutucu üzerinde bulunan ölçü aletleri ve ısıtıcı ayar düğmelerinden yararlanarak yaş elyaf üzerine 35°C sıcaklığında %17 nemli sıcak hava gönderilmiştir. Hava sıcaklığının böyle düşük bir değerde



Şekil : 3.1



Şekil : 3.2



Şekil : 3.3

tutulmasının nedeni, daha yüksek sıcaklıklarda çok yüksek kurutma hızları dolayısı ile çok kısa kurutma süreleri elde edilmiş olmasıdır. Bu yüzden özellikle küçük kütlelerle deney yapılırken kurutma eğrisini çizebilmek için yeterli sayıda nokta elde edilememiştir. Nokta sayısını arttırmak için, hava sıcaklığını düşürerek, kurutma süresini uzatmak yoluna gidilmiştir.

Böylece, sabit hava miktarları için, % 100 nemli 100, 150, 200, 250, 300 gr kuru kütleli pamuk için deneyler tekrarlanmıştır. Endüstrideki şartlara yaklaşım sağlamak amacıyla, önce iyice ıslatılan elyaf bir çamaşır makinasının santrifüjünde % 100 neme kadar sıkılmıştır.

Aynı deneyler hava miktarı değiştirilerek fakat nem ve sıcaklığı sabit tutularak tekrarlanmıştır. Her bir deney bir çok defa yapıldıktan sonra deneyler arasından en uygunları seçilerek sabit hava miktarlarına göre gruplandırılmıştır.

### 3.3- KURUTMA EĞRİLERİ

Yukarıda açıklandığı gibi yapılan deneyler daha sonraki hesaplamaları kolaylaştırmak ve bu kurutucu tipinin değişik kapasiteler için dizaynında bir ölçü geliştirebilmek amacıyla kuru pamuk kitlesi yerine, " Doldurma Oranı " na göre çizilmişlerdir. Doldurma oranı; kuru pamuk kitlesinin, kurutucu büyük tamburunun hacmine oranı olarak tanımlanmıştır. Bu tanıma göre doldurma oranının matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$P = \frac{M}{V} \quad \text{kg pamuk / m}^3$$

Deneylerin üzerinde yapıldığı model kurutucu ve deneyler esnasında kullanılan kuru pamuk kütlelerine göre deneylere esas oluşturan doldurma oranları şunlardır.

$$P_1 = \frac{0,100}{0,108} = 0,926 \quad \text{kg Pamuk / m}^3$$

$$P_2 = \frac{0,150}{0,108} = 1,389 \quad \text{kg Pamuk / m}^3$$

$$P_3 = \frac{0,200}{0,108} = 1,852 \quad \text{kg Pamuk / m}^3$$

$$P_4 = \frac{0,250}{0,108} = 2,315 \quad \text{kg Pamuk / m}^3$$

$$P_5 = \frac{0,300}{0,108} = 2,778 \quad \text{kg Pamuk / m}^3$$

Deneyler sırasında elde edilen zamana bağıl nem miktarları Tablo-3.1 - 3.2 - 3.3 ve 3.4 te verilmiştir. Bu değerlerin grafik üzerinde gösterilmesi teorik çalışmalar ve deney sonuçlarının bunlara göre değerlendirilmesi sonucu, aynı şartlar için çizilmiş kurutma eğrileri ile birlikte yapılmıştır. Böylece deneylerle elde edilen noktalar ile hesaplamalar sonucu çizilen eğriler arasında bir karşılaştırma imkânı doğmuştur. Bu karşılaştırma daha ileride ayrı bir bölüm olarak ele alınmış, yaklaşımlar ve farklar açıklanmaya çalışılmıştır.

Deneyler sonucu elde edilen noktalar oldukça düzgün eğriler göstermektedir. Bu düzgünlükte noktaların nem miktarına göre işaretlenmesinin büyük payı vardır. Bunu bir örnekle açıklamak daha kolay olacaktır :

200 gr kuru kütleli bir deneyde 4.dakikada 18 gr su, 5.dakikada 15 gr su buharlaştırılmış olsun ve bu ölçüler sabit kurutma hızı sürecinde bulunmuş olsun. İdeal bulguda her iki ölçüde de buharlaştırılan miktarların eşit olması gerekirken 3 gr 'lık bir fark söz konusudur.

TABLO : 3.1

$t = 35^{\circ}\text{C}$

$\phi = 0,17$

$G_D = 28,503 \text{ kg.kuru hava / m}^2 \cdot \text{dak}$

t	Kuru Kütile M = 100 gr		Kuru Kütile M = 150 gr		Kuru Kütile M = 200 gr		Kuru Kütile M = 250 gr		Kuru Kütile M = 300 gr	
	$M_y$	w	$M_y$	w	$M_y$	w	$M_y$	w	$M_y$	w
0	200	1	300	1	400	1	500	1	600	1
1	175	0,75	270	0,80	368	0,84	469	0,876	573	0,910
2	154	0,54	244	0,626	338	0,69	442	0,768	548	0,826
3	133	0,33	213	0,420	310	0,55	413	0,652	527	0,756
4	113	0,13	185	0,233	280	0,40	390	0,560	504	0,680
5	-	-	165	0,10	251	0,255	363	0,452	485	0,616
6			-	-	230	0,150	335	0,340	461	0,536
7					210	0,050	313	0,252	438	0,460
8					-	-	290	0,160	418	0,393
9							275	0,100	394	0,313
10							259	0,036	375	0,250
11							-	-	355	0,183
12									342	0,140
13									322	0,073
14									309	0,030
15									-	-



TABLO : 3.2

$t = 35^{\circ}\text{C}$        $\rho = 0,17$        $G_D = 25,494 \text{ kg.kuru hava / m}^2 \cdot \text{dak}$

t	Kuru Kütle M = 100 gr		Kuru Kütle M = 150 gr		Kuru Kütle M = 200 gr		Kuru Kütle M = 250 gr		Kuru Kütle M = 300 gr	
	$M_y$	w	$M_y$	w	$M_y$	w	$M_y$	w	$M_y$	w
0	200	1	300	1	200	1	500	1	600	1
1	180	0,80	276	0,84	374	0,870	475	0,900	578	0,926
2	160	0,60	254	0,693	350	0,750	452	0,808	559	0,863
3	145	0,45	231	0,540	328	0,640	429	0,716	537	0,79
4	125	0,25	210	0,400	304	0,520	408	0,632	522	0,74
5	110	0,10	189	0,260	281	0,405	386	0,544	503	0,676
6	-	-	171	0,140	258	0,29	361	0,444	484	0,613
7			155	0,033	240	0,200	340	0,360	465	0,550
8			-	-	223	0,115	320	0,280	445	0,483
9					205	0,025	301	0,204	428	0,426
10					-	-	283	0,132	412	0,373
11							264	0,064	393	0,310
12							250	0,000	382	0,273
13							-	-	366	0,220
14									345	0,150
15									338	0,126
16									327	0,090
17									314	0,046
18									303	0,010
19									-	-

TABLO : 3.3

$t = 35^{\circ}\text{C}$        $\phi = 0,17$        $G_D = 22,079 \text{ kg.kuru hava / m}^2 \cdot \text{dak}$

t	Kuru Kütle M = 100 gr		Kuru Kütle M = 150 gr		Kuru Kütle M = 200 gr		Kuru Kütle M = 250 gr		Kuru Kütle M = 300 gr	
	$M_y$	w	$M_y$	w	$M_y$	w	$M_y$	w	$M_y$	w
	0	200	1	300	1	400	1	500	1	600
1	183	0,83	278	0,853	378	0,890	477	0,908	582	0,940
2	167	0,67	259	0,726	357	0,785	458	0,832	566	0,886
3	152	0,52	242	0,613	341	0,705	440	0,762	549	0,830
4	137	0,37	225	0,500	322	0,610	426	0,704	535	0,783
5	124	0,24	206	0,373	305	0,525	408	0,632	504	0,680
6	112	0,12	186	0,240	283	0,415	388	0,552	489	0,630
7	103	0,03	170	0,133	265	0,325	373	0,492	474	0,580
8	-	-	157	0,046	250	0,250	353	0,412	456	0,520
9			151	0,006	235	0,175	333	0,332	440	0,466
10			-	-	220	0,100	316	0,264	425	0,416
11					210	0,050	306	0,224	412	0,373
12					-	-	291	0,164	397	0,323
13							281	0,124	385	0,283
14							275	0,100	370	0,233
15							262	0,048	362	0,206
16							-	-	351	0,170
17									342	0,140
18									330	0,100
19									320	0,066
20									311	0,036
21									304	0,013
22									-	-

**TABLO : 3.4**

$t = 35^{\circ}\text{C}$        $\phi = 0,17$        $G_D = 18,027 \text{ kg.kuru hava / m}^2.\text{dak}$

t	Kuru Kütle		Kuru Kütle		Kuru Kütle		Kuru Kütle		Kuru Kütle	
	M <sub>y</sub>	w	M <sub>y</sub>	w	M <sub>y</sub>	w	M <sub>y</sub>	w	M <sub>y</sub>	w
0	200	1	300	1	400	1	500	1	600	1
1	187	0,87	286	0,906	386	0,930	486	0,944	588	0,960
2	175	0,75	275	0,813	371	0,855	470	0,880	576	0,920
3	164	0,64	259	0,726	353	0,765	456	0,824	562	0,873
4	151	0,51	244	0,626	339	0,695	446	0,784	550	0,833
5	140	0,40	229	0,526	327	0,635	432	0,728	540	0,800
6	128	0,28	218	0,453	314	0,570	418	0,672	528	0,760
7	120	0,20	206	0,373	300	0,500	403	0,612	519	0,73
8	108	0,08	192	0,280	286	0,430	391	0,564	504	0,680
9	103	0,03	178	0,186	274	0,370	375	0,500	492	0,640
10	-	-	168	0,120	259	0,295	364	0,456	477	0,59
11			159	0,060	244	0,220	353	0,412	468	0,560
12			152	0,013	237	0,185	337	0,348	456	0,520
13			-	-	225	0,125	321	0,284	447	0,490
14					220	0,100	308	0,238	435	0,450
15					209	0,045	299	0,196	420	0,400
16					204	0,020	288	0,152	412	0,373
17					-	-	281	0,124	405	0,350
18							265	0,060	390	0,300
19							262	0,048	384	0,280
20							206	0,024	375	0,25
21							-	-	363	0,210
22									350	0,166
23									341	0,136
24									333	0,110
25									321	0,070
26									315	0,050
27									308	0,028
28									303	0,010
29									-	-

Fakat bu değerler nem miktarına çevrildiğinde,  $18/200 = 0,09$  ve  $15/200 = 0,075$  değerlerine dönüşürler. Görüldüğü gibi 3 gr 'lık fark,  $\Delta w = 0,015$  kg su/kg kuru pamuk farkına dönüşmüştür. Bu farkı diyagram üzerinde kolayca görebilmek mümkün değildir. Bu nedenle de noktaların sıralanışı çok düzgün görünüşlüdür.

### 3.4- KURAMSAL YAKLAŞIMLAR

Deney sonuçlarını gösteren tablolardan da görüldüğü gibi; açma ve kurutma işlemini aynı anda yapmak sabit kurutma hızı sürecinin uzamasına sebep olmuştur. Çünkü açmanın iyiliğine bağlı olarak, elyafın kümeleşmesi sonucu oluşan kapilar boşluklar en aza indirilmiştir. Ayrıca sıcak hava ile yaş elyafın daha iyi teması sağlandığından büyük transfer yüzeyleri oluşmuş, sonuçta hızlı bir kurutma prosesi elde edilmiştir. Fakat, açma bir sınır dahilinde gerçekleştiği için yine de bir azalan hız süreci ve bir kritik nokta vardır. Bu yüzden, deneylerin değerlendirilmesine kritik noktayı bularak başlamak gerekmektedir.

#### 3.4.1- Kritik Noktanın Bulunması

Yapılan literatür araştırmalarında kritik noktanın deneysel olarak bulunacağı görülmüş ancak deneylerin nasıl değerlendirileceğine rastlanamamıştır. Bu nedenle bu bölümde kritik noktanın nasıl bulunabileceğine dair dört öneri sunulmuştur. Bunlardan ikisi deneyle bulunan noktaların değerlendirilmesi esasına, diğer ikisi de deney sırasında dış koşulların çıkış değerlerinin ölçülmesine dayanır.

Deneylerle elde edilen noktaların değerlendirilmesi aslında regresyon analizine dayanır. Regresyon analizi ile her bir kurutma eğri bütünüünün sabit kurutma hızı ve azalan kurutma hızı süreçlerini oluşturan parçaların

denklemleri bulunur. Sabit kurutma hızı sürecinde kurutma eğrisi denklemi  $a_1 - b_1 t$  şeklinde bir doğru denklemi olmalıdır. Burada  $b_1$  kurutma hızını temsil etmektedir. Azalan kurutma hızı sürecini temsil eden eğrinin son kısmına çeşitli eğriler için regresyon analizi uygulayarak bunların karar katsayısı 1'e en yakın olanı seçilebilir. Bu çalışmaya esas olan deneylerde en iyi temsil eden eğrinin ( $r^2 > 0,9$ )  $w = a_2 - b_2 \ln t$  şeklinde logaritmik bir eğri olduğu görülmüş ve açıklamalar bu eğri türüne göre yapılmıştır. Zaten bu husus bundan sonraki bölümde açıklanacak kuramsal bulgularla da desteklenmiştir.

Kritik nokta her iki sürecin ortak noktası olduğuna göre her iki eğri de kritik noktada aynı değeri almalı, yani;

$$a_1 - b_1 t = a_2 - b_2 \ln t \quad \text{olmalıdır.}$$

Bu eşitlik  $t$ 'ye çeşitli değerler verilerek çözülebilir. Böylece bulunan  $t$  değeri kritik noktayı veren değer olduğu için denklemlerden birinde yerine koyularak kritik nem miktarı bulunabilir.

Bundan başka tam kritik noktada; kurutma olayının sürekliliği sebebi ile her iki eğrinin türevleri yani, kritik noktada her iki eğriye göre kurutma hızları birbirine eşit olmalıdır.

$$w = a_1 - b_1 t$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{dw}{dt} = -b_1$$

$$w = a_2 - b_2 \ln t$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{dw}{dt} = \frac{-b_2}{t}$$

$$t = t_{cr} \quad \text{için}$$

$$b_1 = \frac{b_2}{t_{cr}} \quad \longrightarrow \quad t_{cr} = \frac{b_2}{b_1}$$

bulunur ve her iki denklemde t yerine bu değer koyularak kritik nem miktarı bulunabilir.

$$w_{cr} = a_1 - b_2$$

$$w_{cr} = a_2 - b_2 \ln \frac{b_2}{b_1}$$

Her iki denklemden yukarıdaki şekilde hesaplanan  $w_{cr}$  değerleri birbirine eşit olmalıdır. Ancak ölçme hataları yüzünden farklılık olabilir. Bu durumda aritmetik ortalamaları alınabilir ya da hesaplamalarda kullanılacağına göre hesapların emniyetli olması bakımından büyük olanı kabul edilebilir.

Aynı durum eğrilerin eşitlenmesi ile bulunan  $w_{cr}$  değeri ile, türevlerinin eşitlenmesi ile bulunan  $w_{cr}$  değeri için de geçerlidir. Kritik noktanın bulunması ile ilgili ikinci bir yaklaşım da sabit kurutma hızı sürecinin denklemleri analiz edilerek ortaya çıkartılabilir.

Malzemenin içerdiği nem miktarı kütleli olarak  $M.w$  değerine eşittir. Birim zamanda malzemenin nem kaybı  $-\partial(M.w)/\partial t$  yahut, malzemenin kütlesi sabit olduğuna göre  $-M(\partial w/\partial t)$  olur. Kurutma hızının sabit olduğu durumda bu değer de sabittir. Bu durumda hava ve taşınan nem arasındaki enerji alışverişi yazılırsa; havanın kaybettiği enerjinin, nemin yüzey sıcaklığında buharlaştırılmasına sonrada bu buharın havanın çıkış sıcaklığına yükseltilmesine harcadığı görülür.

$$-M \frac{\partial w}{\partial t} (r + C_{P_B} (T_g - T_y)) = -M_H (1 + X_1) C_{P_{x_1}} (T_g - T_g)$$

Burada;

M : Kuru malzeme kütlesi (kg)

- $\frac{\partial w}{\partial t}$  : Kuruma hızı (1/dak)
- $r$  : Yüzey sıcaklığında su buharının buharlaşma ısısı (KCall/kg)
- $C_{P_B}$  : Su buharının ısınma ısısı (KCall/kg °C)
- $T_{\phi}$  : Havanın çıkış sıcaklığı (°C)
- $T_y$  : Malzemenin yüzey sıcaklığı (°C)
- $M_H$  : Birim zamanda üflenen kuru havanın kütlesi (kg/dak)
- $X_1$  : Havanın giriş anındaki mutlak nemi (kg/kg)
- $C_{P_{x_1}}$  :  $x_1$  nemliğindeki havanın ısınma ısısı (KCall/kg °C)
- $T_g$  : Havanın giriş sıcaklığı (°C)' dir.

Bu eşitlik çıkış sıcaklığına göre çözülürse

$$T_{\phi} = \frac{-M \frac{\partial w}{\partial t} (r - C_{P_B} T_y) + M_H (1 + X_1) C_{P_{x_1}} T_g}{M \frac{\partial w}{\partial t} C_{P_B} + M_H (1 + X_1) C_{P_{x_1}}}$$

eşitliği elde edilir.

Görülür ki sabit hız süreci için  $T_y$  ve  $(\partial w / \partial t)$  değerleri sabit olduğundan havanın çıkış sıcaklığı  $T_{\phi}$  de sabit olmak zorundadır. Buna göre, havanın çıkış sıcaklığını sürekli kontrol etmek suretiyle değiştiği anı tespit ederek bunu kritik noktaya ulaşılma anı kabul edip, bu andaki nem miktarını ölçerek kritik nokta bulunabilir.

Bir üçüncü yöntem de sistemde maddenin sakınımı araştırılarak elde edilebilir.

Kurutucu hava tarafından birim zamanda alınan nem miktarı  $M_H \cdot \Delta X$ , bu sırada malzemenin nem değişimi  $-M(\partial w / \partial t)$  dir. Yani ;  
 $M_H \cdot \Delta X - M(\partial w / \partial t) = 0$  dır. Bu denklem düzenlenirse  
 $M_H \cdot \Delta X = M(\partial w / \partial t)$  eşitliği elde edilir. Sabit kurutma hızı süreci için, eşitliğin sağ tarafı sabit olduğuna göre sol tarafı da sabit olmak zorundadır. Kurutmak için birim zamanda üflenen kuru hava kütlesi  $M_H$  sabit tutulursa  $\Delta X$  de sabit kalmak zorundadır.  $\Delta X$  'in azalmaya başladığı an kritik noktaya ulaşılan andır. Bu anda malzemenin nem miktarı ölçülerek kritik nokta bulunabilir.

Bu çalışmada kritik nokta için regresyon analizi metodları kullanılmıştır. Yukarıda açıklanan hesaplar sonunda deneylerin yapıldığı kurutucu modelinde kritik nem miktarının 0,31 kg nem/kg pamuk kabul edilebileceği bulunmuştur. Halbuki açma uygulanmadan santrifüjden çıkmış yaş pamuğun kritik nem miktarının, sıkışmış elyaf kümesinin santrifüjden çıkarırken parçalanmasına bağlı olarak 0,60 değerinin altına düşmediği görülmüştür. Bu durumda kurutma esnasında elyafın açılmasının kritik nem miktarını en az yarı yarıya azaltarak bu açıdan amaca ulaşıldığı söylenebilir.

Bu arada son iki doldurma oranı için ( $2 \text{ kg/m}^3$  ten büyük) kritik nem miktarının az da olsa yükselme eğiliminde olduğu gözlenmiştir.

#### 3.4.2- Kurutma Süresinin Hesabı

Kurutma süresinin hesabı, kurutucu dizaynı probleminin en önemli adımıdır. Bir kurutucu dizayn edilirken; belli bir başlangıç nemine sahip yaş malzemenin arzulan bir çıkış nemine, özellikleri belirli bir kurutucuda ne kadar zamanda ulaşılabileceğini bilmek; aynı zamanda, arzulan bir kurutma debisine hangi dış koşullar altında o kurutucuda ulaşılabileceğini bilmek demektir. Böylece, arzulan kurutma debisine uygun kurutucu şartla-



rı belirlenerek kurutucuyu dizayn etme olanağı doğar.

Kurutma süresinin hesabında ise, çekilen güçlük azalan kurutma hızı sürecinden kaynaklanmaktadır. Sabit kurutma hızı sürecinde geçen kurutma zamanı aşağıdaki gibi kolayca hesaplanabilir.

$$M \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)_c = \frac{Q}{r} = \frac{k \cdot F \cdot \Delta T}{r} \quad \text{integre edilirse ;}$$

$$t_s = \frac{M \cdot r}{k \cdot F \cdot \Delta T} (w_o - w) \quad w = w_{cr}$$

bulunur.

Burada kurutucu gazdan transfer edilen ısının tamamının yaş malzemenin yüzey sıcaklığında buharlaşma ısısına harcadığı varsayılmıştır.

Fakat azalan kurutma hızı sürecinde kurutma zamanını hesaplayabilmek için, kurutma hızının ne şekilde azaldığını veya söz konusu malzemenin kuruma eğrisini bilmek gerekir.

Birçok araştırmacı (1,2,3) azalan kurutma hızı sürecinde, hakim faktörün kapılar kuvvetler olduğu gözenekli malzemelerin kurutulmasında - ki elyaf yapılı malzemeler bu türdendir - kurutma hızının lineer olarak azaldığını veya yaş katının her an bünyesinde bulunan nem miktarına bağlı olarak azaldığını kabul etmenin uygun bir yaklaşım olduğunda birleşmişlerdir. Bunun sonucunda azalan kurutma hızı sürecinde geçen kurutma zamanını;

$$t_a = \frac{w_c - w_e}{\left( \frac{dw}{dt} \right)_c} \cdot \ln \frac{w_c - w_e}{w - w_e} \quad w > w_c$$

şeklinde vermişlerdir.

Böylece toplam kurutma zamanını  $t_t = t_s + t_a$  şeklinde bulmak mümkündür.

Ayrıca, Doç.Dr.Bilgin Kısakirek bir araştırmasında (8) şöyle bir denklem vermiştir.

$$t_a \cdot \frac{(dw/dt)_c}{w_c} = e_1 \left( \frac{w_c - w_e}{w_c} \right) + e_2 \left( \frac{w_c - w_e}{w_c} \right)^2 + e_3 \left( \frac{w_c - w_e}{w_c} \right)^3$$

Burada  $e_1, e_2, e_3$  sabitler olup,  $e_1 = 1$ ; ince katılar için  $e_3 = 0$  olarak verilmiş, genellikle  $e_2$  ve  $e_3$ 'ün bilgilerden takdir edileceği belirtilmiştir.

Yine aynı çalışmada bir dizi denklem geliştirilmiş ve bu denklemlerle uygulanacak yaklaşım hesabı ile kurutma zamanının bulunmasına bir örnek verilmiştir.

Aynı araştırmacı T.B.T.A.K. 5.Bilim Kongresine sunduğu tebliğinde (9) aşağıdaki diferansiyel denklemi geliştirmiştir.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = K_4 \left( \frac{\partial^2 w^P}{\partial z^2} \right) - K_5 \cdot w^P \cdot \left( \frac{\partial w^P}{\partial z} \right)$$

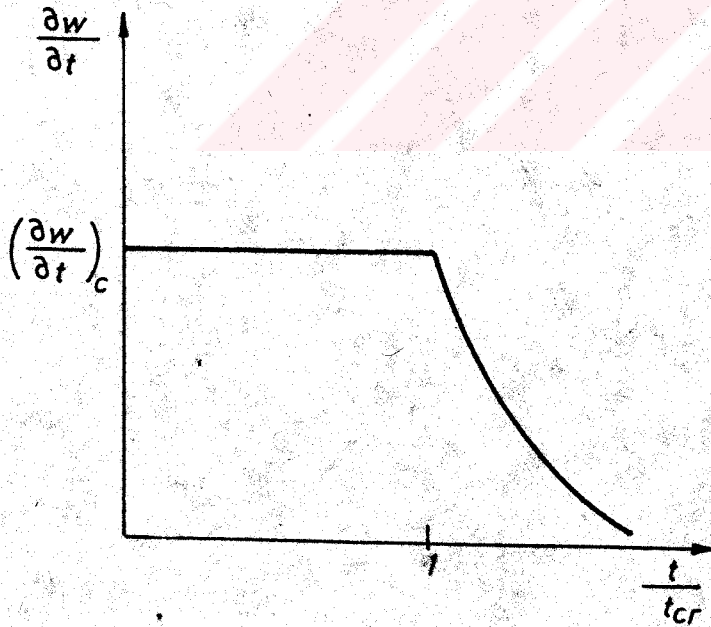
Burada  $K_4$  ve  $K_5$  sabitler olup,  $z$  katının derinliğini temsil etmektedir.  $P = 1,5$  alınmıştır. Yukarıdaki denklemin analitik çözümünün imkânsızlığından söz edilerek Crank-Nicolson nümerik metodu ile çözüldüğü belirtilmiştir.

Bunlardan başka Van Vorst modeli ve Toei-Okazaki modelleri gibi daha birçok kılcal akım kurutma modeli vardır (10).

Bu kısa açıklamadan da anlaşılacağı gibi henüz kılcal akım kurutma modeli üzerinde genel bir anlaşma sağlanamamıştır. Bu alanda birçok değerli

çalışma bulunmasına rağmen kesin bir hesap yöntemi yoktur. Çalışmalar daha ziyade, bilimsel tartışmalar zemininde kalmış, endüstri uygulamalarında kullanılma genelliğine erişememiştir. Endüstride, genellikle lineer yaklaşım esas alınmakta ve dolayısıyla, tecrübelerle dayalı emniyet katsayıları kullanılmaktadır.

Bu çalışmaya esas olan kurutucu modelinde ise diğer çalışmalarda bulunmayan, " Açma Olayının " sebep olduğu açma kuvvetleri vardır. Ayrıca deneyler sonucunda, tablolardan da anlaşılacağı gibi, kurutma biterken, kurutma hızı sifıra ulaşmamıştır. Halbuki lineer yaklaşım modelinde, kurutma hızı malzemenin nem miktarı ile orantılı olduğu için kurutma biterken sıfır olmaktadır. Bu durumda; gerek açma olayı hesaba katılmadığı, gerekse kurutma hızının kurutma biterken sıfır oluşu nedenleri ile açıcılı elyaf kurutucu için lineer yaklaşım modeli yeterli değildir. Bu yüzden yeni bir yaklaşım geliştirilmelidir.



Şekil-3.4

Açma olayı zamanla gelişen bir olay olduğuna göre; kurutma hızını sürekli olarak olumlu yönde etkileyecektir. Bunun için, geliştirilen modeldeki kurutma hızını zamana bağlamak düşünülmüştür. Fakat, gerçek zaman kurutma şartları değiştikçe, değişiklikler göstermektedir. Bu nedenle birimsiz bir zaman fonksiyonu düşünülmelidir.

Bu amaçla Şekil-3.4 te görüldüğü gibi zaman  $(t/t_{cr})$  birimsiz zaman fonksiyonu ile gösterilmiştir. Burada  $t$ , kurutma sırasında herhangi bir zamanı,  $t_{cr}$  'de kritik noktaya ulaşırken geçen zamanı belirtmektedir.  $(t/t_{cr})=1$  olduğunda kritik noktaya ulaşılmakta ve bu andan itibaren kurutma hızı sürekli olarak azalmaktadır. Bir yaklaşım olarak; azalan hız sürecinde, kurutma hızının birimsiz zaman fonksiyonu ile ters orantılı olduğu kabul edilebilir. Aynı zamanda birimsiz zaman fonksiyonu 1 'e eşit olduğunda, kurutma hızı sabit kurutma hızına eşit olduğuna göre ;

$$-\frac{dw}{dt} = \frac{(dw/dt)_c}{(t/t_{cr})} \dots\dots\dots (1)$$

yazılabilir. Bu denklem düzenlendiğinde,

$$\int_{w_{cr}}^w dw = -\left(\frac{dw}{dt}\right)_c \cdot t_{cr} \cdot \int_{t_{cr}}^t \frac{dt}{t} \dots\dots\dots (2)$$

$$w - w_{cr} = -\left(\frac{dw}{dt}\right)_c \cdot t_{cr} \cdot \ln(t/t_{cr}) \dots\dots\dots (3)$$

şeklini alır. Öte yandan,

$$\left(\frac{dw}{dt}\right) \cdot t_{cr} = w_o - w_{cr} \dots\dots\dots (4)$$

olduğuna göre denklem yeniden düzenlendiğinde,

$$w = w_{cr} - (w_o - w_{cr}) \ln(t/t_{cr}) \dots\dots\dots (5)$$

bulunur.

Bu denklem; integrasyondaki sınır şartları ve başlangıçtaki kabul dolayısı ile kurutma eğrisinin özelliklerini de sağlamaktadır. Kurutma eğrisinin birinci kısmı, yani; sabit kurutma hızı sürecini temsil eden kısmı

$$w = w_0 - \left(\frac{dw}{dt}\right) \cdot t \quad \dots\dots\dots (6)$$

şeklindedir.

Buna göre ;

1-  $t = t_{cr}$  anında her iki denklemde de  $w = w_{cr}$  olmalıdır.

2- Kritik nokta üzerinde, kurutma olayının sürekliliği dolayısı ile her iki eğrinin eğimleri de birbirine eşit olmalıdır.

5 nolu denklemle her iki şartda sağlanmıştır. Dolayısı ile bu denklemi kurutma süresinin hesabında kullanmak mümkündür.

5 nolu denklemde ;

$$t_{cr} = \frac{w_0 - w_{cr}}{\left(\frac{dw}{dt}\right)_c} \quad \text{koyulur ve } t^* \text{ 'ye göre çözülrse toplam kurutma süresini veren}$$

$$t_t = \frac{w_0 - w_{cr}}{\left(\frac{dw}{dt}\right)_c} \cdot e^{-(w - w_{cr}) / (w_0 - w_{cr})} \quad \dots\dots\dots (7)$$

denklemini elde edilir.

Bölüm 3,6 'da denklem 3.5 'e göre çizilmiş kurutma eğrileri ile deneysel bulunan noktalar aynı diyagram üzerine çizilerek tartışılmış ve oldukça yeterli bir yaklaşım sağlandığı görülmüştür.

### 3.5- ISI GEÇİŞİNİN HESABI

#### 3.5.1- Giriş

Kurutma olayında en önemli özellik madde transferinin bulunmasıdır. Bölüm 3.4 te kurutma süresi hesaplanırken, azalan kurutma hızı sürecinde kurutma hızı, sabit kurutma hızı sürecindeki kurutma hızına (sabit kurutma hızı) bağlı olarak belirtilmişti. Bu durumda

$$\frac{dW}{dt} = M \cdot \frac{dw}{dt} \quad \text{olduğuna göre,}$$

sabit kurutma hızını hesaplamakla transfer edilen su her iki süreç içinde bulunmuş olacaktır. Diğer taraftan sabit kurutma hızı sürecinde,

$$M \left( \frac{dw}{dt} \right)_c = \frac{Q}{r} \quad \text{olduğu belirtilmişti.}$$

O halde transfer edilen ısı miktarını hesaplamak hem kurutma hızını hem de, madde transferini bulmaya yetecektir.

Bilindiği gibi transfer edilen ısı; ısı geçiş katsayısı, ısı geçişinin meydana geldiği geometrik büyüklük (genellikle yüzeydir) ve ısı geçişine sebep olan potansiyel farkı  $\Delta T$ 'nin birbirleriyle çarpımına eşittir.

Açıcıly elyaf kurutucuda ısı geçişinin meydana geldiği geometrik büyüklük; büyük tamburun hacmi ile sınırlanmış hacim içerisinde küçük elyaf kümelerinin oluşturduğu yüzeyler toplamıdır. Fakat bu çalışmada, benzer kurutma olaylarında (1,2,3) ve bir hacim içerisinde ısı geçiş söz konusu olduğunda çoğunlukla uygulandığı gibi (7) ısı geçişinin meydana geldiği geometrik büyüklük olarak, ısı geçişinin içinde olduğu hacim, yani; büyük tambur hacmi esas alınmıştır. Bunun sonucu olarak ısı geçiş katsayısı da

birim yüzeyden değil, fakat birim hacımdan, bir derece sıcaklık farkı için birim zamanda geçen ısı miktarı olarak tanımlanmıştır (7). Böylece bu hacim içindeki yüzeyciklerin etkisi ısı geçiş katsayısı içinde hissedilecektir. Bu metod çok kullanıldığı ve uygulamada hesapları kolaylaştırdığı için tercih edilmiştir. Eğer yüzey ısı geçiş katsayısı kullanılsa idi birim hacımdaki kurutmaya esas olan yüzey toplamının kullanılması gerekcekti.

Isı geçiş katsayısının sabit kabul edilebileceği bu gibi durumlarda ısı geçişine sebep olan potansiyel farkı ise; yüzey sıcaklığı sabit olduğu için bu sıcaklıktaki buharlaşma ısısı da sabit olacağından ve aslında, ısı geçişi çok küçükde olsa sınırlı yüzeylerde meydana geleceğinden " Logaritmik Ortalama Sıcaklık Farkı " dır.

Bu açıklamalara göre;

$$Q = k_v \cdot V \cdot \Delta T_m$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_g - T_y) - (T_\phi - T_y)}{\ln \frac{T_g - T_y}{T_\phi - T_y}}$$

olurlar. Burada ;

$T_g, T_\phi, T_y$  : Sıcak havanın giriş, çıkış ve yaş termometre sıcaklıklarını ( $^{\circ}\text{C}$ )

$k_v$  : Hacımsal ısı geçiş katsayısını ( $\text{KCal}/\text{m}^3 \cdot \text{dak} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )

$V$  : Büyük tambur hacmini ( $\text{m}^3$ )

göstermektedir.

### 3.5.2- Isı Geçiş Katsayısının Hesabı

Yukarıdaki açıklamalardan sonra ısı geçişini hesaplayabilmek için sadece ısı geçiş katsayısının bilinmesine gerek kaldığı görülmektedir. Bunun

için de açıcılı kurutucuda ısı geçiş katsayısının nasıl hesaplanabileceği formüle edilmelidir. Burada, kurutma eğrilerinden ve literatür bilgilerinden yararlanılarak bu formülasyon yapılmıştır.

Önce deneylerle elde edilen her bir kurutma eğrisi için nümerik olarak sabit kurutma hızı sürecinde ısı geçiş katsayıları hesaplanmıştır. Bunun için önce su cinsinden kuruma hızları hesaplanmış ve buradan

$$r \frac{dW}{dt} = r \cdot M \frac{dw}{dt} = M_H \cdot C_P (T_g - T_\varphi)$$

eşitliğine göre havanın kayıpsız çıkış sıcaklığı bulunmuş, sonra  $(\Delta T)_m$  ler hesaplanarak,

$$Q = r \cdot \frac{dW}{dt} = k_v \cdot V \cdot (\Delta T)_m$$

eşitliğinden  $k_v$  değerleri bulunmuştur. Havanın kayıpsız çıkış sıcaklığı bulunurken buharlaşma için gerekli bütün enerjinin kuru havanın sıcaklık düşümü ile karşılandığı varsayılmıştır. Gerçekte bir miktar enerji de buharlaştırılan nemin havanın çıkış sıcaklığına yükseltilmesine harcanır. Fakat bu enerji çok küçük olması ve başlangıçtan beri kurutma havası içerisinde bulunan su buharının sıcaklık düşümünün bu enerjiyi karşılayacağı kabulü ile ihmal edilmiştir.

Böylece nümerik olarak bulunan ısı geçiş katsayıları sabit doldurma oranları için gruplandırılarak değerlendirilmiştir. Hesaplamaların sonuçları Tablo (3.5 -6 -7 -8) de gösterilmiştir.

Hacımsal ısı geçiş katsayısının hesabında kurutucu gazın cinsi değişmediğinden ve küçük sıcaklık aralıklarında çalışıldığından, madde fiziki değerlerinin de değişmediği ve etkilerinin sabit bir katsayı şeklinde düşünüle-



TABLO : 3.5

Su Cinsinden Kurutma Hızları  $\frac{dW}{dt}$  gr.su / dak.

Hava Hızları	Doldurma Oranı (P)				
$G_D$	0,926	1,389	1,852	2,315	2,778
18,027	12,00	13,74	14,286	13,065	12,00
22,079	15,965	18,780	19,654	18,598	15,970
25,494	19,355	23,077	24,00	23,077	19,355
28,503	23,077	28,125	30,00	27,523	23,106

TABLO : 3.6

Çıkış Sıcaklıkları

Hava Hızları	Doldurma Oranı (P)				
$G_D$	0,926	1,389	1,852	2,315	2,778
18,027	29,064	28,202	27,932	28,268	29,064
22,079	28,550	27,413	27,060	27,487	28,548
25,494	28,228	26,926	26,603	26,926	28,228
28,503	27,778	26,199	25,612	26,387	27,769

TABLO : 3.7

Ortalama Sıcaklık Farkları ( t )<sub>m</sub> (°C)

Hava Hızları	Doldurma Oranı (P)				
G <sub>D</sub>	0,926	1,389	1,852	2,315	2,778
18,027	14,835	14,334	14,173	14,372	14,835
22,079	14,538	13,862	13,647	13,907	14,536
25,494	14,349	13,565	13,365	13,565	14,349
28,503	14,082	13,110	12,734	13,229	14,077

TABLO : 3.8

Isı Geçiş Katsayıları KCall / m<sup>3</sup> °C dak.

Hava Hızları	Doldurma Oranı (P)				
G <sub>D</sub>	0,926	1,389	1,852	2,315	2,778
18,027	4,4094	5,2250	5,4943	5,1599	4,4094
22,079	5,9872	7,3866	7,8520	7,2913	5,9895
25,494	7,3528	9,2733	9,7886	9,2733	7,3528
28,503	8,9328	11,6934	12,8414	11,3402	8,9475

bileceği kabul edilmiştir. Ayrıca ısı geçiş katsayısının kuru havanın madde hızına bağlı  $k_v = a \cdot G_D^b$  şeklinde bir güç fonksiyonu olduğu kabul edilmiştir (7). Burada  $G_D$  havanın birim kesitten birim zamanda geçen madde miktarını ifade etmektedir. Yani ;

$$G_D = \frac{M_H}{F} \quad \text{tir.}$$

$G_D$  'nin hesaplanmasında kullanılan kesit olarak hava akımı yönüne dik kurutucu büyük tamburunun en büyük kesiti yani; (tambur çapı x tambur genişliği) kullanılmıştır.

Her bir eğri için ayrı ayrı nümerik olarak bulunan  $k_v$  değerleri sabit doldurma oranlarına göre gruplandırılarak regresyon analizi vasıtası ile (a) ve (b) katsayılarının tayinine gidilmiştir. Bu sırada determinasyon katsayısının karesinin (karar katsayısı) 1 'e yakınlığı kontrol edilmiş ve ısı geçiş katsayısının kurutucu gazın madde hızının bir güç fonksiyonu olduğuna dair yaklaşımın kabulü açısından çok tatminkâr sonuçlar elde edilmiştir. Şekil-3.5 te sabit doldurma oranlarına göre gruplandırılan ısı geçiş katsayılarının değişimi grafiksel olarak gösterilmiştir. Yine aynı gruplar için hesaplanan ısı geçiş katsayıları aşağıdaki gibidir.

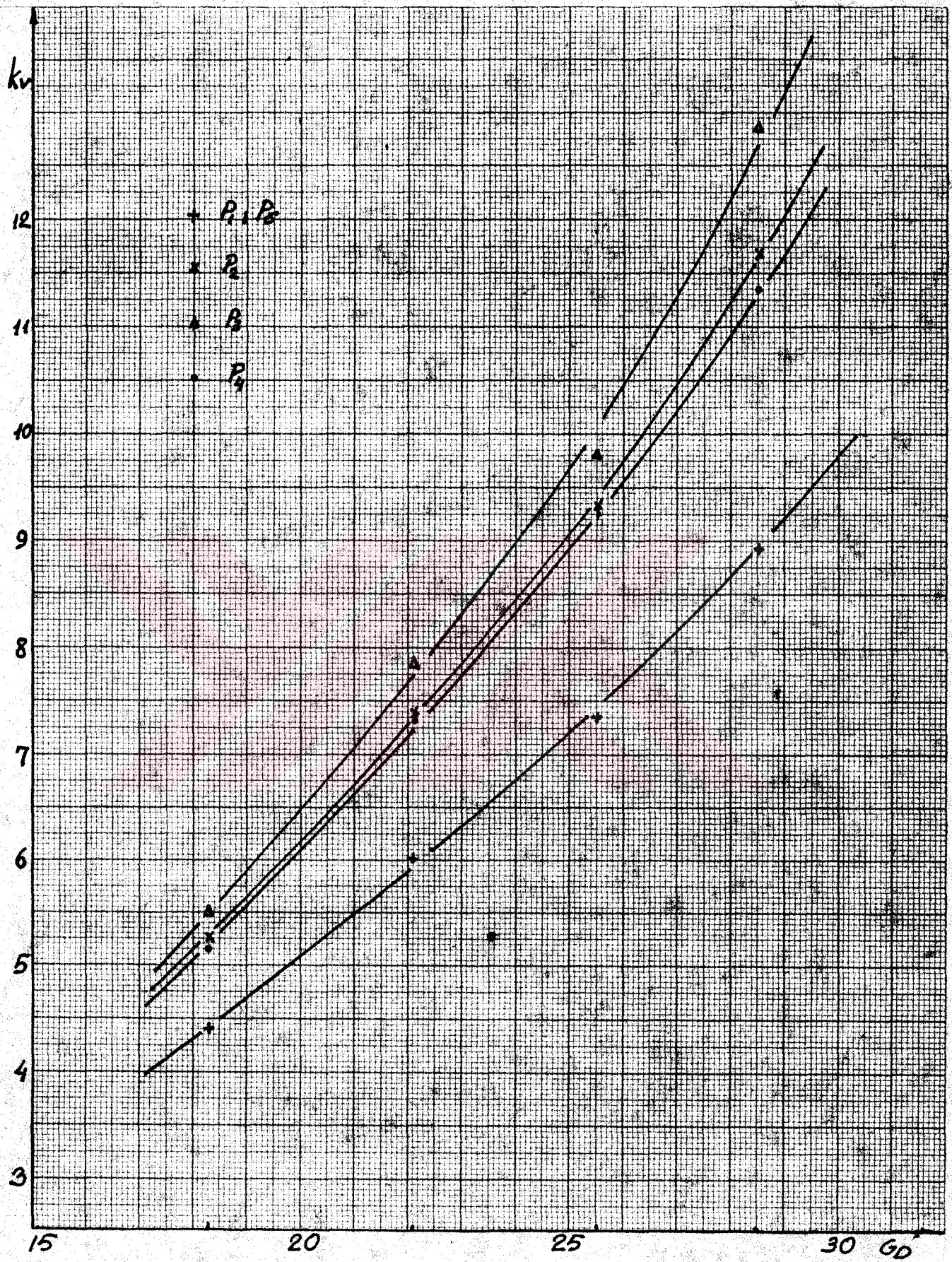
$$P_1 = 0,926 \quad k_v = 0,053345 \cdot G_D^{1,5254036} \quad r^2 = 0,9988$$

$$P_2 = 1,389 \quad k_v = 0,034529 \cdot G_D^{1,7338457} \quad r^2 = 0,9977$$

$$P_3 = 1,852 \quad k_v = 0,029119 \cdot G_D^{1,8086587} \quad r^2 = 0,9931$$

$$P_4 = 2,315 \quad k_v = 0,036436 \cdot G_D^{1,7122833} \quad r^2 = 0,9998$$

$$P_5 = 2,778 \quad k_v = 0,052917 \cdot G_D^{1,5281390} \quad r^2 = 0,9986$$



Şekil : 3.5

a.b

6

5

4

3

2

1.5

1

0.4

0.926

1.389

1.852

2.315

2.778

P

Şekil : 3.6

Yukarıda elde edilen karar katsayılarından görüldüğü gibi ısı geçiş katsayısı bu durumda  $k_v = aC_D^b$  şeklinde bir güç fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Ancak a ve b değerlerinin doldurma oranı (P)'ye bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Bu değişimler Şekil-3.6 da grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu eğrilerden de görüleceği gibi a'nın ve b'nin P'ye göre değişimleri ikinci dereceden birer fonksiyonla çok yaklaşık olarak ifade edilebilmektedir. Bunun için regresyon analizi uygulanmış ve aşağıdaki sonuç alınmıştır.

$$a = 0,027762607 P^2 - 0,10260547 P + 0,124168851$$

$$b = -0,31866311 P^2 + 1,176852687 P + 0,711741771$$

Bu sonuçlara göre mekanik açıcılı elyaf kurutucuda hacımsal ısı geçiş katsayısının genel denklemi

$$k_v = (27,76 P^2 - 102,6 P + 124,2) \cdot 10^{-3} \cdot G_D^{-(0,3186 P^2 - 1,1768 P - 0,7117)}$$

şeklini alır.

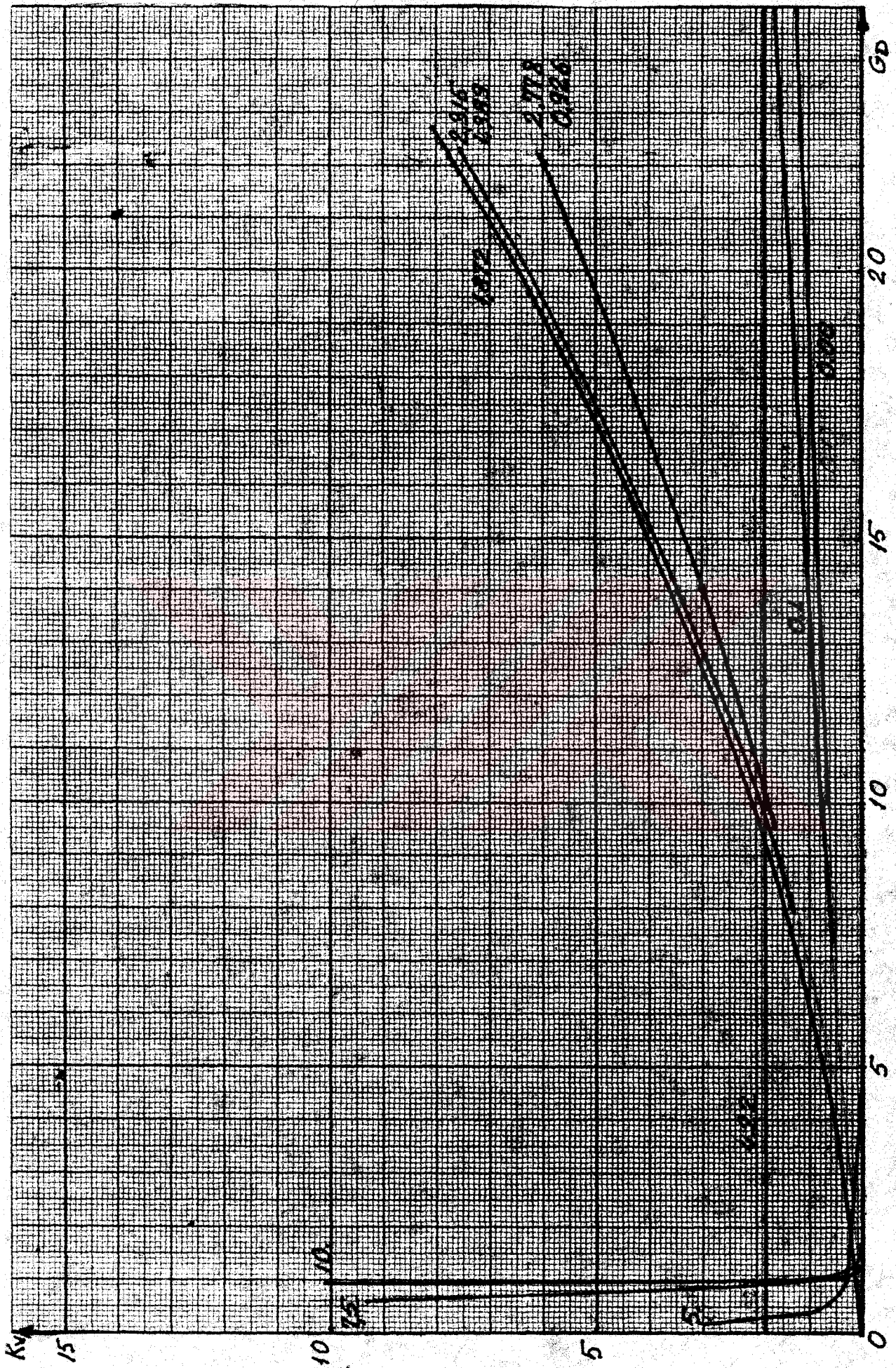
Bu şekilde formüle edilen ısı transfer katsayısı çeşitli doldurucu oranları ( $10 > P > 0$ ) ve hava maddesel hızları ( $50 > G_D > 0$ ) için hesaplanmış ve tablo 3.9 da sunulmuştur.

Bu değerler şekil 3.7 de P = sabit eğrileriyle gösterilmiştir. Eğriler tetkik edildiğinde P nin 4,22 ye kadar olan değerleri için deney sonuçlarına uygunlukları görülür. "b" nin kökü olan P = 4,22 değeri için  $k_v = 0,186$  şeklinde yatay bir doğrudur. Daha büyük P değerleri için ise negatif eğimlidir. Yani gerçeğe uyamamaktadır. Bu yüzden ısı geçiş katsayısı formülünün kullanma sahasını belirtmek için doldurma oranını  $P < 4,22$  şeklinde sınırlamak gerekir.

Sabit  $G_D$  ler için çizilen  $k_v$  eğrileri ise şekil 3.8-9-10 da gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde  $G_D$  nin 15 ten büyük değerleri için eğrilerin gerçek durumu temsil ettiği, ancak;  $G_D = 15$  için bir maksimum yerine bir plato yaptığı ve daha küçük değerler için bu platoda bir çökme olduğu ve iki maksimum bir minimumlu eğrilerin oluştuğu görülür. Meydana gelen bu

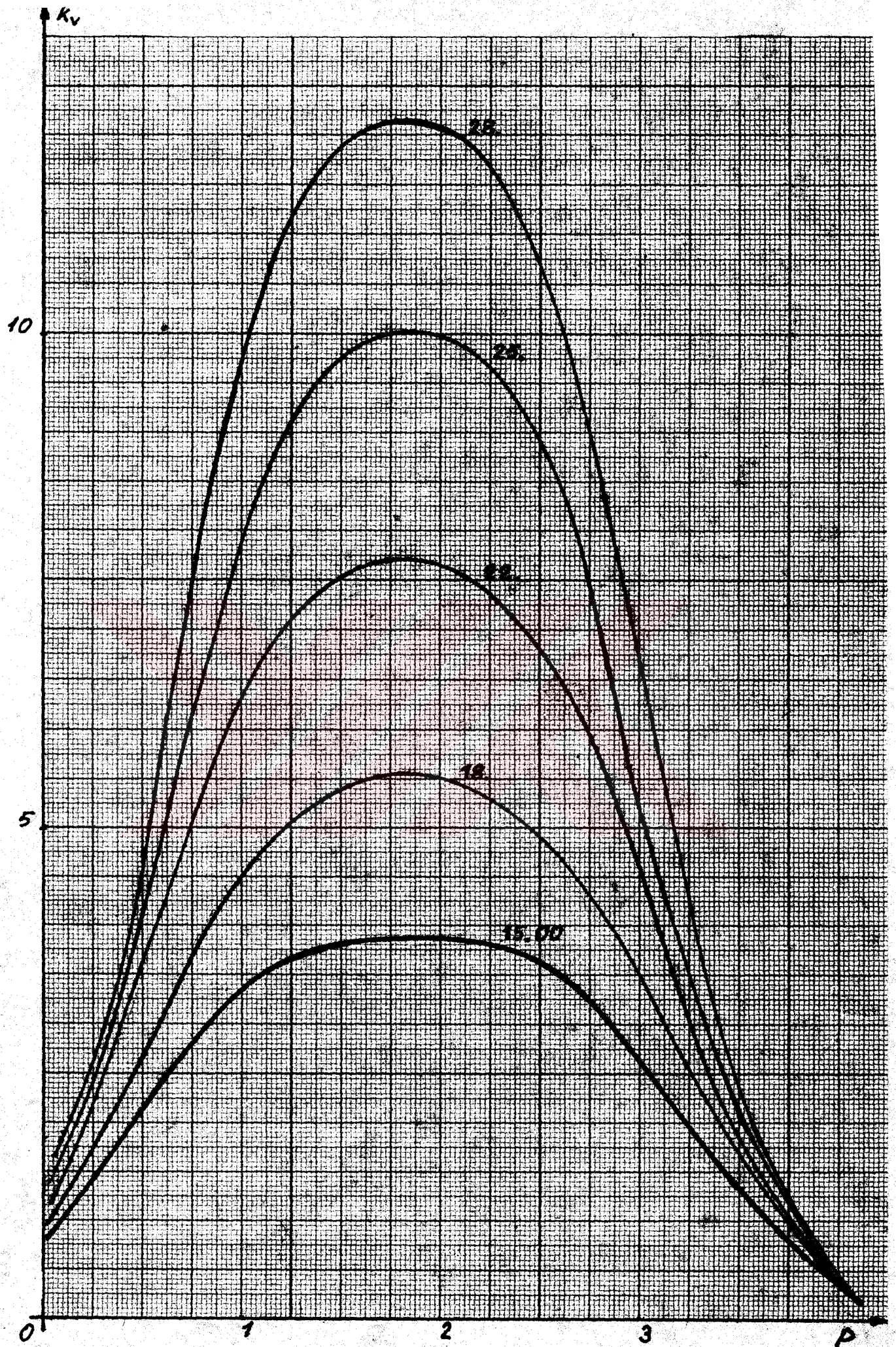
TABLO: 3.9

$G_D$	P 0,00	0,25	0,50	0,75	0,926	1,389	1,852	2,315	2,778	3,50	4,222	5,00	7,50	10,00
0,2	0,039	0,02	0,011	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$0,024$	$0,186$	$2,776$	$6,6 \cdot 10^5$	$6,6 \cdot 10^{13}$
0,4	0,065	0,04	0,026	0,017	0,013	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$	0,013	0,045	0,186	1,070	1980	$9,7 \cdot 10^7$
0,6	0,086	0,06	0,043	0,030	0,024	0,015	0,012	0,015	0,025	0,066	0,186	0,614	66,36	$3,7 \cdot 10^4$
0,8	0,106	0,08	0,061	0,046	0,038	0,014	0,020	0,024	0,038	0,086	0,186	0,414	5,950	$1,4 \cdot 10^2$
1,0	0,124	0,1	0,078	0,063	0,053	0,035	0,030	0,035	0,053	0,105	0,186	0,305	0,916	1,87
2,0	0,203	0,20	0,186	0,168	0,153	0,117	0,103	0,118	0,154	0,200	0,186	0,118	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$
5,0	0,390	0,49	0,570	0,614	0,620	0,570	0,553	0,574	0,620	0,468	0,186	0,034	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-14}$
10,0	0,639	0,97	1,329	1,637	1,792	1,905	1,854	1,98	1,780	0,790	0,186	0,013	$3,8 \cdot 10^{-9}$	$7,8 \cdot 10^{-20}$
12,5	0,750	1,21	1,744	2,245	2,519	2,804	2,769	2,798	2,500	1,096	0,186	$9,6 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-21}$
15,0	0,854	1,45	2,178	2,900	3,333	3,844	3,844	3,835	3,300	1,298	0,186	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$3,0 \cdot 10^{-23}$
18,027	0,973	1,76	2,716	3,770	4,400	5,285	5,350	5,267	4,366	1,539	0,186	$5,8 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-11}$	$8,5 \cdot 10^{-25}$
22,079	1,125	2,12	3,492	5,029	6,011	7,510	7,705	7,480	5,944	1,858	0,186	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-26}$
25,494	1,245	2,46	4,162	6,156	7,490	9,632	9,980	9,593	7,399	2,173	0,186	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-27}$
28,503	1,319	2,73	4,768	7,210	8,880	11,685	12,196	11,634	8,769	2,354	0,186	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-13}$	$1,2 \cdot 10^{-28}$
35,0	1,561	3,34	6,127	9,640	12,155	16,674	17,644	16,590	11,986	2,848	0,186	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$	$2,2 \cdot 10^{-30}$
40,0	1,716	3,81	7,211	11,65	14,900	21,011	22,433	10,890	14,688	3,224	0,186	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-14}$	$1,6 \cdot 10^{-31}$
50,0	2,012	4,75	9,468	15,97	20,960	30,920	33,510	30,73	20,628	3,960	0,186	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-15}$	$2,2 \cdot 10^{-33}$

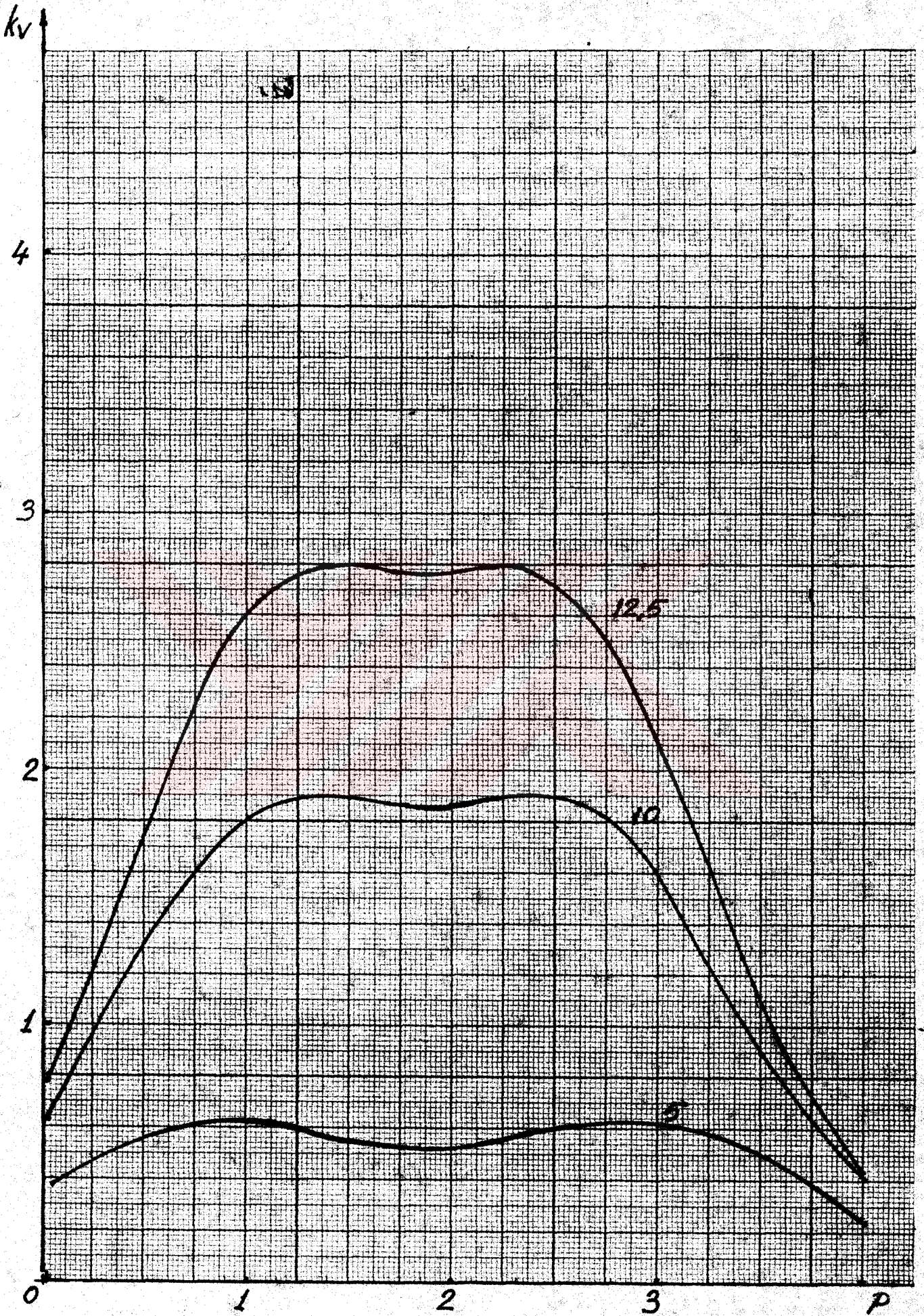


Şekil- 3.7

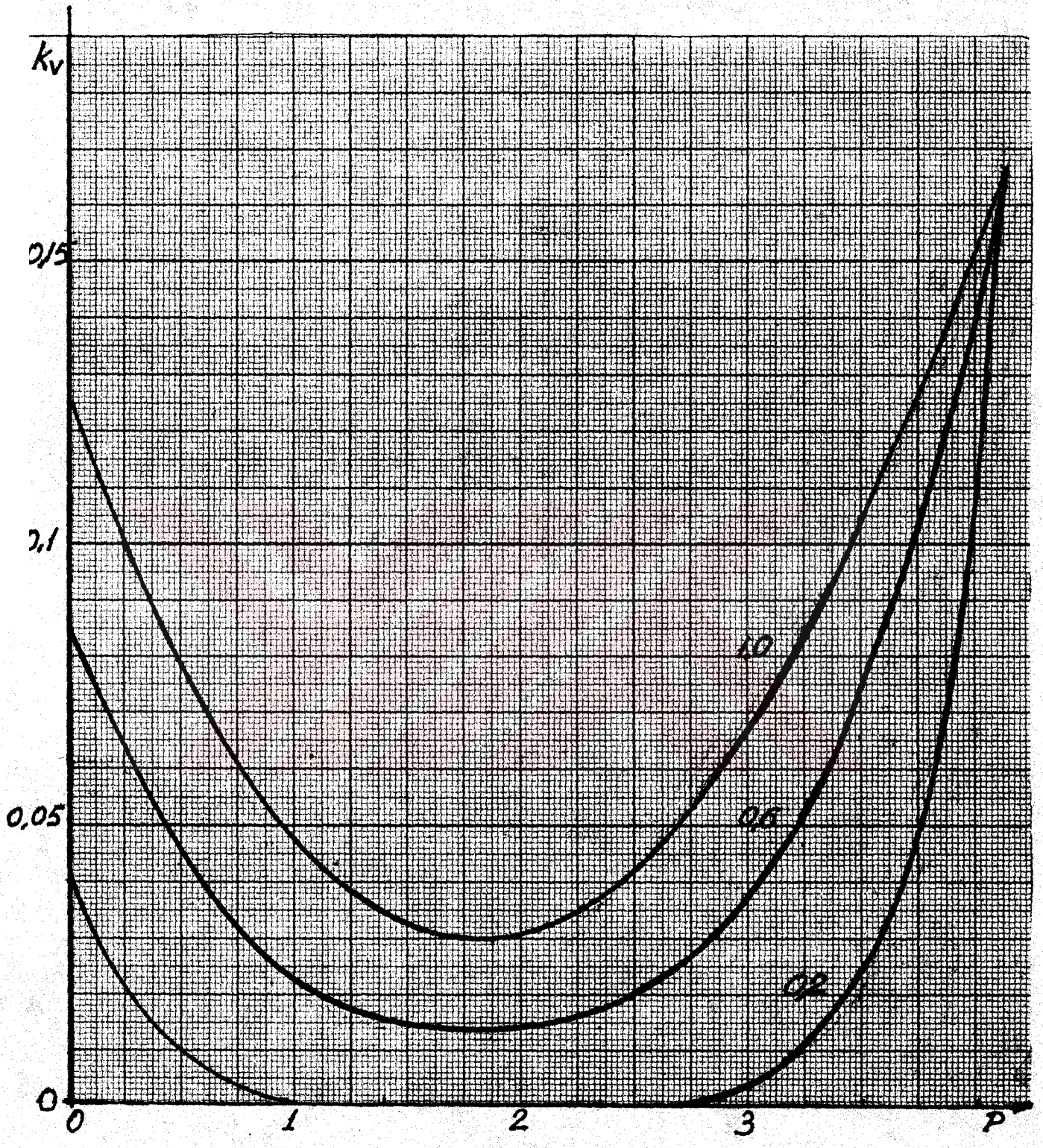




Şekil- 3 a



Şekil- 3.9



Şekil- 3.10

çökme başlangıçtaki bu kabullerden kaynaklanmaktadır. Yani; kurutma sonuna kadar havanın madde fiziki değerlerinin değişmediği, ısı transfer katsayısının sabit kaldığı gibi kabullerin geçerliliği sınırlarına yaklaşılmaktadır.  $G_D$  değeri daha da küçüldükçe  $k_v$  eğrisi yatay bir doğruyu andırır ve sonunda maksimumlar ortadan kalkar, yalnızca minimumlu eğrilere dönüşür. Bu durumda ısı geçiş katsayısı formülü gerçeğe uymamaktadır. Formülün gerçek duruma uygunluğu bakımından hava madde hızını  $G_D > 5$  şeklinde sınırlamak gerekir.

Bu sınır şartında; havanın normal şartlardaki hızı  $V_0 = 0,06$  m/s gibi çok küçük ve kurutmada genellikle kullanılan hava hızlarının çok çok altındadır. Dolayısıyla kurutma olayının normal şartlarında ısı geçiş katsayısı formülü güvenle kullanılabilir.

Böylece önerilen denklemin kullanma sınırları

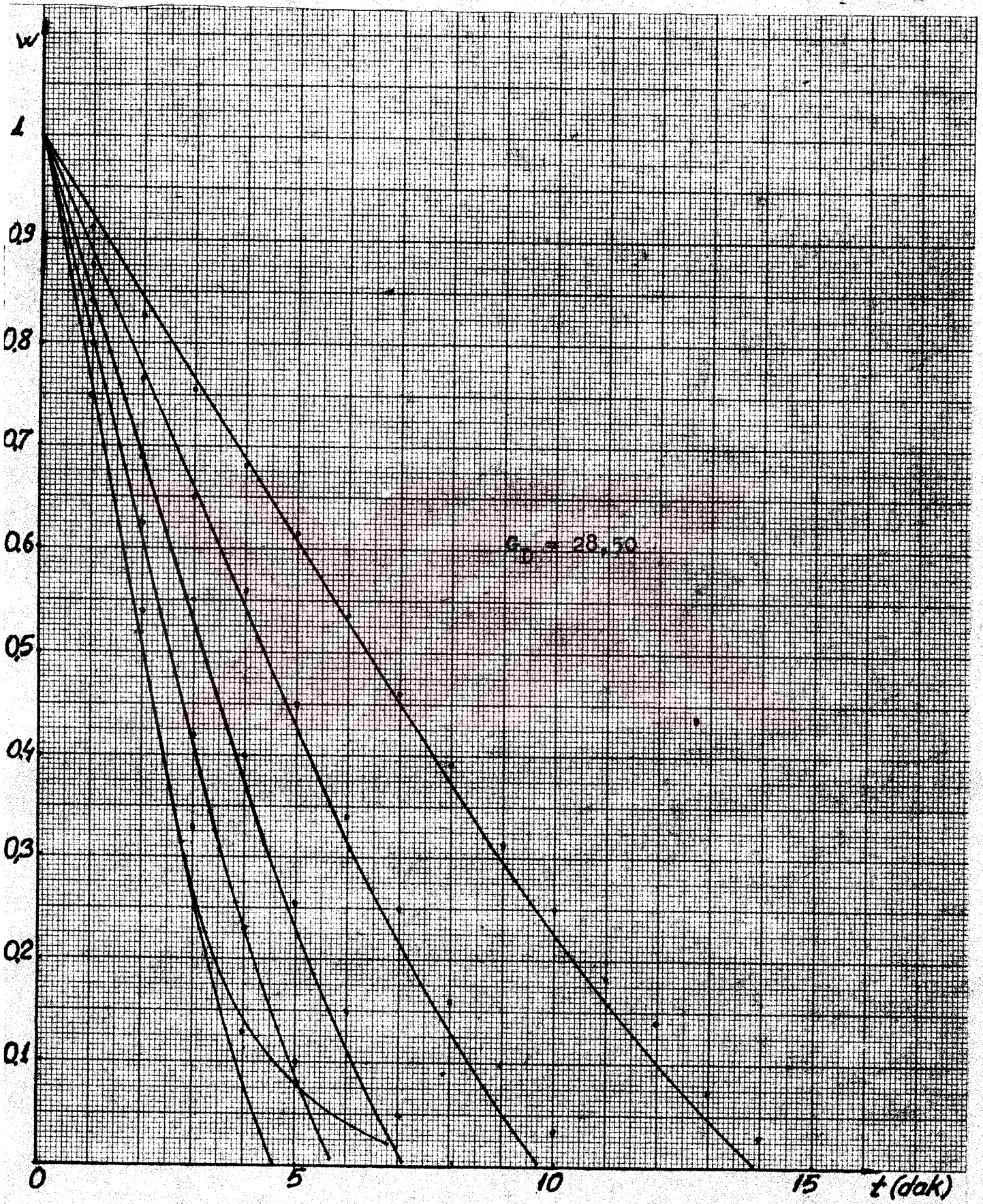
$$G_D > 5 \text{ Kg.k.h/m}^2$$
$$P < 5 \text{ Kg.k.p/m}^3 \cdot \text{k.h.}$$

olarak belirlenmiş olur.

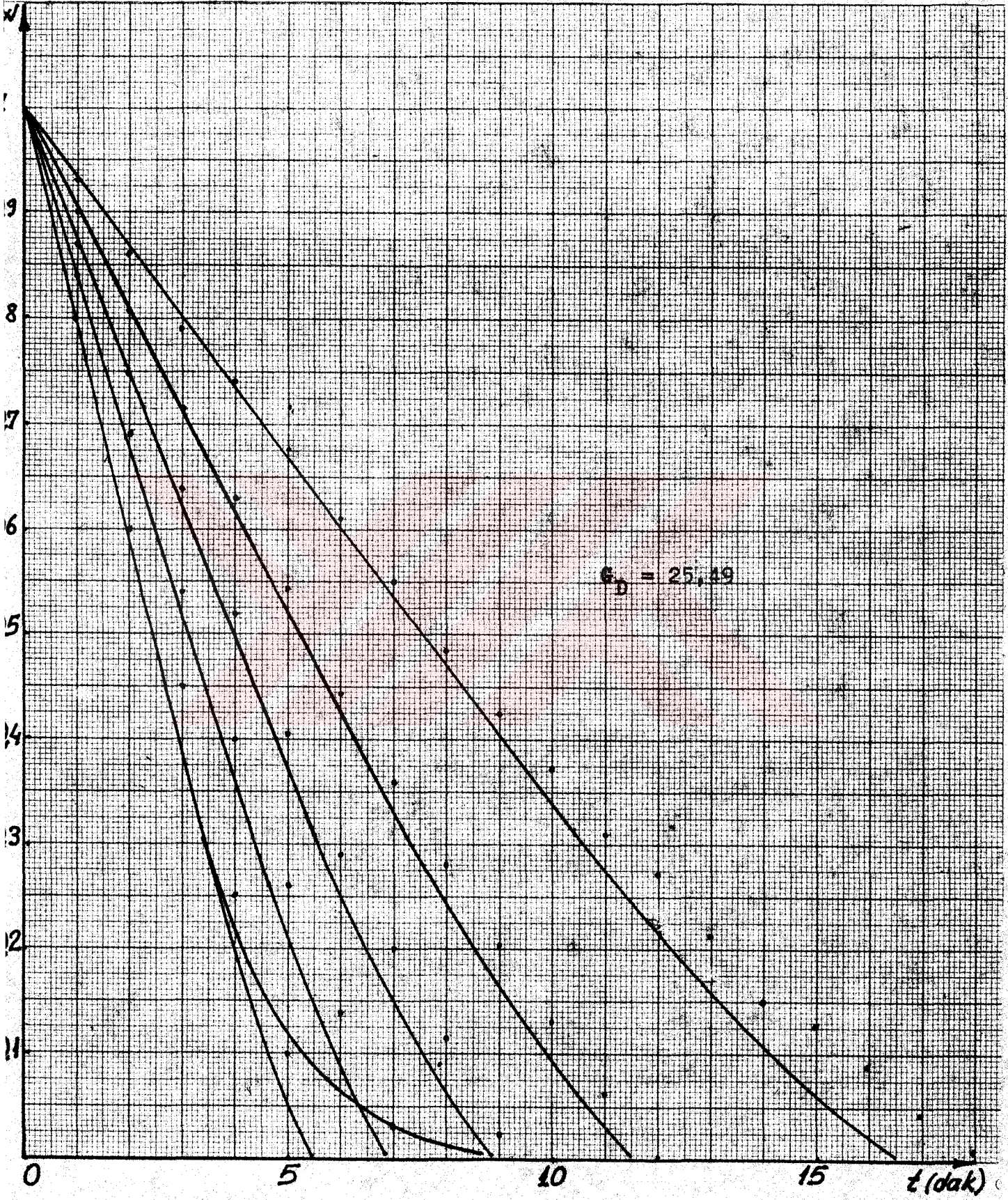
### 3.6- KURUTMA EĞRİLERİNİN TARTIŞILMASI

Bölüm 3.2 ve 3.3 te açıklanan şekilde deney sonucu nokta nokta elde edilen kurutma eğrileri ile kuramsal yaklaşımlara göre hesaplanan kurutma eğrileri aynı diyagramda (Şekil-3.11-12-13-14) gösterilmiştir. Aynı zamanda her bir grubun ilk eğrisi üzerinde; azalan kurutma hızı sürecinde kurutma hızının, yaş katının nem miktarı ile orantılı olarak değiştiğine dair geleneksel yaklaşımı (Lineer yaklaşım) temsil eden eğri çizilmiştir.

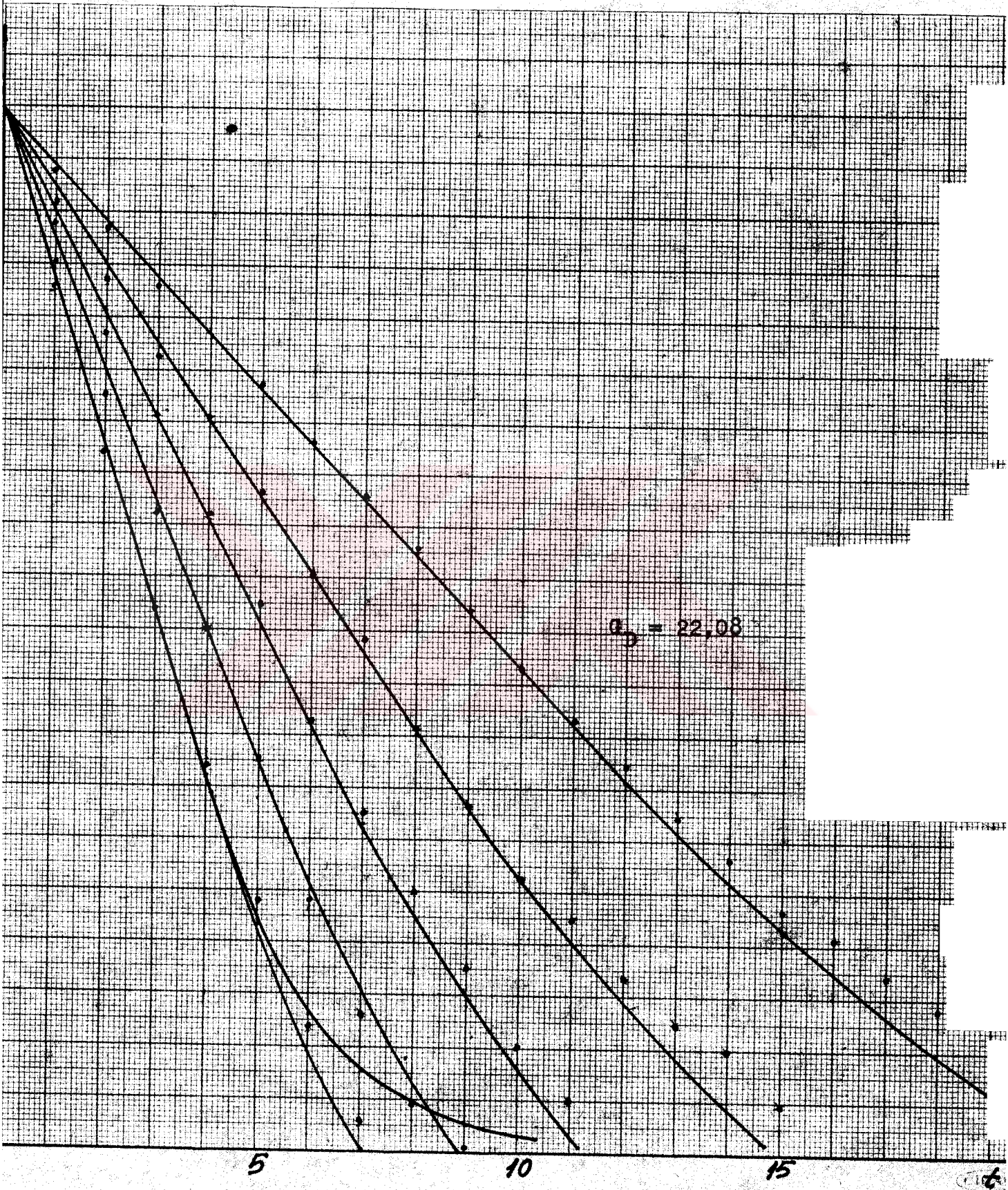
Şekillerde de görüldüğü gibi; Lineer yaklaşım, azalan hız sürecinin başlarında uygun bir yaklaşım olmasına rağmen sonlara doğru özellikle %12,5 nemden itibaren gerçek eğriden hızla uzaklaşmaktadır. Eğer kritik nokta %31 yerine daha yüksek bir değerde olsaydı bu uzaklaşma da daha erken başlardı.



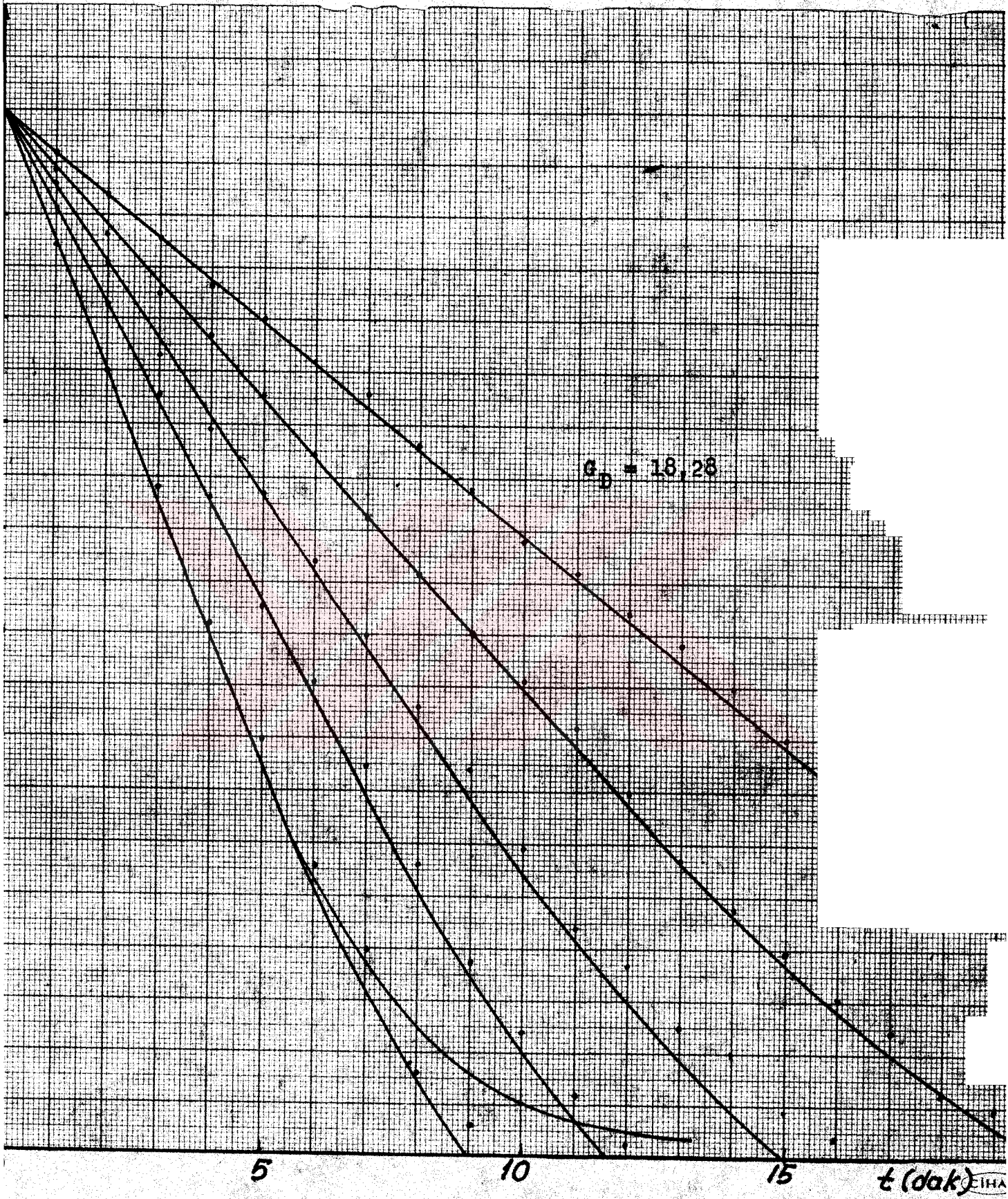
Şekil : 3.11



Şekil : 3.12



Şekil : 3.13



Şekil : 3.14



Böylece Lineer yaklaşıma göre hesaplanan kurutma zamanı da gerçeğe göre büyük olacaktır. Öteki taraftan bu çalışmada önerilen birimsiz zamana göre yaklaşım eğrileri gerçek eğriyi daha iyi temsil edebildiği gibi kurutma zamanı da - gerçekten biraz daha küçük görünmesine rağmen - daha yaklaşık verebilmektedir.

Bundan başka gerçek noktalar ile önerilen eğriler kıyaslandığında bazı hususlar dikkati çekmektedir. Bunlardan biri, başlangıçtaki ilk birkaç noktanın önerilen eğrinin altına düşmesidir. Bunun kurutma başlangıcında yaş elyafın bir kısım neminin kurutucu cidarlarına sivanarak orada kalması sonucu meydana geldiği sanılmaktadır. Zaten bu ıslatma deneyler esnasında da gerek tartma için kurutmaya ara verildiğinde gerekse kurutma sırasında gözetleme camından gözlenmiştir.

Göze çarpan bir diğer husus da gerçek noktaların önerilen eğriden, özellikle deney sonlarına doğru, biraz saparak önerilen eğrinin üzerinde yer almalarıdır. Bu durumun her bir dakikalık kurutma süresinden sonra, kurutmanın kesilerek tartma yapılmasından kaynaklandığı sanılmaktadır. Çünkü uzun süreler ara vermeksizin kurutmadan sonra yapılan ölçümlerde önerilen eğrilere biraz daha yakın noktalar elde edilmiştir.

Bunların dışında hatırdaki bulunması gereken diğer hususlarda şunlardır:

Her bir dakika ara ile yapılan tartma sırasında, başlangıçta, kurutma devam edebilir. Ayrıca, malzeme kurutucudan çıkarılır ve tartılırken, malzemenin açılmışlığı bir miktar bozulmaktadır.

Tartma sırasında, önceden rejim sıcaklığına erişmiş malzeme bir miktar soğuyarak, birer dakikalık kurutma periyodlarının başlangıcında bir miktar enerji malzemeyi yeniden rejime getirmek için harcanabilir. Böyle bir etkiyi azaltabilmek için hem tartmalar mümkün olan en kısa zamanda yapılmaya çalışılmış, hem de; düşük sıcaklıkta kurutma havası kullanılarak tartma sırasında malzemenin ısı kaybı en aza indirilmeye çalışılmıştır.

Kurutma olayının sonlarında malzemenin nemi çevre atmosferinin neminin altına düştüğü için, tartma sırasında malzeme yeniden nem kazanabilir.

Çevre atmosferinin nemi kontrol edilerek bunun önüne geçilebilirdi. Bu olanak bulunamadığı gibi, deneyler kış aylarına rastladığı için bu etkinin kurutma süresinin az miktarda artmasına sebep olduğu sanılmaktadır.

Bütün bunlara rağmen, deneyle bulunan noktalarla önerilen eğriler kıyaslandığında oldukça tatminkâr sonuçlar elde edildiği gözlenerek çalışmanın amacına ulaştığı kabul edilebilir.

#### 4- OPTİMİZASYON

Bu çalışmada geliştirilen Mekanik Açıcılı Elyaf Kurutucuyu endüstriyel maksatlar için dizayn ederken iki soru akla gelebilir :

Bunlardan birincisi; her defasında belirli bir miktar malzeme kurutulabileceğine göre; seçilen miktar için kurutucu hacminin ne olması gerektiği yada belirli hacımdaki bir kurutucuda her defa ne kadar malzeme kurutmanın en uygun sonucu vereceği sorusudur.

İkincisi ise; böyle bir kurutucuda, düşük sıcaklıklı fakat miktarı çok hava ile mi, yoksa yüksek sıcaklıklı fakat miktarı az hava ile mi yapılan kurutmanın daha ekonomik olacağı sorusudur.

Her iki soru da aşağıda sırayla incelenerek bir sonuca varılmıştır.

##### 4.1- DOLDURMA ORANI OPTİMİZASYONU

Bundan önceki bölümde yapılan çalışmalarda; bu çalışmanın daha sonraki boyutlandırmalara esas olabilmesini sağlamak için çalışmalar genellikle ifade eden doldurma oranı üzerine esaslandırılmış ve hacımsal ısı geçiş katsayısının sabitleri doldurma oranına bağlı olarak verilmişti. Hacımsal ısı geçiş katsayısının doldurma oranına göre değişimi incelenerek maksimum olduğu değer Optimum Doldurma Oranı olarak seçilebilirdi. Fakat bu yaklaşım, kurutulan malzeme miktarındaki değişim dikkate alınmadığı için, maksimum faydanın sağlandığı doldurma oranını belirlemeye yeterli olmayacaktı.

Bu nedenle işletmecilerin daha yakın olduğu " Malzeme Miktarına Göre Kurutma Hızları " yani " Ortalama Madde Kurutma Hızları " etüd edilmiştir. Böylece ısı geçiş katsayısını maksimum yapan doldurma oranından daha büyük bir doldurma oranı için; ısı geçiş katsayısının küçülmesine rağmen, kurutu-

lan malzeme miktarının artması nedeniyle daha ekonomik bir sonuç elde edilebileceği şüphesi de ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır.

Sabit kurutma hızı sürecindeki kurutma hızları bunlara göre hesaplanmış yaklaşık toplam kurutma süreleri ve birim zamanda kurutulan ortalama madde miktarları Tablo (4.1-2-3) te verilmiştir. Böylece bulunan ortalama madde kurutma hızları ( $\bar{V}_m$ ) doldurma oranına göre (P) sabit hava madde hızları için Şekil-4.1 de çizilmiştir.

Bu eğrilerden gidilerek sabit hava madde hızları için (18,027 ; 22,079 ; 25,494 ; 28,503 kg.kuru hava / m<sup>2</sup>.dak.); ortalama madde kurutma hızlarının doldurma oranına göre değişimi regresyon analizi ile araştırılarak bu eğrileri maksimum yapan doldurma oranı değerleri aşağıda hesaplanmıştır.

$$\bar{V}_m = -6,996 P^2 + 25,84098042 P + 3,8411273965 \quad P_{\max} = 1,8448$$

$$\bar{V}_m = -5,13900316 P^2 + 19,09080743 P + 4,617598098 \quad P_{\max} = 1,857$$

$$\bar{V}_m = -5,20458931 P^2 + 19,50871101 P - 0,13714313 \quad P_{\max} = 1,874$$

$$\bar{V}_m = -2,4540461 P^2 + 9,0645182 P + 4,821199232 \quad P_{\max} = 1,8468$$

Bu sonuçların ışığında maksimum ortalama madde kurutma hızını ( $\bar{V}_m$ ) veren doldurma oranı (P) hava madde hızından çok az etkilendiği ve yaklaşık olarak P = 1,85 alınabileceği söylenebilir.

Optimum doldurma oranı P = 1,85 için hacımsal ısı geçiş katsayısı ( $k_v$ ) aşağıdaki değeri alır.

$$k_v = 29,36 \cdot 10^{-3} \cdot G_D^{1,798}$$

TABLO : 4.1  
Sabit Kurutma Hızları

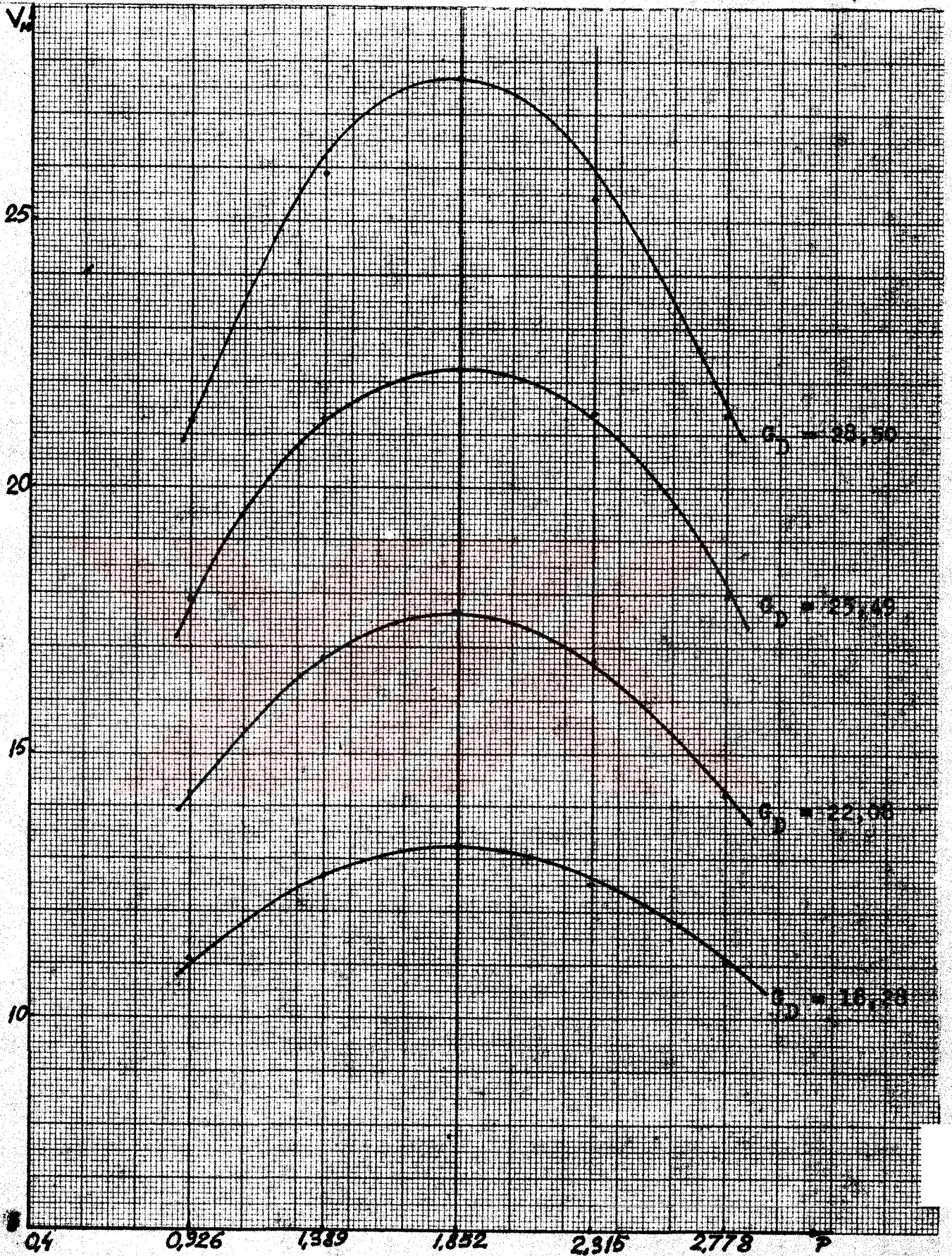
Hava Hızları	Doldurma Oranı (P)				
$G_D$	0,926	1,389	1,852	2,315	2,778
18,27	0,1200	0,0916	0,7140	0,0546	0,0400
22,079	0,15965	0,1252	0,0983	0,0744	0,0532
25,494	0,19355	0,1538	0,1200	0,0923	0,0645
28,503	0,23077	0,1875	0,1500	0,1101	0,0770

TABLO : 4.2  
Toplam Kurutma Süresi

Hava Hızları	Doldurma Oranı (P)				
$G_D$	0,926	1,389	1,852	2,315	2,778
18,27	9,01	11,83	15,09	19,9	27,03
22,079	7,00	8,93	11,30	14,9	21,00
25,494	5,6	7,05	9,01	11,7	16,7
28,503	4,7	5,8	7,2	9,8	14,05

TABLO : 4.3  
Ortalama Madde Kurutma Hızları

Hava Hızları	Doldurma Oranı (P)				
$G_D$	0,926	1,389	1,852	2,315	2,778
18,27	11,097	12,683	13,256	12,562	11,099
22,079	14,286	16,806	17,67	16,778	14,286
25,494	17,878	21,293	22,195	21,402	17,953
28,503	21,276	25,894	27,739	25,432	21,367



Şekil : 4.1

#### 4.2- KURUTMA HAVASI MİKTAR ve SICAKLIĞININ KURUTMA HIZINA ETKİSİ

Kurutma proseslerinde, çevreden alınan belirli miktardaki taze hava hava ısıtıcısında ısıtılarak belirli bir sıcaklığa yükseltilir ve kurutucu içine gönderilir. Yani hava ısıtıcısı içinde belirli miktar enerji havaya geçirilir. Hava ısıtıcısında havaya verilen toplam enerji sabit kalmat üzere hava miktarının ve buna bağlı olarak havanın ısıtıcıyı terkedip kurutucuya girdiği sıcaklığın, transfer edilen nem miktarına yani su cinsinden kurutma hızına nasıl etki ettiği araştırılması gereken bir konudur.

Bunun için sabit kurutma hızı sürecinde su cinsinden kurutma hızını yani madde transferi hızını ısı transferine göre yazıp analiz etmek gerekir.

$$\frac{dW}{dt} = \frac{k_v \cdot V \cdot (\Delta T)_m}{r} \dots\dots\dots (1)$$

bağıntısı önceden görülmüştü. Diğer taraftan hacımsal ısı geçiş katsayısı ;

$$k_v = a \cdot G_D^b \quad \text{ve} \quad G_D = \frac{M_H}{F} \quad \text{şeklinde, yani ;}$$

$$k_v = a \cdot \left(\frac{M_H}{F}\right)^b \dots\dots\dots (2)$$

şeklinde idi.

Logaritmik ortalama sıcaklık farkı ise aşağıdaki gibi ;

$$(\Delta T)_m = \frac{(T_g - T_y) - (T_\phi - T_y)}{\ln \frac{T_g - T_y}{T_\phi - T_y}} = \frac{T}{\ln \frac{T_g - T_\phi}{T_g - T_\phi - \Delta T}} \dots\dots (3)$$

havanın kurutucu içinde sıcaklık düşümüne ve kurutulan katının yüzey sıcaklığını temsil eden yaş termometre sıcaklığına bağlı olarak yazılabilir.

Daha önceki kabullere uygun olarak; nemin buharlaşması için gerekli ısının kuru havanın sıcaklık düşümünden karşılandığı yazılır ve sıcaklık düşümü su transfer hızına göre çözülürse ;

$$\frac{dW}{dt} \cdot r = M_H \cdot C_P \cdot \Delta T \quad ; \quad \Delta T = \frac{(dW/dt) \cdot r}{M_H \cdot C_P} \quad \dots\dots\dots (4)$$

bağıntısı elde edilir.

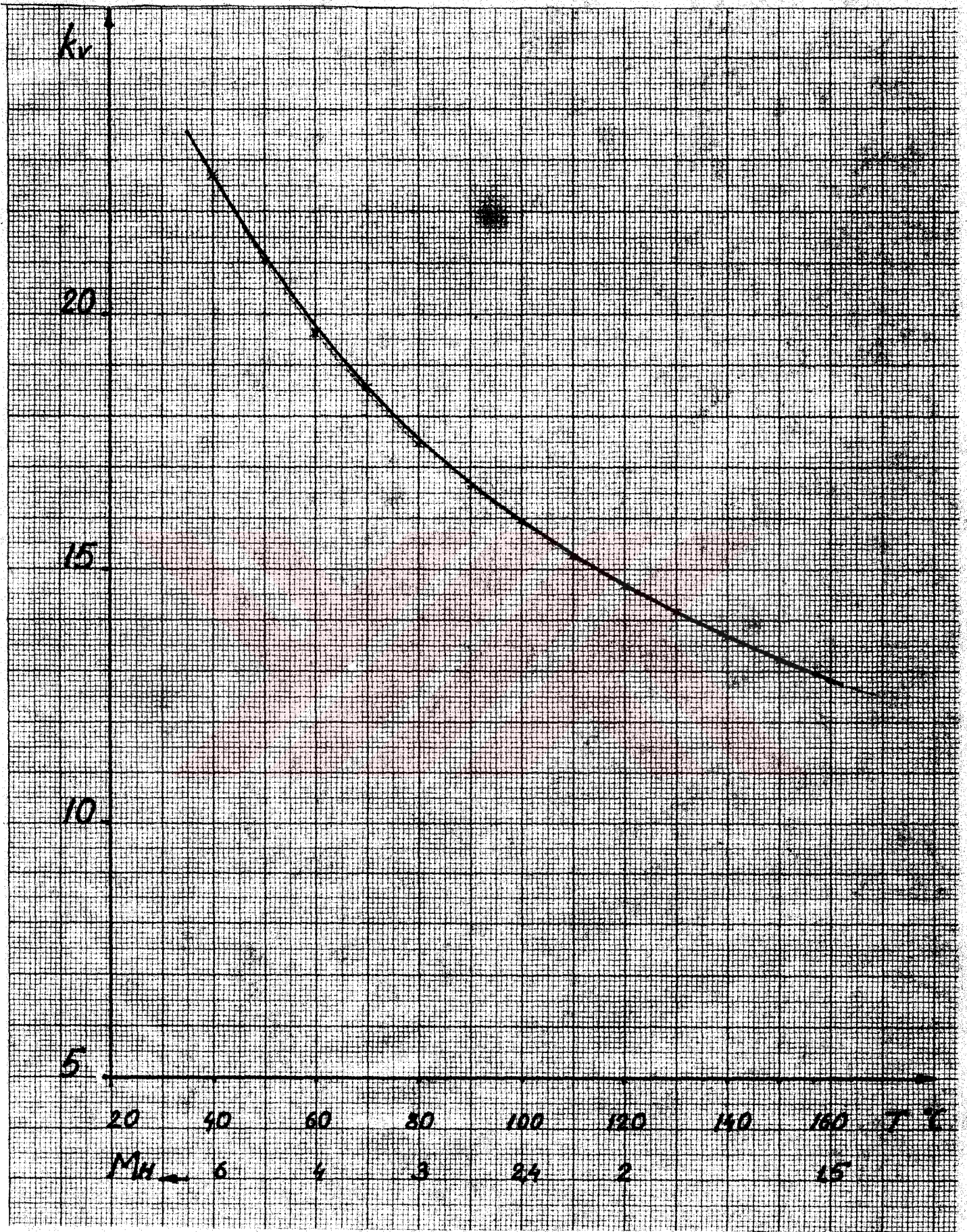
Bu eşitlikler 1 numaralı denklemde yerine koyulur ve denklem düzenlenirse ;

$$\frac{dW}{dt} \cdot r = M_H \cdot C_P \cdot (T_g - T_y) \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{a \cdot V}{C_P \cdot F^b} \cdot M_H^{b-1} \right)^e} \right] \quad \dots\dots (5)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntıdan (dW/dt), bu çalışmada kullanılan model kurutucu için  $M_H \cdot C_P \cdot T_g = 57,6$  KCall/kg. sabit değeri, giriş havasının özgül nemi  $x_1 = 5$  gr.su/kg.kuru hava ve madde transferi kuruma hızını maksimum yapan doldurma oranı  $P = 1,85$  şartları için çözülürse Şekil-4.2' deki eğri elde edilir.

Bu eğriden de anlaşılacağı gibi hava ısıtıcısında verilen toplam ısı sabit kalmasına, yani kurutucuya giren entalpi sabit olmasına rağmen transfer edilen su miktarı (dW/dt) değişmektedir. Bu değişim; hava sıcaklığının düşük, fakat miktarının fazla olduğu yönde artacak şekildedir. Diğer bir deyişle sıcaklığa göre negatif eğimlidir. Sonuç olarak; böyle bir kurutucuda düşük sıcaklıklı fakat miktarı çok hava ile kurutma yapmak daha ekonomik olmaktadır.





Şekil : 4.2

## 5- SONUÇ

Bu çalışmada geliştirilen Mekanik Açıcılı Elyaf Kurutucu üzerinde kurutma prosesi açısından yapılan deney ve hesaplamalar çok hızlı bir kurutma elde edildiğini göstermektedir. Aynı şekilde % 100 neme kadar santrifüjde sıkılan 200 gr. pamuk örneği aynı makina içinde  $G_D = 28,503 \text{ kg.k.hava/m}^3\text{dak.}$  hava hızında aynı sıcaklıkta 9 dakika süre ile kurutulmuş ve örneğin santrifüjden alınırken parçalanma durumuna bağlı olarak 20-25 gr.lık bir kurutma yapılabildiği gözlenmiştir. Bu yaklaşık % 10 'luk bir kurutmaya denk gelmektedir. Halbuki aynı koşullarda açmalı bir kurutma yapıldığında % 100 'lük bir kurutma sağlanmıştır. Bu oranlar kıyaslandığında yaklaşık 10 katı daha hızlı bir kurutmanın mekanik açıcı sayesinde sağlandığı görülür. Ancak santrifüjden çıkmış elyaf malzemenin kritik noktasının yaklaşık 0,65 değerinde olduğu hatırlanır ve buna göre kurutma zamanı hesaplanırsa yaklaşık 160 dakika bulunur ki bu mekanik açıcılı kurutma esnasında gerekli kurutma süresinin 17,7 katıdır. Böylece açıcılı kurutmada açıcısız kurutmaya göre 10-15 katı hızlı bir kurutma sağlandığı söylenebilir.

Sıcak hava enerji demek olduğuna ve açma işleminin elyafli malzemenin işlenmesi sırasında mutlaka yapılması gerektiğine göre, açıcılı bir kurutucu ile büyük bir enerji tasarrufu sağlanacağı açıktır. Çünkü kurutma sırasında sıcak hava kurutucuya hep aynı şartlarda üflenecektir.  $15^\circ$  den  $35^\circ$  ye ısıtılmış dakikada 7,838 kg.kuru havayı 9 dakika üflemele

$$Q = 7,838 \cdot 0,24 (35 - 15) \cdot 9 = 338,6 \text{ KCal}$$

harcanmasına karşılık; 160 dakikada

$$Q = 7,838 \cdot 0,24 (35 - 15) \cdot 160 = 6019,5 \text{ KCal}$$

harcanacaktır. Dolayısı ile açıcılı kurutucuda 200 gr. % 100 nemli pamuğu kuruturken, açıcısız duruma göre

$$\frac{6019,5 - 338,6}{6019,5} = \% 94$$

bir enerji tasarrufu söz konusudur. Bu değer kurutmanın 10 kat hızlı olduğu düşünülerek hesaplandığında % 90 'a düşmektedir.

Bu bakımdan bu çalışma ile çok hızlı ve çok ekonomik bir kurutucu modeli geliştirilerek amaca ulaşıldığı gibi; " Proseste Enerji Ekonomisi " sağlanarak genel enerji tasarrufuna küçük bir katkıda bulunulduğu kabul edilebilir.

Bununla beraber geliştirilen model yalnız proses olarak incelenmiş ve bu incelemeler sonuca bağlanmıştır. Ancak, modelin konstrüktif özellikleri üzerinde de durmak gerekir.

Gerek büyük tamburun gerekse çivili tamburun çevre hızları, açma olayı üzerinde, dolayısı ile kurutma üzerinde etkili olacak büyüklüklerdir. Büyük tamburun çevresel hızının, çivili tamburun çivi ucu çevresel hızına oranının açma ve kurutma üzerinde etkisi araştırılmalıdır.

Ayrıca çivili tambur eksenine paralel sıralanmış çivilerin aralarındaki uzaklığın elyaf uzunluğu ile birlikte önem kazandığı gözlenmiştir. Kısa çivi aralığı, uzun elyafli malzemelerin çivili tambur üzerine sarılmasına sebep olmaktadır. Elyaf boyu arttıkça çivi aralıklarının da artması gerekmektedir. Bu değişimde matematiksel bir fonksiyona bağlanmalıdır.

Yine açma özelliklerini etkileyen konstrüktif bir büyüklük olarak tamburların ortak ekseninden çivi ucuna kadar olan uzaklık ( $R_i$ ) ile, büyük tambur kaldırıcı kanatlarına kadar olan uzaklık ( $R_a$ ) arasındaki ( $R_a - R_i$ ) farkı gözlenmiştir. ( $R_a - R_i$ ) uzaklığının elyaf boyu ve cinsine göre bir alt limiti olacağı düşünülmektedir. Küçük ( $R_a - R_i$ ) değerlerinde çiviler malzemeyi raflardan çekmektedir. Halbuki malzemenin serbestçe çivili tambur üze-

rine düşmesi istenmektedir. Aksi takdirde malzeme ipliklenmektedir.

Bu çalışmanın bir devamı olarak, böyle bir mekanik açıcılı elyaf kurutucuyu kontinü hale getirmek düşünülebilir. Bunun için açma ve kurutma işlemlerini çok iyi senkronize etmek; açma bölümünden ayrılan havaya kurumak üzere olan elyaf kümelerini taşıtmak ve havanın taşıdığı elyaf miktarı kadar yaş elyafı açma bölgesini beslemek düşünülebilir. Fakat yukarıda da belirtildiği gibi, önce konstrüktif özelliklerin açmaya etkisini tam olarak belirlemek gerekir.

## METİNDE KULLANILAN SEMBOLLER

- $t, t_{cr}$  : Zaman, kritik noktaya ulaşma zamanı ..... (dak)
- $w, w_o, w_{cr}, w_e$  : Pamuğun nem miktarı, başlangıçta kritik noktada ..... (kg nem/kg.K.Pamuk)
- $A_H, A_M$  : Isı transferi, madde transferi alanı ..... ( $m^2$ )
- $P_s, P_b, P_{bd}$  : Yüzey sıcaklığında, hava içinde kısmi, hava içinde doyma basıncı ... ( $kp/m^2$ )
- $k, k_v$  : Yüzeysel, hacımsal ısı geçiş katsayısı ..... ( $KCall/m^2 h ^\circ C$ )
- $k_M$  : Madde geçiş katsayısı ..... ( $kg/kp.m^4.h$ )
- $r$  : Nemin yüzey sıcaklığında buharlaşma ısısı ..... ( $KCall/kg$ )
- $(\frac{\partial w}{\partial t})$  : Kurutma hızı ..... (1/dak)
- $(\frac{\partial W}{\partial t})$  : Madde kurutma hızı ..... (kg su/dak)
- $M_k, M_y$  : Kuru kütle, yaş kütle ..... (kg)
- $M_H$  : Havanın kütleli debisi ..... (kg/dak)
- $\phi$  : Havanın bağıl nemi
- $X$  : Havanın mutlak nemi ..... (kg/kg)
- $C_P, C_{P_B}, C_{P_{x_1}}$  : Isınma ısısı, buharın, nemli havanın ..... ( $KCall/kg ^\circ C$ )

- $T, T_g, T_ç, T_y$  : Sıcaklık , havanın giriş, çıkış,  
yaş termometre sıcaklıkları ..... ( $^{\circ}C$ )
- $T_s$  : Yaş katının yüzey sıcaklığı ..... ( $^{\circ}C$ )
- $F$  : Yüzey ..... ( $m^2$ )
- $Q$  : Isı transfer miktarı ..... (KCal/dak)
- $G_D$  : Kuru hava maddesel hızı ..... ( $kg/m^2$  dak)
- $V$  : Kurutucu hacmi ..... ( $m^3$ )
- $P$  : Doldurma oranı ..... ( $kg$  pamuk/ $m^3$  kurutucu)
- $\bar{V}_m$  : Ortalama madde kurutma hızı ..... ( $kg$  pamuk/dak)
- $R$  : Yarıçap ..... (m)

## REFERANS LİSTESİ

- 1- Chemical Engineers Handbock. Perry and CHILTON fifth edition.
- 2- Mass Transfer Operation Robert E. Trayball second edition.
- 3- Drying ; C.E.soon, T.D.Whellock, G.T.Tsao, Chemical Engineering.  
June 19, 1967 ; P.167 -215
- 4- Thermodynamics, G.J.VAN WYLEN P.223 -224
- 5- A model for mass transfer in beds of wool fibres, P.Nordon  
Int.J.Heat Mass Transfer Vol.7. P.639 -651 1964
- 6- Drying equipment with mechanical agitation and pulverization of the  
dried material, I.P.Khoustov, V.I.Chichetkin, B.S.Sazhin, M.N.Panfilov  
UDC 66.047 : 019.941
- 7- Process Heat Transfer D.Q Kenn Mc Graw Hill Co.
- 8- Generalized Drying Curves For Porous Solids ; Bilgin Kısakürek,  
Ralph E.Peck, Temel Çakaloz, The Canadion Journal of chemical  
Engineering, Vol.53, February 1975 P.53-59
- 9- Kılcal Akım Kurutma Modeli ; Bilgin Kısakürek, Osman Gebrizlioğlu  
T.B.T.A.K. 5.Bilim Kongresi 1975 Kimya Seksiyonu Mih.Araştırma  
Grubu Tebliğleri Sf : 191 -202
- 10- Kurutma Modelleri Bilgin Kısakürek, Isı Bilimi ve Tekniği  
Cilt - 2 Sf : 37 -40
- 11- Batch Drying with Air Recirculation, R.B.Keey Chemical Engineering  
Science 1968 Vol.23 P.1299 -1308
- 12- Mechanism of Drying Thick Porous Bodies During the falling Rate period  
J.R.Bell and A.N.Nissan A.I.Ch.E.Journal, September 1959 P.344 -347

- 13- The Drying of Mass of Hygroscopic Fibres by Convection of Air :  
A Note on Some Physical aspects ; J.G.Downes, G.B.Mc. Mahon ;  
Textile Research Journal P.1006 -1010
- 14- A New Moisture-Measurement Technique for Drying Beds of Loose  
Textile Fibers ; R.L.Holmes-Brown, M.S.Nossar, Textile Research  
Journal, 1979 P.312 - 317
- 15- Influence of Thermosetting and Drying on Shrinkage Tenacity and  
Elongation of Acrylic Fibres ; A.I.Stayanov ; Journal of Applied  
Polymen Science, Vol.23, 3123 - 3127 (1979)
- 16- Spray Drying Handbook, 3rd. edition, K.Masters.

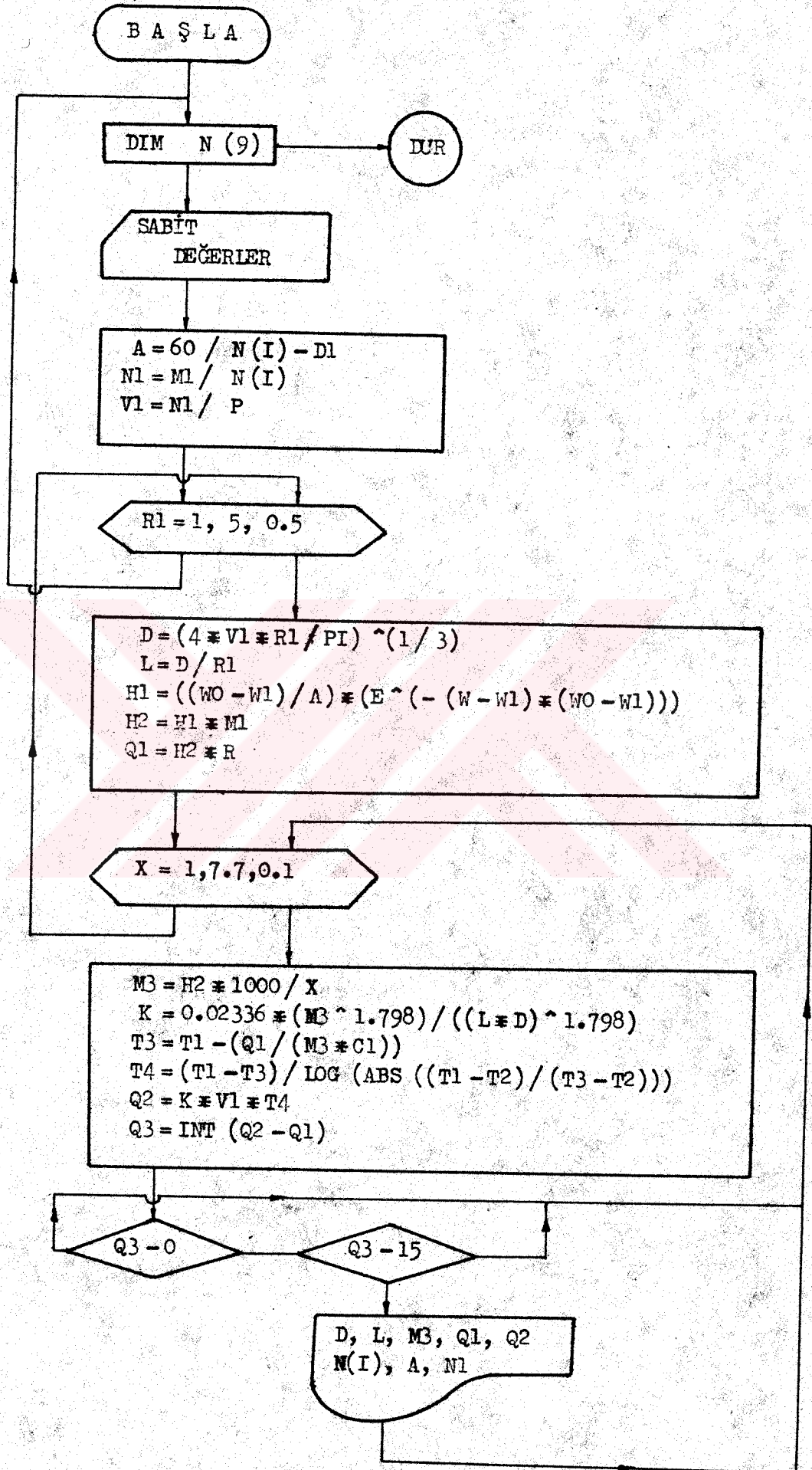


## ÖRNEK TASARIM PROGRAMI

Mekanik Açıcılı Elyaf Kurutucunun, endüstriyel kullanımlar için tasarımına örnek olarak bir computer program geliştirilmiş ve sonraki sayfalarda program, akış şeması ve örnek veriler için elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Örnek olarak;  $M_1 = 45 \text{ kg/h}$  kütleli debili ve  $w_0 = 0,8$  nemli pamuğun  $w = 0,07$  neme kadar kurutulması ele alınmıştır. Bu maksatla  $T_1 = 40^\circ\text{C}$  kuru termometre,  $T_2 = 17^\circ\text{C}$  yaş termometre sıcaklığında hava kullanılmıştır. Saatteki yükleme sayısı ( $N(I)$ ) dizisi ile 1'den 6'ya kadar verilmiş; tambur çapının boyuna oranı ( $D/L = R$ ) 1'den 5'e kadar 0,5 artımla değiştirilmiştir.

Sonuçlar; kurutucu tambur çapı ( $D : \text{mm}$ ), boyu ( $L : \text{mm}$ ) kurutmayı gerçekleştiren kuru hava miktarı ( $M_3 : \text{kg/dak}$ ), kurutma için sabit hız sürecinde gerekli ısı transfer miktarı ( $Q_1 : \text{KCall/dak}$ ), tasarım sonucu transfer edilebilecek ısı miktarı ( $Q_2$ ), saatlik doldurma boşaltma sayısı ( $N(I)$ ), kurutma zamanı ( $A : \text{dak}$ ) ve bir seferde kurutulacak pamuk miktarı ( $M_1 : \text{kg}$ ) olarak istenmiştir.



```

1000'
1010' BALIKESIR D.M.M. AKADEMISI
1020'
1030' DOKTORA TEZI PROGRAMI
1040'
1050' HAZIRLIYAN: YUK.MUH. UMIT KAMCICI
1060'
1070'
1080' OUTPUT FILE
1090'
1100 FILE #1:"USTUN"
1110 SCRATCH #1:
1120 PRINT #1:" MEKANIK ACICILI ELYAF KURUTUCU TASARIMI"
1130 PRINT #1:"*"
1140 PRINT #1:" "
1150 PRINT #1:" D L M3 Q1 Q2";
1160 PRINT #1:" N(I) A N1"
1170 PRINT #1:"===== ";
1180 PRINT #1:"===== "
1190 DIM N(9)
1200'
1210' SABIT DEGERLER
1220'
1230 E=2.71828
1240 C1=0.24
1250 W1=0.31
1260 T1=40
1270 T2=17
1280 R=574
1290 M1=45
1300 W0=0.8
1310 W=0.07
1320 D1=3
1330 P=1.85
1340'
1350' CALCULATION
1360'
1370 FOR I=1 TO 9
1380 READ N(I)
1390 A=60/N(I)-D1
1400 N1=M1/N(I)
1410 V1=N1/P
1420 FOR R1=1 TO 5 STEP 0.5
1430 D=(4*V1*R1/PI)^(1/3)
1440 L=D/R1
1450 H1=((W0-W1)/A)*(E^(-(W-W1)*(W0-W1)))
1460 H2=N1*H1
1470 Q1=H2*R
1480 FOR X=1 TO 7.7 STEP 0.1
1490 M3=H2*1000/X
1500 K=0.02336*(M3^1.798)/((L*D)^1.798)
1510 T3=T1-(Q1/(M3*C1))
1520 T4=(T1-T3)/LOG(ABS((T1-T2)/(T3-T2)))
1530 Q2=K*V1*T4
1540'

```

```

1550' KRITER
1560'
1570 Q3=INT(Q2-Q1)
1580 IF Q3<0 GOTO 1640
1590 IF Q3>=15 GOTO 1640

```

```

1600 D=INT(D*1000) \ L=INT(L*1000)
1610 M3=INT(M3) \ Q1=INT(Q1) \ Q2=INT(Q2)
1620 PRINT £1: TAB(1); D; TAB(5); L; TAB(16); M3; TAB(24); Q1; TAB(37); Q2;
1630 PRINT £1: TAB(48); N(I); TAB(55); A; TAB(60); N1
1640'
1650 NEXT X
1660 NEXT R1
1670 NEXT I
1680'
1690' N(I) VERILERI
1700'
1710 DATA 1,1.2,1.5,2,2.5,3,4,5,6
1720'
1730 END

```

MEKANİK ACICILI ELYAF KURUTUCU TASARIMI

\*

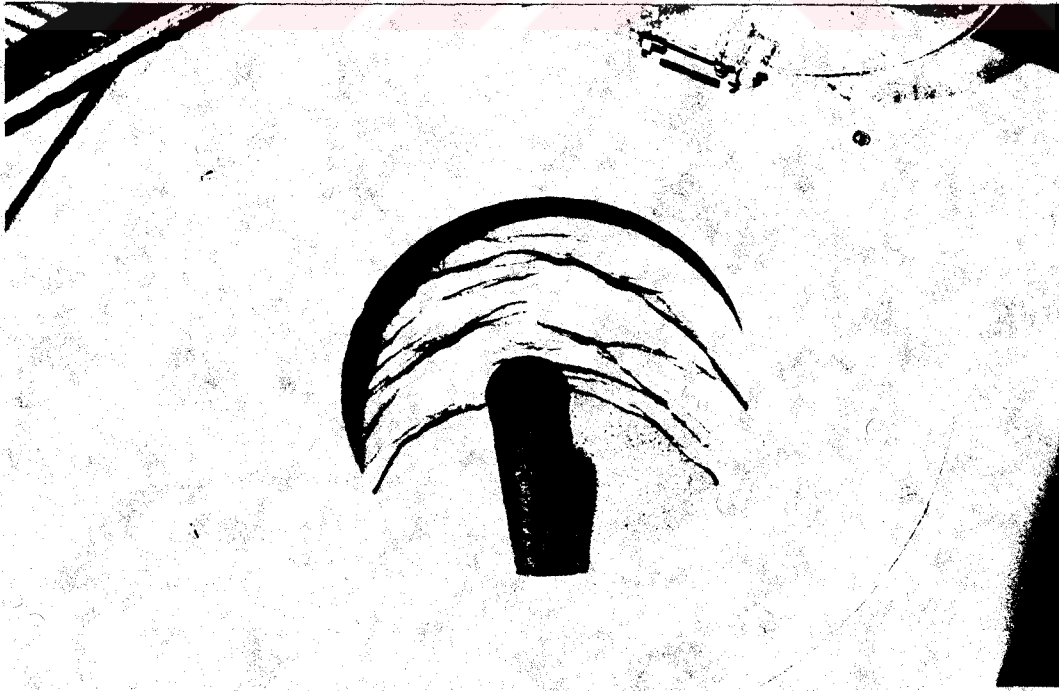
D	L	M3	Q1	Q2	N(I)	A	N1
3140	3140	67	249	255	1	57	45
3594	2396	62	249	255	1	57	45
3956	1978	58	249	257	1	57	45
2955	2955	67	252	259	1.2	47	37.5
3382	2255	61	252	258	1.2	47	37.5
3723	1861	58	252	260	1.2	47	37.5
2743	2743	67	256	267	1.5	37	30
3140	2093	62	256	267	1.5	37	30
3456	1728	58	256	269	1.5	37	30
2492	2492	67	263	274	2	27	22.5
2853	1902	62	263	273	2	27	22.5
2313	2313	67	271	278	2.5	21	18
2648	1765	62	271	277	2.5	21	18
2177	2177	68	279	291	3	17	15
1978	1978	69	296	304	4	12	11.25
1836	1836	72	316	328	5	9	9



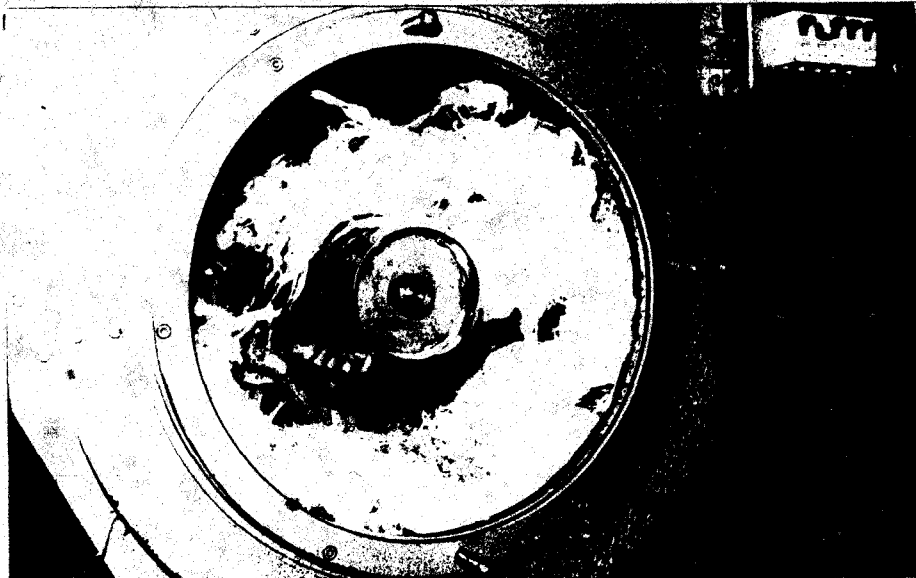
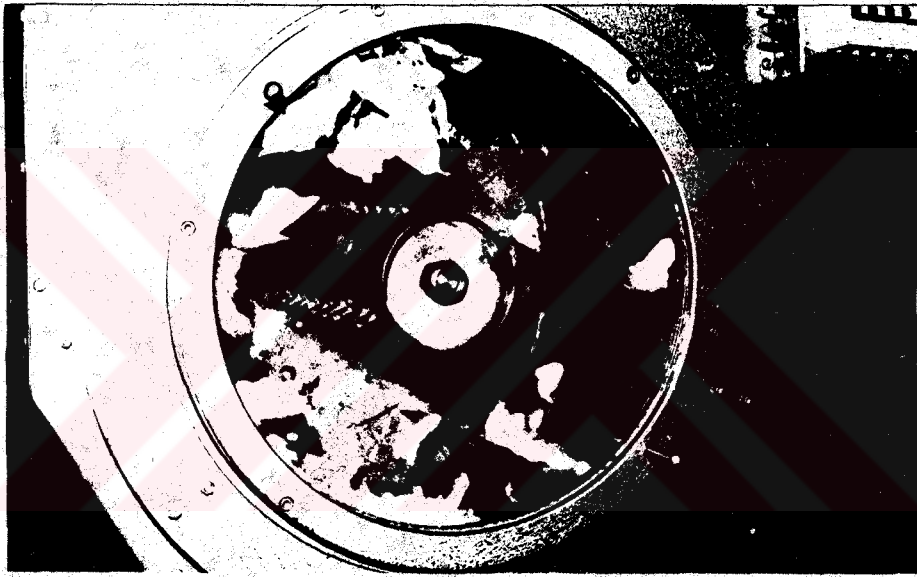
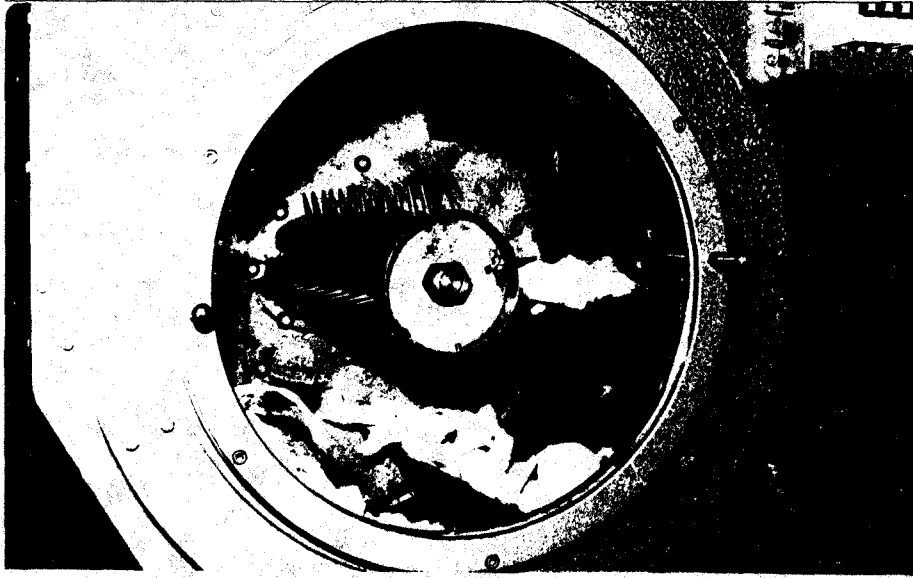
Mekanik Açıcılı Elyaf Kurutucu



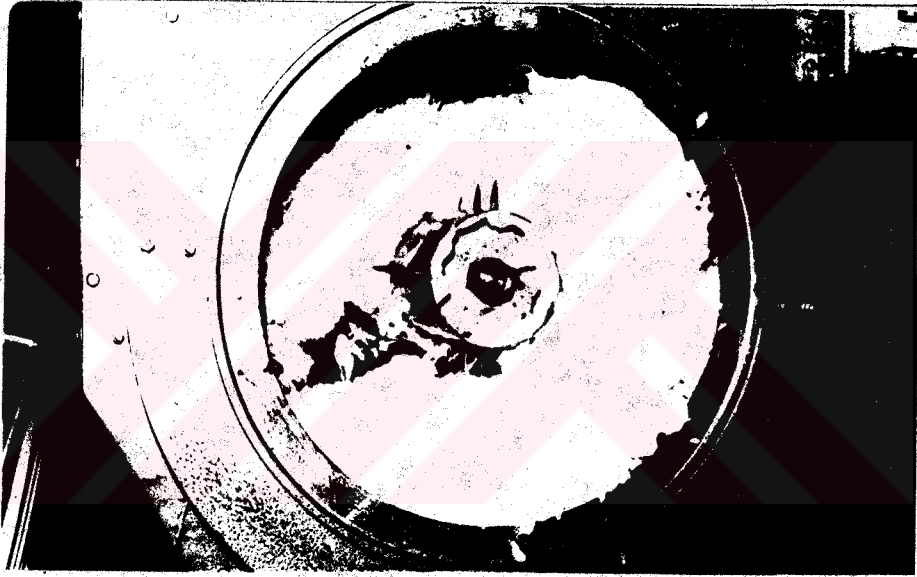
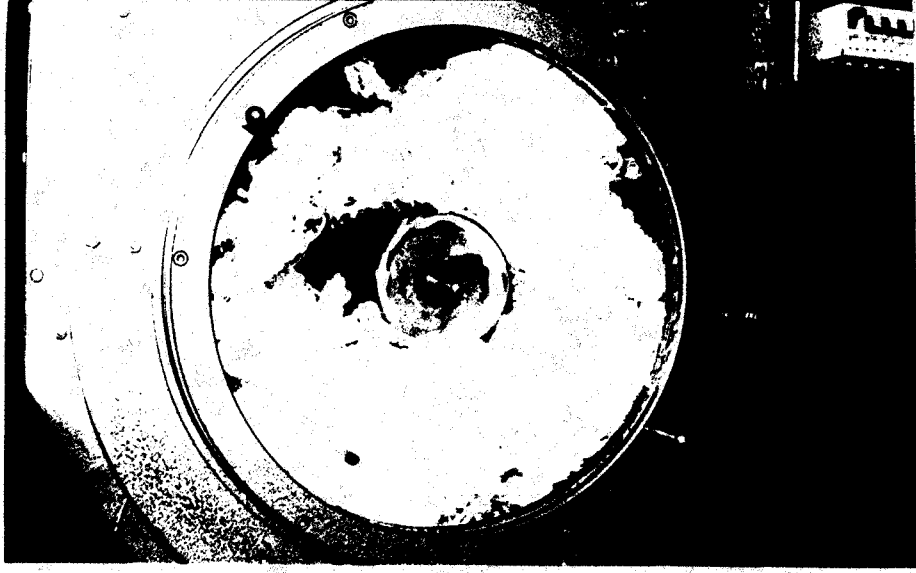
Açma ve Kurutma Tamburları



Santrifüjde Sıkılmış Pamuk Elyafı



Kurutme başlarken



Kurutma somu ve kurutulmuş pamuk

## Ö Z G E Ç M İ Ş

1.8.1951 tarihinde İzmir'de doğdu. İlk ve orta okulu Menemen-İzmir'de okudu. 1967-1968 öğrenim yılında Karşıyaka Erkek Lisesinin Fen Bölümünü bitirdikten sonra 1968-1969 öğrenim yılında Ege M.M.Ö.Y.Okulu Makina Bölümünde okudu. 1970 yılında İstanbul D.M.M.Akademisi Makina Bölümüne girerek 1974 yılında mezun oldu. 1974-1976 öğrenim yıllarında iki yıl süre ile aynı Akademinin Makina Bölümünde " Proses Tekniği " dalında Lisans Üstü öğrenimini tamamlayarak Makina Yüksek Mühendisi oldu. Bir yıl süre ile özel sektörde çalıştıktan sonra 1 Mart 1977 tarihinde Balıkesir D.M.M. Akademisi Makina Bölümüne Asistan olarak girdi. 1981 yılında altı ay süre ile çalışmakta olduğu Akademi tarafından İngiltere'ye gönderilerek Doktora çalışmalarının bir kısmını Salford University'de yaptı. Halen aynı Akademi'de çalışmakta olup evli ve İngilizce bilmektedir.