

8652

DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAK DENEY SİSTEMİNİN KURULMASI VE  
AKIŞKANLAŞMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Tanju ÇETİN  
Ekim 1989


GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**T. C.**  
**Yükseköğretim Kurulu**  
**Dokümantasyon Merkezi**

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Danışman

Prof.Dr. Ali DURMAZ



Sınav Jürisi

Başkan :



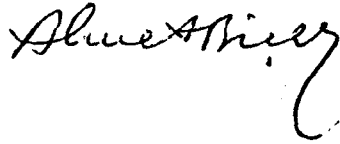
Üye :



Üye :



Bu Tez Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım  
Esaslarına uygundur.



## İÇİNDEKİLER

ÖZ .....	IV
ABSTRACT .....	V
TEŞEKKÜR .....	VI
SEMBOLLER .....	VII
TABLolarIN LİSTESİ .....	X
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	XI
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 1	
AKIŞKANLAŞMA VE DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAK İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	6
BÖLÜM 2	
AKIŞKAN YATAK VE AKIŞKANLAŞMA İLE İLGİLİ TEMEL BİLGİLER .....	9
2.1 Akışkan Yatak .....	9
2.1.1. Akışkan Yatakların Avantajları .....	10
2.1.2. Akışkan Yatakların Dezavantajları .....	12
2.2. Akışkanlaşma Süreci ve Aşamaları .....	12
2.2.1. Akışkanlaşma Rejimleri .....	13
2.3. Karakteristik Akışkanlaşma Eğrisi .....	15
2.4. Minimum Akışkanlaşma Teorisi .....	17
2.5. Minimum Akışkanlaşma Hızı .....	20
2.6. Akışkan Yatakta Tanecik Terminal Hızı .....	22
2.7. Akışkan Yatakta Basınç Aşamaları .....	23
2.8. Minimum Yatak Yüksekliği ve Yatak Genişlemesi .....	26
2.9. Taşınım Serbest Bırakma Yüksekliği (TDH) .....	28
2.10. Minimum Akışkan Boşluğu .....	29

## BÖLÜM 3

DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAK DAVRANIŞININ İNCELENMESİNE YÖNELİK TEST DÜZENİNİN KURULMASI .....	31
3.1. Sistemin Yapısı .....	31
3.2. Kurulu Sistemin Çalışma Prensipleri ve Sistem Parametreleri.	32
3.3. Akışkan Yatak İçin Dağıtıcı Eleğin Boyutlandırılması ....	35

## BÖLÜM 4

KURULAN DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAK DENEY SİSTEMİ ÜZERİNDE YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	39
4.1. Akışkan Yatak Bölgeleri ve Gözlemler .....	39
4.2. Orifis Plaka İle Hava Debisinin Belirlenmesi .....	40
4.3. Dolaşimli Akışkan Yatak Sisteminde Akışkanlaşmayı Tanımlayan Etkili Hızların ve Basınç Değişimlerinin Hesaplanması .....	42
4.3.1. Minimum Akışkanlaşma Hızının Hesaplanması .....	43
4.3.2. Tanecik Terminal Hızının Hesaplanması .....	45
4.3.3. Basınç Düşüşünün Hesaplanması .....	46
4.4. Akışkan Yatakta Katı Taneciklerin Taşınım Özelliğinin İncelenmesi.	49

## BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE İRDELENMESİ .....	66
-------------------------------	----

## BÖLÜM 6

İLERİYE DÖNÜK ÇALIŞMALAR İLE İLGİLİ ÖNERİLER .....	69
--	----

KAYNAKLAR .....	71
-----------------	----

## EKLER

## EK 1

DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAK SİSTEMİNİN SİSTEM PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI .....	E-1
EK 1.1. Kütleli Hava Debisinin Hesaplanması .....	E-1
EK 1.2. Minimum Akışkanlaşma Hızının Hesaplanması .....	E-2
EK 1.3. Terminal Hızın Hesaplanması .....	E-5
EK 1.4. Minimum Akışkan Boşluğunun Hesaplanması .....	E-7
EK 1.5. Yatak Yüksekliğinin Hesaplanması .....	E-8
EK 1.6. Basınç Düşüşünün Hesaplanması .....	E-9

## EK 2.

DAĞITICI ELEK TASARIMI.....	E-11
EK 2.1. Geri Sirkülasyon Akışkanlaştırıcı Tasarımı .....	E-12

EK 3		
SİKLON TASARIMI .....		E-15
EK 4		
HAVA ORİFİSMETRELERİNİN TASARIM HESAPLAMALARI .....		E-17
EK 5		
ELEK ANALİZİ İLE ORTALAMA TANE BÜYÜKLÜĞÜNÜN BELİRLENMESİ .....		E-20



DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAK DENEY SİSTEMİNİN  
KURULMASI VE AKIŞKANLAŞMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Tanju ÇETİN  
GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim, 1989

ÖZ

Akışkanlaşma süreci, yanma, kurutma, gazlaştırma, ayrıştırma vb. birçok teknolojik ve endüstriyel süreçlerin enerji-işletme ekonomisi ve çevresel etki yönünden en uygun biçimde gerçekleştirilmesi için üzerinde durulması gereken fiziksel bir olaydır. Özellikle düşük kalite linyitlerin temiz ve verimli yakılmasında dolaşimli akışkan yatak uygulaması çok güncel bir konudur. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Isıl-Güç Laboratuvarında bulunan araştırma ve geliştirmeye yönelik 50 kW<sub>t</sub> güçteki dolaşimli akışkan yatak yakma sisteminin akışkanlaşma özelliğinin gözlenebilir biçimde incelenmesi ve en uygun akışkanlaşma özelliğinin belirlenmesi için bir soğuk akışkan yatak deney sistemi kurulması gerekmiştir.

Bu çalışmada bir dolaşimli akışkan yatak deney sistemi kurularak akışkan yatak hidrodinamik yapısı ve akışkanlaşma davranışı incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar ile literatürde verilmiş olan matematik modeller arasında karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca olayın fiziksel olarak nasıl gerçekleştiği gözlenmiş ve özellikle önemli sistem parametreleri olan minimum akışkanlaşma hızı, terminal hız, basınç düşüşü, minimum akışkanlaşma yatak yüksekliği ve boşluk oranı üzerinde durulmuştur. Ayrıca akışkan yatakta katı taneciklerin taşınım özellikleri de deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarla karakteristik akışkanlaşma eğrisi oluşturulmuş ve ilerideki çalışmalara yönelik biçimde öneriler getirilmiştir.

CONSTRUCTION OF A CIRCULATING FLUIDIZED BED TEST SYSTEM  
AND INVESTIGATION OF FLUIDIZATION BEHAVIOUR

(M.Sc. Thesis)

Tanju ÇETİN

GAZİ UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

October, 1989

ABSTRACT

Fluidization in some industrial processes such as combustion, drying, gasification, separation, fuel up-grading etc. is an important phenomenon which has to be investigated from the economical, operational and environmental control points of view. Especially, the application of circulating type fluidized bed combustion systems for the efficient and clean combustion of low grade fuels is a very interesting research area for the time being. In the heat-power laboratories of the Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering and Architecture, of Gazi University, a research oriented cold circulating type fluidized bed system, which corresponds to the existing 50 kW<sub>t</sub> hot system in the same laboratories, is designed and constructed for the experimental investigation of the hydrodynamic behaviour of the circulating bed for different bed materials and operational conditions.

In this work, using the designed and constructed system, on experimental and theoretical analysis of the fluidization characteristics of circulating bed has been made. In addition, the transport properties of solid particles in the fluidized bed has been investigated. The experimental and the theoretical results have been compared and discussed.

## TEŞEKKÜR

Bu alıőma sűresince, tűm araőtırma programının gerekleőtirilmesinde, teorik ve pratik her konuda, yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof.Dr. Ali DURMAZ'a ve Sayın Do.Dr. Hűseyin VURAL'a teőekkűr ederim.



## SEMBOLLER

Sembol	Anlam
A	Dağıtıcı elek kesit alanı, $m^2$
$A_d$	Dağıtıcı elek delik kesit alanı, $m^2$
$Ar$	Archimedes sayısı, $d_p^3 \rho_p g(\rho_p - \rho_g)/\mu^2$ , boyutsuz
$A_s$	Siklon giriş kesit alanı, $m^2$
$A_t$	Yatak kesit alanı, $m^2$
$C_D$	Sürüklenme katsayısı, boyutsuz
C	Boşaltma katsayısı, boyutsuz
$C'_D$	Orifis katsayısı, boyutsuz
d	Orifis metre delik çapı, m
$d_{or}$	Dağıtıcı elek delik (orifis) çapı, m
$d_p$	Tanecik çapı, m
D	Orifis metre boru çapı, m
$D_c$	Siklon iç çapı, m
$D_e$	Siklon çıkış çapı, m
$D_s$	Siklon giriş çapı, m
$D_t$	Yatak çapı, m
E	Yaklaşım hız faktörü, boyutsuz
g	Yerçekimi ivmesi, $9,81 m/s^2$
$g_c$	Yerçekimi ivmesi düzeltme faktörü ( $kg m/N-s^2$ )
Ga	Galileo sayısı, $d_p^3 \rho_p (\rho_p - \rho_g) g/\mu^2$ , boyutsuz
$G_s$	Geri sirkülasyon hızı, $kg/m^2-s$
H	Genişlemiş yatak yüksekliği, m
$H_{max}$	Maksimum yatak yüksekliği, m

## VIII

Sembol	Anlam
$H_{mf}$	Minimum yatak yüksekliği, m
$H_s$	Sabit yatak yüksekliği, m
$J_c$	Siklon katı çıkış borusu çapı, m
$K$	isentropik üs
$k'$	Sabit, boyutsuz
$L_f, L_{mf}$	Genleşmiş yatak yüksekliği, m
$L_c$	Siklon silindirik kısım uzunluğu, m
$M$	Yatak malzemesi ağırlılığı, kg
$m$	Akışkan yatakta tanecik taşınım miktarları (kg)
$N_{or}$	Birim alanda orifis (delik) sayısı, $1/cm^2$
$N_T$	Toplam orifis sayısı, adet
$P_a, P_b$	Orifis metre giriş-çıkış basınçları, mm $H_2O$
$\Delta P$	orifis metreden ölçülen basınç düşüşü, mm $H_2O$
$\Delta P_B$	Yatak boyunca basınç düşüşü, mm $H_2O$
$\Delta P_d$	Dağıtıcı elekte basınç düşüşü, mm $H_2O$
$q_m$	Kütlesel hava debisi, kg/s
$Re$	Reynolds sayısı, $d_p U \rho_g / \mu$ , boyutsuz
$Re_{mf}$	Minimum akışkanlaşma hızında Reynolds sayısı, boyutsuz
$Re_T$	Terminal hızda Reynolds sayısı, boyutsuz
$Re_p$	Tanecik çapına bağlı Reynolds sayısı, boyutsuz
$r_1, r_2, r_3$	Yatak yarıçapı, m
$S_c$	Siklon giriş seviyesi ile çıkış seviyesi arasındaki yükseklik, m
$TT$	Akışkan yatakta tanecik taşınımı ( $gr/m^2s$ )
$TDH$	Taşınım serbest bırakma yüksekliği, m
$U_f, U$	Gaz hızı, m/s
$U_{bo}$	Kabarcık hızı, m/s
$U_{gs}$	Siklon giriş hızı, m/s
$U_{max}$	Yatakta oluşan maksimum hız, m/s

<u>Sembol</u>	<u>Anlam</u>
$U_{mf}$ :	Minimum akışkanlaşma hızı, m/s
$U_o$ :	Çalışma hızı (boş kolon gaz hızı), m/s
$U_{or}$ :	Dağıtıcı elekteki orifis hızı, m/s
$U_T$ :	Terminal hız, m/s
$V_{mf}$ :	Minimum akışkanlaşma durumunda karışım hacmi, m <sup>3</sup>
$V_s$ :	Sabit yatakta katıların hacmi, m <sup>3</sup>
$W$ :	Yatak ağırlığı, kg
$Z_c$ :	Siklon konik kısım yüksekliği, m

Yunan Harfleri :

$\alpha$ :	Akış katsayısı, boyutsuz
$\beta$ :	Orifis metre delik çapının boru çapına oranı, boyutsuz
$\epsilon, \epsilon_f$ :	Genişlemiş yatak boşluk oranı, boyutsuz
$\epsilon'$ :	Genleşme faktörü, boyutsuz
$\epsilon_{mf}$ :	Minimum akışkanlaşma boşluk oranı, boyutsuz
$\mu$ :	Akışkan (hava) viskozitesi, kg/m-s
$\rho_g$ :	Havanın yoğunluğu, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_p$ :	Tanecik yoğunluğu, kg/m <sup>3</sup>
$\phi_s$ :	Tanecik küresellik faktörü, boyutsuz

## TABLOLARIN LİSTESİ

<u>Tablo</u>		<u>Sayfa</u>
Tablo 4.1.	Yatak malzemesi ve akışkanın karakteristik özellikleri .....	40
Tablo 4.2.	Sistemde ölçülen ve belirlenen deneysel sonuçlar.	41
Tablo 4.3.	Sistem parametrelerinin teorik olarak hesaplanan değerleri .....	46
Tablo 4.4.	Deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması..	47
Tablo 4.5.	Kendir ve perlit için ölçülen ve belirlenen akışkanlaşma sonuçları .....	49
Tablo 4.6.	Kendir tanecikleri için taşınım deneyi sonuçları.	53
Tablo 4.7.	Perlit tanecikleri için taşınım deneyi sonuçları.	53

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Boş kolon akış hızına karşı basınç gradyanı eğrisi üzerinde akışkanlaşma rejim bölgele- rinin şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.2. Karakteristik akışkanlaşma eğrisi .....	16
Şekil 2.3. Dağıtıcı elek üzerinde akışkanlaşma hali .....	19
Şekil 2.4. Belirli bir büyüklükteki kum tanecikleri için basınç düşüşü ile gaz hızı ilişkisi .....	24
Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik görünüşü .....	33
Şekil 3.2. Test düzeninin genel görünüşü .....	34
Şekil 3.3. Test düzeninde akışkanlaşma ve dolaşımın görü- nüşi .....	34
Şekil 4.1. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile oluş- turulan karakteristik akışkanlaşma eğrisi (Tab- lo 4.2'den (yatak malzemesi kepek) .....	48
Şekil 4.2. Kendir için elde edilen akışkanlaşma eğrisi .....	50
Şekil 4.3. Perlit için elde edilen akışkanlaşma eğrisi .....	51
Şekil 4.4. Akışkan yatakta tanecik taşınımı deneyinde akış- kan yatak kolonunun konumu .....	52
Şekil 4.5. Akışkan yatakta tanecik taşınımının, boş kolon hı- zı $U_0$ ve yatak yüksekliği $L$ 'ye bağlı olarak $r_3=0$ daki değişimi (yatak malzemesi kendir) .....	54
Şekil 4.6. Akışkan yatakta tanecik taşınımının, boş kolon hı- zı $U_0$ ve yatak yüksekliği $L$ 'ye bağlı olarak $r_3=0$ daki değişimi (yatak malzemesi perlit).....	54
Şekil 4.7. Akışkan yatakta tanecik taşınımının, boş kolon hızı $U_0$ ve yatak yüksekliği $L$ 'ye bağlı olarak $r_2=2,5$ cm'deki değişimi (yatak malzemesi kendir). .....	55

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.8. Akışkan yatakta tanecik taşınımının, boş kolon hızı $U_0$ ve yatak yüksekliği L'ye bağlı olarak $r_2=2,5$ cm'deki değişimi (yatak malzemesi perlit).....	55
Şekil 4.9. Akışkan yatakta tanecik taşınımının, boş kolon hızı $U_0$ ve yatak yüksekliği L'ye bağlı olarak $r_1=5$ cm'deki değişimi (yatak malzemesi kendir) .....	56
Şekil 4.10. Akışkan yatakta tanecik taşınımının, boş kolon hızı $U_0$ ve yatak yüksekliği L'ye bağlı olarak $r_1=5$ cm'deki değişimi (yatak malzemesi perlit) .....	56
Şekil 4.11. Akışkan yatakta tanecik taşınımının, yatak yarıçapı r ve yatak yüksekliği L'ye bağlı olarak $(U_0)_1=47,5$ cm/s deki değişimi (yatak malzemesi kendir).....	57
Şekil 4.12. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yarıçapı r ve yatak yüksekliği L'ye bağlı olarak $(U_0)_1=281$ cm/s deki değişimi (yatak malzemesi perlit) .....	57
Şekil 4.13. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yarıçapı r ve yatak yüksekliği L'ye bağlı olarak $(U_0)_2=48,9$ cm/s deki değişimi (yatak malzemesi kendir) .....	58
Şekil 4.14. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yarıçapı r ve yatak yüksekliği L'ye bağlı olarak $(U_0)_2= 29,3$ cm/s deki değişimi (yatak malzemesi perlit) .....	58
Şekil 4.15. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yarıçapı r ve yatak yüksekliği L'ye bağlı olarak $(U_0)_3=50,2$ cm/s'deki değişimi (yatak malzemesi kendir).....	59
Şekil 4.16. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yarıçapı r ve yatak yüksekliği L'ye bağlı olarak $(U_0)_3=31,5$ cm/s'deki değişimi (yatak malzemesi perlit) .....	59

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.17. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği $L$ ve boş kolon hızı $U_0$ 'a bağlı olarak $r_3=0$ daki değişimi (yatak malzemesi kendir) .....	60
Şekil 4.18. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği $L$ ve boş kolon hızı $U_0$ 'a bağlı olarak $r_3=0$ daki değişimi (yatak malzemesi perlit) .....	60
Şekil 4.19. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği $L$ ve boş kolon hızı, $U_0$ 'a bağlı olarak $r_2=2,5$ cm deki değişimi (yatak malzemesi kendir).....	61
Şekil 4.20. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği $L$ ve boş kolon hızı $U_0$ 'a bağlı olarak $r_2= 2,5$ cm'deki değişimi (yatak malzemesi perlit) .....	61
Şekil 4.21. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği $L$ ve boş kolon hızı $U_0$ 'a bağlı olarak $r_1=5$ cm'deki değişimi (yatak malzemesi kendir) .....	62
Şekil 4.22. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği $L$ ve boş kolon hızı $U_0$ 'a bağlı olarak $r_1= 5$ cm'deki değişimi (yatak malzemesi perlit) .....	62
Şekil 4.23. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği $L$ ve yatak yarıçapı $r$ 'ye bağlı olarak $(U_0)_1=47,5$ cm/s deki değişimi (yatak malzemesi kendir).....	63
Şekil 4.24. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği $L$ ve yatak yarıçapı $r$ 'ye bağlı olarak $(U_0)_1 =28,1$ cm/s deki değişimi (yatak malzemesi perlit).....	63
Şekil 4.25. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği $L$ ve yatak yarıçapı $r$ 'ye bağlı olarak $(U_0)_2=48,9$ cm/s deki değişimi (yatak malzemesi kendir).....	64

ŞekilSayfa

- Şekil 4.26. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği  $L$  ve yatak yarıçapı  $r$ 'ye bağlı olarak  $(U_0)_2=29,3$  cm/s deki değişimi (yatak malzemesi perlit) ..... 64
- Şekil 4.27. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği  $L$  ve yatak yarıçapı  $r$ 'ye bağlı olarak  $(U_0)_3= 50,2$  cm/s'deki değişimi (yatak malzemesi kendir)..... 65
- Şekil 4.28. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği  $L$  ve yatak yarıçapı  $r$ 'ye bağlı olarak  $(U_0)_3=31,5$  cm/s deki değişimi (yatak malzemesi perlit)..... 65



## GİRİŞ

Günümüzde gelişmenin kaynağı olan enerji giderek yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle kullanılabilir enerji kaynaklarının en verimli şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Çağın enerji gereksiniminin karşılanmasında en büyük pay fosil yakıtlara aittir. Ancak fosil yakıt kaynaklarının sınırlılığı nedeniyle insanlar yeni enerji kaynakları aramaya yönelmişlerdir. Yeni enerji kaynakları ve bunları kullanılabilir enerjiye dönüştürme yollarının araştırılması çabaları, devlet kuruluşları ve özel sektör olarak dünya devletlerini çok büyük harcamalar yapmaya zorlamaktadır.

Uzun vadeli bu çalışmalarla birlikte özellikle son yıllarda büyük ölçüde artış gösteren petrol fiyatları sonucu oluşan enerji krizi; petrolü olmayan ülkelerde dışarıdan petrol temin etmek yerine kendi yeraltı kaynaklarındaki daha düşük kalorili yakıtlardan enerji üretimini zorunlu kılmış ve bu zamana kadar ekonomik olmayan bu düşük kaliteli yakıtlardan enerji üretimi, günümüzde yeni yakma teknolojileri ile ekonomik hale gelmeye başlamıştır.

Enerji üretimine yönelik yeni kaynaklar arayan ve diğer yandan mevcut yakıtlardan en iyi biçimde yararlanmayı amaçlayan ülkeler, bir yandan düşük kaliteli yakıtları, enerji ekonomisi ve hava kirliliğinin kontrolü yönünden uygun biçimde yakmaya çalışırken, diğer yandan de çeşitli atıkları (evsel, endüstriyel v.b. atıklar) enerji girdisi olarak kullanma yönüne gitmektedir. Bu uygulamalarda akışkan yatak umut verici bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır.

İçerdiği kirleticiler gereği yapısal olarak hava kirleticiler

özelliğe sahip düşük kaliteli yakıtların, verimli ve temiz yakılmasına yönelik yakma teknolojilerinin başında akışkan yatakta yakma uygulaması gelmektedir. Akışkan yatak ve akışkanlaşma süreci yanma dışında diğer bir çok sorunların (kurutma, ayrıştırma, kimyasal süreçler vb.) çözümünde de etken bir biçimde kullanılmaktadır.

İlk olarak 1900 'lerde geliştirilen akışkan yatak sistemleri 20 yıl içinde kazan endüstrisinde de kullanılmaya başlamıştır. Düşük hız rejimlerinde çalışan kabarcıklı akışkan yataklar, oldukça düşük kaliteli turba, linyit vb. kömürleri kolaylıkla yakabilme avantajlarından dolayı günümüzde küçük ve orta kapasiteli yakma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Akışkan yatakta yakmanın yüksek kül, nem, N, S, uçucu madde içeren düşük kaliteli linyitlerin verimli ve temiz yakılması yönünden başlıca avantajları şunlardır:

a. Akışkan yatak, yaklaşık % 95 dolgu maddesi (ısı deposu), % 5 yakıt (ısı kaynağı) dan oluşması nedeniyle; nem, uçucu madde vb. den kaynaklanan yanmayı firenleyici süreçlerin (kurutma, buharlaşma, gazlaşma vb.) olumsuz etkisini ortadan kaldıracak boyutta depolanmış ısı enerjisine sahip olması.

b. Yakıtın türbülans ve dolaşım nedeni ile daha uzun süre yanma odasında kalması sonucu yanmamış madde kayıplarının en aza indirilmesi olanağının bulunması.

c. Aşırı türbülans nedeni ile sürekli kül eleme sağlanarak yakıt-hava ( $C-O_2$ ) temasının en uygun şekilde gerçekleştirilebilmesi.

d. Akışkan yatak sıcaklığının  $750-950^{\circ}C$  dolayında tutularak  $NO_x$  oluşumu ve  $NO_x$  emisyonlarının "Hava Kalitesi Yönetmeliği"nde öngörülen sınır değerlerin altında tutulabilmesi

e. Akışkan yatağa kireç, kireçtaşı, dolomit vb. türden katkı maddeleri ilave edilerek  $SO_2$  emisyonunun yönetmelik sınır değerlerinin altına indirmesi olanağının bulunması.

Öte yandan bu sistemler, kazan endüstrisinde kullanılan diğer klâsik yakma sistemlerine göre iyi bir katı-gaz karışımına izin verdiği için, daha yüksek yanma verimine sahiptirler.

Yakma sisteminin verimini ve yanma kalitesini, en başta yakıt yanma özelliği belirlemektedir. Yanma özellikleri, genelde yakıt, ısıl değeri arttıkça iyileşmektedir. Yüksek nem, uçucu madde ve kül içerikli, düşük ısıl değerli genç linyitlerin uygun biçimde yakılması birçok teknolojik sorunları beraberinde getirmektedir. Enerji değeri genelde düşük kaliteli linyitlere dayanan ülkemizde; bu yakıtların yanma özelliklerinin iyileştirilmesi, enerji ekonomisi ve hava kirliliği kontrolü yönünden uygun biçimde yakılması hayati önem taşımaktadır.

Günümüzde bu çalışmalarda bir adım daha ileriye gidilerek küçük ve orta kapasiteli ( $Q_{\max} \leq 50 \text{ kW}_t$ ) alışılmış kabarcıklı akışkan yatak yakma sistemlerinin ötesinde özellikle büyük kapasiteli uygulamalar (termik santral, endüstriyel kazanlar vb.) için dolaşım (circulating fluidized bed) akışkan yataklı yakma sistemleri geliştirilmiştir. Dolaşım (circulating fluidized bed) akışkan yatak uygulamaları ısıl verim ve kükürt tutma yönünden kabarcıklı tipe kıyasla üstünlük göstermekte; bu nedenle günümüzde dolaşım (circulating fluidized bed) tipe bir yönelme görülmektedir.

Yanma özelliğini belirleyen yanmanın temel 3 koşulu olan türbülans, sıcaklık ve zamanın (3T : Turbulance-Temperature-Time) enerji ve işletme ekonomisi yönünden dolaşım (circulating fluidized bed) akışkan yataklı yakma sistemlerinde daha uygun biçimde oluşturulması olanağı bulunmaktadır. Yanma-

da bu üç koşul yakıt ve havanın içiçe uygun biçimde karıştırılması (turbulance), yanıcı karışımın tutuşma sıcaklığının üzerinde tutulması (temperature) ve yanıcı karışımın, yanma tamamlanıncaya kadar tutuşma sıcaklığı üzerinde bir sıcaklıkta yanma odasında tutulması (Time) olarak tanımlanmaktadır. Dolaşımli akışkan yatakta yanmamış yanıcı taneciklerin, yanma tamamlanıncaya kadar yatağa geri beslenme olanağı bulunmaktadır.

Yakma sistemlerine yönelik olarak dolaşımli akışkan yatak davranışının incelenmesi, enerji ve işletme ekonomisi yönünden en uygun yatak biçiminin oluşturulması, tasarım ve işletmeye yönelik sistem parametrelerinin bulunması amacı ile bir soğuk akışkan yatak deney sistemi kurulması düşünülmüştür. Akışkan yatak tasarımı, bugün için tam olarak teorik bir temele oturtulabilmiş değildir. Bu sistemlerin tasarımı , işletme yönünden uygun biçimde deneysel yaklaşımlara göre olmaktadır.

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Isıl-Güç Laboratuvarında kurulmuş olan düşük kaliteli Türk linyitlerinin verimli ve hava kalitesi yönünden temiz yakılmasını amaçlayan dolaşımli akışkan yatak yakma sisteminin işleyişini ve gözlenemeyen akışkan yatak davranışının incelenmesini, işletme yönünden en uygun akışkan yatak tasarımı ve akışkanlaşma ile ilgili parametrelerin belirlenmesini amaçlamaktadır.

Bu nedenle soğuk akışkan yatak geometrisi ve boyutlarının mevcut dolaşımli akışkan yatak yakma sistemi ile aynı olmasına özen gösterilmiştir. Bu çalışmada aynı akışkan yatak davranışını tanımlayan ve literatürde verilen genelde ampririk özelliğe sahip bazı matematiksel bağıntılar kullanılarak sistem davranışı incelenecektir.

Bu deney sisteminde iki fazlı akımlardaki türbülans, hidrodinamik ayrışma, ısı transferi, erozyon vb. temel araştırmalara yönelik ayrıntılı bilimsel çalışmalar yapılabilir, işletmeye yönelik olarak dolaşımli akışkan yatak davranışı izlenebilir. Bu çalışmanın temel amacı; bu araştırmalara yönelik soğuk bir dolaşımli akışkan yatak deney sisteminin kurulması ve akışkanlaşma davranışı ile ilgili ön deneylerin yapılmasıdır.



## BÖLÜM 1

AKIŞKANLAŞMA VE DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAK İLE İLGİLİ  
DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Düşük hızlı rejimde çalışan akışkan yataklara alternatif olarak geliştirilen "Dolaşimli Akışkan Yatak Reaktörü" ilk defa Reh (1) tarafından 1971 yılında F.C.C. (Fluid Catalytic Cracking) nin kraking işleminde kullanılmıştır. Geliştirilen bu sistemde, diğer akışkan yataklardan farklı olarak daha yüksek akışkanlaşma hızı rejimlerinde çalışılmıştır. Hızın yüksek olması nedeniyle yataktan ayrılan katıların, bir siklonda tutularak yatağa geri beslenmesi suretiyle katı dolaşım sağlanmıştır.

Dolaşimli akışkan yatak reaktörlerin, düşük hızlı ve kabarcıklanmalı akışkan yataklara göre birçok üstünlüklere sahip olduğu görülmüştür. Bu sistem ilk olarak katalitik ve katalitik olmayan gaz-katı fazlı reaktör uygulamalarında kullanılmıştır. Batı Almanya'da 1980'li yıllarda Lurgi (2) dolaşimli akışkan yatağı, kömür yakma sistemlerine uygulamıştır. Lurgi, ayrıca dolaşimli akışkan yataklar konusunda soğuk analiz üzerinde de çalışmıştır. Yakma ve enerji üretiminde birçok avantajlara sahip olan bu sistemler, Batı Almanya'nın bazı kentlerinde endüstriyel boyutlu enerji santrallerinde kullanılmaktadır. Kurulan sistemlerde, diğer klâsik akışkan yataklara göre daha az kireçtaşı kullanarak % 90'ın üzerinde SO<sub>2</sub> tutulmuş ve değişik noktalardan yatağa hava beslenebilmesi nedeniyle daha az NO<sub>x</sub> emisyonları sağlanmıştır.

Bunların yanında; yüksek yanma verimi (% 95'den büyük), yüksek ısı aktarımı karakteristikleri ve daha yüksek kapasiteler gibi avan-

tajlar gözlenmiştir. Nispeten az denenmiş olan dolaşımli akışkan yatak yakma sistemleri (D.A.Y.Y.S.)'nin endüstriyel uygulamaları, özellikle batı ülkelerinde son bir kaç yılda hızla artmıştır.

Dolaşımli akışkan yatak kazanlarının hidrodinamik özellikleri hakkında, literatürdeki bilgiler oldukça azdır. Yapılan araştırmalarda çok ince öğütölmüş kömür tozu ile (50-300 µm arasında) denemeler yapılmış ve ayırt edici beş temel özelliği aşağıda sıralanmıştır (3).

i. Dikey yukarı akışlı kolon reaktörlerde, boş kolon gaz hızı 4-12 m/s sınırlarındadır. Bu sınırlar, tanecik boyutu ve kolon çapına göre değişebilmektedir. Genel bir kriter olarak kolondaki terminal (akışkanlaşmış yataktaki katı taneciklerin tamamı taşınmaya başladıkları veya basınç düşüşünün sıfıra yaklaştığı andaki hız) hızın üzerindeki hızlar alınabilir.

ii. Kolondaki yatağın üst yüzeyleri diğer akışkanlara göre farklı değildir.

iii. Kolondaki toplam boşluk oranı 0,85 - 0,99 arasındadır.

iv. Gaz ile katı partiküllerin oluşturduğu emülsiyon fazı yerine sürekli bir gaz fazı biçimindedir.

v. Kolonun içinden ve dışından katıların geri döndürölmesi için, çalışma şartlarından dolayı taneciklerin kolon tepesine erişme mesafeleri çoğunlukla yüksektir. Dolayısıyla kolon yüksekliği fazladır.

Akışkan yataklar konusunda temel anlamda yapılan teorik çalışmalar yönünde Max Leva önemli gelişmeler kaydetmiştir. Leva (4) bazı arkadaşları ile birlikte akışkan yatak öncesinde, öğütölmüş taneciklerin dolgun yataklar boyunca akışının deneysel araştırmasını

yapmış ve sonuçta Kozeny-Carman tipi denklem için verinin değiştirelebileceğini ortaya koymuştur. Leva, daha sonra aynı durumu viskoz akış için de ifade etmiştir. Leva, minimum akışkanlaşma olayı üzerinde de önemle durmuş ve minimum akışkan boşluğu üzerine yaptığı çalışmalar sonucu kolon boşluk oranı ( $\epsilon_{mf}$ ) değerini belirlemiştir.

Öte yandan Zenz (5) minimum akışkanlaşma hızının akışkanlaşma olayının başlangıcı olduğunu vurgulayarak, bir sonsuz akışkanda tek tanecikler için terminal hız üzerinde durmuştur.

Bu tarzda yapılan pek çok çalışma sonucunda, akışkanlaşmada en önemli parametrenin minimum akışkanlaşma hızı olduğu ortaya konmuştur. Minimum akışkanlaşma hesabı için en iyi ve geçerli sonuç veren ifade Ergun eşitliği (6) olarak adlandırılmıştır.

İlerideki çalışmalara katkısı gözönünde tutularak ayrıca 1983-1989 arası literatür taraması yapılmış konu ile ilgili çalışmalar belirtilmiştir (7, 17).

## BÖLÜM 2

### AKIŞKAN YATAK VE AKIŞKANLAŞMA İLE İLGİLİ TEMEL BİLGİLER

#### 2.1. Akışkan Yatak

Küçük katı taneciklerle doldurulmuş uzun bir dik kaptan gaz veya sıvı geçirildiğinde, belirli bir akışkan hızının üzerinde akışkanlaşma denilen sıvısal bir davranış gözlenir. Bu durumda, akışkan ile katı tanecikler arasındaki temas, diğer temas yöntemlerine göre daha iyi olarak sağlanır. Bu özelliğinden dolayı akışkanlaşma; endüstride taşınım, ayrışma, ısıtma, kurutma, gazlaştırma, absorpsiyon vb. gibi fiziksel işlemler ile bazı kimyasal işlemlerde geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Son yılların en önemli sorunlarından bir tanesi de kaliteli veya kalitesiz yakıtlardan en yüksek yanma veriminin, çevre kirlenmesine neden olmadan elde edilmesidir. Bu katı yakıtların akışkan yatakta en yüksek verimle ve çevreyi kirletmeden yakılması mümkündür. Ülkemiz kömürlerinin çoğu düşük kaliteli, yüksek kül oranı içeren, düşük ısıllı ve bol kükürtlü türdendir. Türkiye'deki bitümlü şist yatakları % 20'nin üzerinde kömür içermektedir. Bu tip kömürler alışılmış yöntemlerle yakıldığında çıkan kükürt dioksitin ( $SO_2$ ) tutulmaması durumunda çevre kirlenmesi söz konusu olmaktadır. Kükürt dioksitin bu sistemlerde tutulması ayrı bir tesisi gerektirdiği için pahalı olmaktadır. Ancak, akışkan yatakta yanma yapılırken, kireçtaşı ilave edilerek kükürtün küle geçmesi temin edilebilir. Ayrıca ülkemizde, linyit yataklarında yararlanılamayan düşük kaliteli linyit tozu dağları oluşmuştur. Bunların ekonomiye kazandırılması uygulamalarında da

akışkan yatak başlıca çözüm olarak görülmektedir.

Akışkan yatağın bu çekici özelliklerine karşı henüz çözüme kavuşturulmamış bazı sorunları bulunmaktadır. Bunlardan biri tüm yatak boyunca düzenli ve kararlı bir akışkanlaşma sağlayabilme zorluğudur. Yatakta yığılım, habbeleşme, ölü bölgeler, kanallaşma gibi sorunlar mevcuttur. Bu nedenle, gözlenebilir soğuk akışkanlaşma deney düzenlerinde akışkan yatak hidrodinamiğinin incelenmesi teknolojilerin geliştirilmesinde çok büyük önem taşımaktadır. Uygun yatak hidrodinamik davranışının oluşturulmasında dağıtıcı elek boyutlandırması da büyük önem taşır.

#### 2.1.1. Akışkan Yatakların Avantajları (18,19)

Mühendislik alanında bir reaktör tipi olarak akışkan yatak, sağladığı avantajlar nedeniyle çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Avantajları şu şekilde açıklanabilir :

a. Akışkanlaştırılmış katıların bir sıvı davranışı göstermesi, bu tekniğin pek çok sürekli işleme uygulanabilmesini mümkün kılar. Sürece ait değişkenlerin otomatik ve kesin kontrolünü, benzer ürünler elde edilmesini sağlar. İşgücü masrafını azaltır.

b. Diğer metodlarla karşılaştırıldığında, akışkanlaştırılmış katı taneciklerden oluşmuş bir yatak, yoğun türbülans nedeni ile izotermik koşulları çok daha kolay gerçekleştirebilir. Yatakta sıcaklığın kontrol edilebilmesi ise aşağıdaki avantajları sağlar.

- Şiddetli türbülans nedeniyle yatak içinde homojen bir sıcaklık dağılımı oluşabilmektedir.

- Yatağın ısı kapasitesi yüksek olduğundan yatak sıcaklığı kararlıdır.

- Akışkan yataklarda, ısı transferi yüzeyinin küçüklüğüne rağmen yüksek ısı transferi katsayıları nedeniyle oluşan ani sıcaklık dalgalanmaları hızlı bir şekilde sönümlenir.

c. Büyük kapasiteli sistemler için uygundur.

d. Kimyasal reaksiyon hızı yüksek olduğu için küçük reaktör hacmi gerektirir.

e. Yatak sıcaklığının 750-950 °C arasında tutulması nedeniyle yatakta yüksek sıcaklığa dayanıklı malzeme kullanımı gerektirmez. Ayrıca bu sıcaklık aralığı külün ergimesiyle ortaya çıkan sorunları da elimine etmektedir.

f. Aynı sıcaklık aralığı sayesinde alkali tuzlar buharlaşır. Bu nedenle korozyon nispeten daha azdır ve NO<sub>x</sub> oluşumu azdır. Böylece çevre kirliliğine katkı da daha az olmaktadır.

g. Reaktöre katkı maddesi ilâvesi ile (kireç, kireçtaşı, dolomit v.b.) SO<sub>2</sub>'nin tutulması mümkün olmaktadır.

h. İyi bir karışma olduğu için sistem kararlı davranır.

i. Düşük kaliteli ve farklı özellikteki yakıtlar yakılabilir. Kömürlerin ön işleme tabi tutulmasına gerek yoktur.

j. Yüksek ısı kapasitesi nedeniyle dolaşımli akışkan yatak çok uygun bir ısı depolama özelliğine sahiptir.

k. Akışkan yataktan çıkan katı artıklar bazı endüstrilerde ve inşaat sektöründe kullanılabilir.

Dolaşımli akışkan yatak yakma uygulamasının yukarıda sözü edilen üstünlükleri nedeni ile kül, nem, kükürt oranı yüksek linyitlerin uygun biçimde yakılması mümkün olmaktadır. Akışkan yatakta yakma teknolojisi henüz gelişme halinde olup, çözüm bekleyen bazı sorunları bulunmaktadır.

### 2.1.2. Akışkan Yatakların Dezavantajları

Oluşturduğu yüksek ısı transferi katsayıları, çeşitli fiziksel ve kimyasal işlemlerdeki üstünlükleri nedeni ile son otuz yılda büyük gelişmeler gösteren akışkan yatak, tasarım ve işletme ile ilgili bazı teknik sorunlara çözüm beklemektedir. Dezavantaj oluşturan bu sorunlar şöyle özetlenebilir:

a. Habbecikler yüzünden geri karışma ve oluşan vuru sorunu gaz akım profilinin tanımlanmasını güçleştirmektedir.

b. Tüm yatak boyunca meydana gelen basınç düşüşündeki artış, işletme masraflarının artmasına yol açmaktadır.

c. Aşınma mukavemeti düşük yatak malzemelerinde, şiddetli karışım nedeniyle tanecikler ufalanmakta, toz biçiminde gaz tarafından taşınarak yatak dışına kaçmaktadır. Bu durumda bir kayıp söz konusu olduğundan yatak takviye edilmelidir.

d. Katı taneciklerin çarpmasıyla ısı eşanjörü borularında ve yatak kanallarında büyük boyutlarda aşınmalar oluşmaktadır.

e. Yüksek sıcaklıkta tanelerin sinterleşerek yapışması reaksiyon hızının düşmesine neden olmaktadır.

### 2.2. Akışkanlaşma Süreci ve Aşamaları

İçi ince katı taneciklerle dolu, tabanında geçirgen bir levha (dağıtıcı elek) bulunan silindirik veya dikdörtgen kesitli bir yatak altından basınçlandırılmış bir akışkan (sıvı ya da gaz) geçirildiğinde düşük akış hızlarında hava molekülleri tanecikler arasındaki boşluklardan süzülerek geçerler. Ancak katı taneciklerde herhangi bir hareketlenme olmaz. Bu yatağa "Sabit Yatak (fixed bed)" adı verilir.

Şekil (2.1) de görüleceği gibi basınç düşüşü lineer bir artış gösterir ve hız arttıkça kaptaki boş hacim oranı artar yani, yatak yükselir, tanecikler yavaş yavaş titreşmeye başlar. Bu durumdaki yatak "Genleşmiş Yatak (expanded bed)" olarak adlandırılır.

Akışkan hızı daha da fazla olursa aşağıdan yukarı doğru akan akışkan içerisindeki katı tanecikler asılı olarak hareket etmeye başlar. Basınç düşüşü yatağın birim kesit başına olan ağırlığına eşit olur. Yani, tanecik ile akışkan arasındaki sürükleme kuvveti tanecik ağırlığına yaklaşık olarak eşittir. Bu duruma "Minimum Akışkanlaşma" denir. Akışkanın bu hızdan sonraki hızlarında, taneciklerin bir süspansiyon şeklinde hareket etmeleri olayına ise "Akışkanlaşma Olayı" denir. Böyle bir yatak "Akışkan Yatak (Fluidized Bed)" adını alır (6).

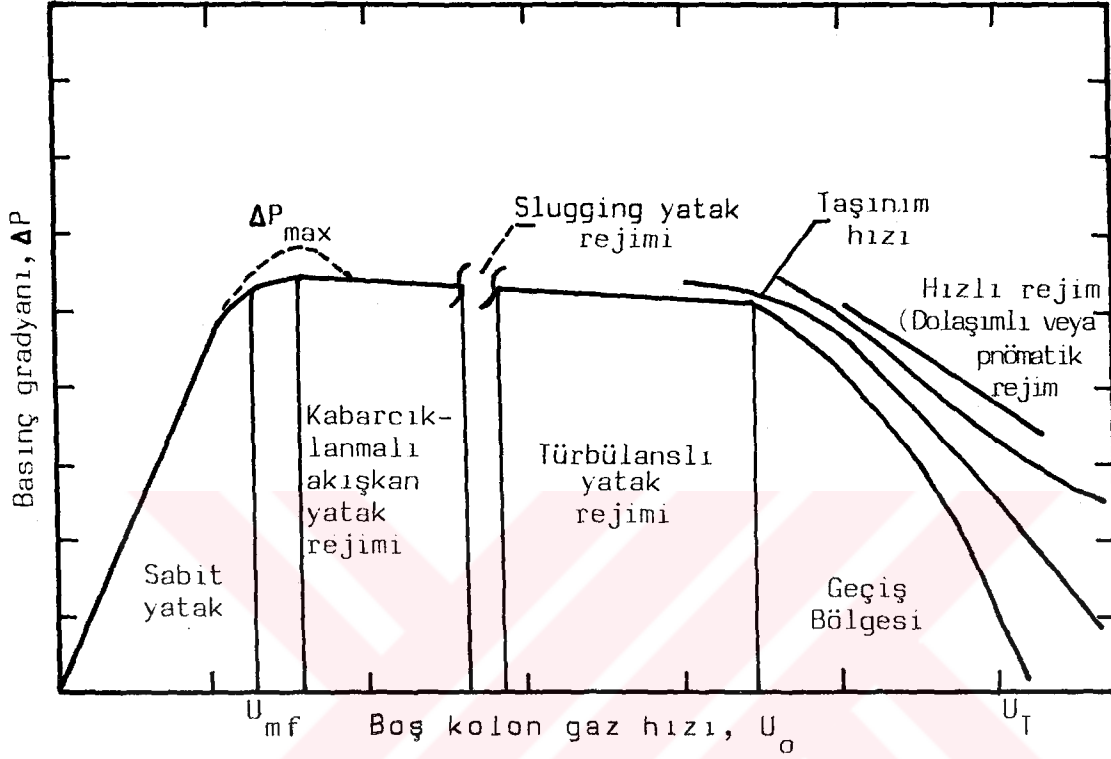
#### 2.2.1. Akışkanlaşma Rejimleri

Minimum akışkanlaşma noktasından sonra akışkan hızının artmasıyla meydana gelen olaylar akışkanlaşma aşamalarını oluşturur. Bu olaylar değişik akışkan hız aralıklarında birbirlerinden ayrılabilir ve karakteristik özellikler gösterirler. Yatağın karakteristik özellik gösterdiği her bir akışkan hız aralığı "Akışkanlaşma Rejimi" olarak adlandırılır (Şekil 2.1).

Kullanılan akışkan sıvı ise minimum akışkanlaşma sonrası hız arttıkça genellikle yatak düzgün olarak genişler. Normal şartlarda habbeleşme ve heterojenlik görülmez ve kararlı bir durum söz konusudur. Sonuçta düzgün bir akışkanlaşma meydana gelir (20). Bu tip yataklara "sıvı-akışkan yatak" denir.

Akışkanlaştırıcı olarak gaz kullanılırsa genellikle daha değişik davranışlar gözlenir. Akışkan hızı minimum akışkanlaşma hızının üzerine çıkarsa gaz habbeleşir ve kanallaşır. Daha yüksek akış hızlarında ise dalgalanmalar şiddetli olur ve tanecik hareketi şiddet-

lenir. Bununla beraber yatak minimum akışkanlaştırma hacminin üzerine pek çıkmaz. Bu tip yataklara "habbelerli yatak ya da gaz-akışkan yatak (bubbling fluidized bed, gas fluidized bed)" denir.



Şekil 2.1. Boş kolon akış hızına karşı basınç gradyanı eğrisi üzerinde akışkanlaşma rejim bölgelerinin şematik gösterimi.

Yerushalmi ve Cankurt (20) yaptıkları çalışmalar sonunda, akışkanlaşma rejimlerini kayma (slip) hızlarıyla grafiksel olarak göstermişler ve rejimleri aşağıdaki şekilde tanımlamışlardır:

- Kabarcıklanmalı akışkan yatak rejimi; minimum akışkanlaşma hızından sonra bir geçiş bölgesini takiben basınç dalgalanmalarının başladığı hız noktasına kadar olan bölge olarak tanımlanır.

- Geçiş bölgesi ( slugging yatak) rejimi iki hızla açıklanır; basınç dalgalanmasının başladığı hız ile dalgalanmanın sönmeye başladığı hız arası olarak tanımlanır.

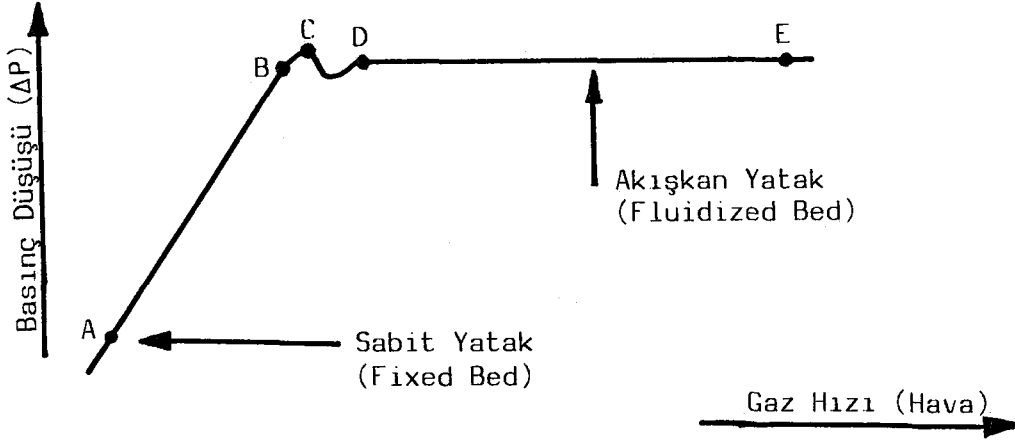
- Türbülanslı akışkan yatak rejimi; basınç dalgalanmasının sön-  
düğü hız sınırından başlar ve terminal hızın altında bir nokta olan  
basınç düşüşünün hızla azalmaya başladığı taşınım hızı noktasına ka-  
dar devam eder. Bu rejimde kabarcıklar minimuma düşer ve türbü-  
lanslar oluşur.

Taşınım hızı ve hızlı rejime geçiş; türbülanslı rejimin bitişin-  
den sonra terminal hıza kadar olan aralıkta tanecikler hızla boşalma-  
ya başlar, kayma hızı artar ve yatakta katı konsantrasyonu azalır.  
Taneciklerin boşalmaya başladığı nokta "Taşınım Hızı" olarak adlandı-  
rılır. Eğer taşınım hızından sonra yatağa katı beslemesi yapılmaya  
başlanırsa hızlı akışkan yatak rejimine geçilir. Bu rejimde katılar  
sisteme doğru sirküle ettirilerek yatak yoğunluğu arttırıldığında do-  
laşımli akışkan yatak rejimi oluşturulur. Daha yüksek hızlarda ise  
yatak yoğunluğu daha da azalacağından pnömatik (havalı) taşıma reji-  
mine geçilir.

Avidan ve Yerushelmi (21) tarafından yapılan bir çalışmada akış-  
kanlaşma rejimleri, yüzeysel hızlara karşı yatak genişlemesi eğri-  
leri çizilerek daha kesin sınırlarla belirlenmiştir. Eğri eğimlerinin  
rejimler arasında belirgin olarak değiştiğini gözlemişlerdir.

### 2.3. Karakteristik Akışkanlaşma Eğrisi

Akışkanlaşma öncesi ve sonrasında; basınç düşüşü değişimi ile  
hız arasındaki ilişki karakteristik bir eğri ile ifade edilmektedir  
(22). Bu eğriye göre gaz hızı arttırıldıkça basınç düşüşü de artmak-  
tadır. Bu artış ile akışkan yatağa geçildiğinde küçük bir salınımı  
takiben basınç düşüşü sabitleşir.



Şekil 2.2. Karakteristik Akışkanlaşma Eğrisi (10)

- A- Sabit yatak
- (A-B)- Genleşmiş yatak
- C- Kritik Nokta
- D- Minimum Akışkanlaşma Noktası
- (D-E)- Akışkan yatak.

Akışkanlaşma süreci, (A-E) arasında gerçekleşmektedir. Sabit yatak, sisteme fan ile hava verildiğinde dağıtıcı elek üzerindeki bölge olup eğride A noktası ile başlangıcı ifade edilmiştir. (A-B) bölgesi boyunca tanecikler genleşmiş yatak konumu durumundadır. Basınç düşüşü gaz hızının doğrudan bir fonksiyonudur. B noktasında parçacıklar bir miktar hareket serbestisi kazanır ve gaz akımı içinde bir miktar geri bırakılmış olurlar (yani havada asılı kalırlar).

Hız arttırıldıkça kritik noktaya ulaşılır ki bu nokta C konumudur. Buradan sonra hız artışına karşılık bir miktar  $\Delta P$  düşüşü görülür. Bunu takiben taneciklerde bir hareketlenme ve biraz sonra da türbülans ile karışma başlar. Nihayet D noktasında minimum akışkanlaşma gerçekleşir ve bu noktadan itibaren de akışkan yatak bölgesine geçilir (D-E bölgesi). Burada D noktasındaki hız minimum akışkanlaşma hızıdır. Daha sonra E noktasından itibaren tanecikler sistem içinde dolaşmaya başlar. Böylece dolaşımli akışkan yatak konumu söz konusu olur (Circulating Fluidized Bed). Karakteristik eğri sadece sabit, genleşmiş ve akışkan yatak konumlarını en genel şekilde göster-

mektedir.

Dağıtıcı elekten başlayarak dolaşımli akışkanlaşma sürecinde tanecikler ayrışma siklonu üzerinden geçerek tekrar dağıtıcı elek bölgesine geri beslenmekte ve dolaşım tamamlanmaktadır. Bu bölgeye beslenen taneciklerle yeniden dolaşımli akışkanlaşma süreci tekrarlanmaktadır.

(D-E) bölgesinde yatak malzemesinin ağırlığı (yer çekimi kuvveti) basınç düşüşü ile kompanse edildiğinden yatak kararsız bir duruma itilmekte, türbülanslı bir akışkanlaşma süreci oluşumu için uygun bir ortam sağlanmaktadır. Bu süreç içerisinde başlıca aşağıdaki akışkanlaşma türleri gözlenebilmektedir.

- Sabit ve Genleşmiş Yatak (dağıtıcı elek üzerindeki durum),
- İki fazlı akışkanlaşma (katı-gaz karışımı),
- Yoğun fazlı akışkanlaşma (katı taneciklerin yoğunlaşması),
- Havayla taşıma (dolaşıma geçişin havayla sağlanması).

Düşük hızlarda sabit yatak içinde, yatağa doğru gaz geçişi ancak basınç düşüşüne neden olur. Katı parçacıklar tamamen karıştırılmamıştır. Gaz hızının daha fazla artışı yatakta önemsiz bir genişlemeye neden olur ve parçacıklar hareketlerinde biraz serbestlik kazanır.

Belirli bir akış mertebesinde, basınç düşüşü yatağın birim alanına karşılık gelen katı ağırlığına yaklaşık eşit olmakta ve tanecikler gaz akışı içinde bir süre geri bırakılmaktadırlar.

#### 2.4. Minimum Akışkanlaşma Teorisi

Akışkanlaşmanın başlayabilmesi için yukarıya doğru hareket eden gazın uyguladığı sürükleme kuvvetinin, yatakta bulunan taneciklerin

ağırlığına eşit olması gerekir (6). Dolayısıyla;

$$\begin{bmatrix} \text{Yatak boyunca} \\ \text{olan} \\ \text{basınç düşüşü} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{Yatak} \\ \text{kesit} \\ \text{alanı} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Yatak} \\ \text{hacmi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{Katıların} \\ \text{konsantrasyonu} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{Katıların} \\ \text{özgül} \\ \text{ağırlığı} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

biçiminde kuvvet dengesi yazılabilir. Bu dengenin matematiksel tanımı;

$$\Delta P_B A_t = W = (A_t H_{mf})(1-\epsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (2.2)$$

biçiminde ifade edilebilir. Burada;

$\Delta P_B$	Yatak boyunca olan basınç düşüşü, $\text{kg/m}^2$
$A_t$	Yatak kesit alanı, $\text{m}^2$
$H_{mf}$	Minimum akışkanlaştırma halinde yatak yüksekliği, m
$\rho_g$	Gazın yoğunluğu, $\text{kg/m}^3$
$\rho_p$	Parçacık yoğunluğu, $\text{kg/m}^3$
$g$	Standart yerçekimi ivmesi, $\text{m/s}^2$
$g_c$	Yerel yerçekimi ivmesi, $\text{m/s}^2$
$W$	Taneciklerin ağırlığı, kg
$\epsilon_{mf}$	Minimum akışkanlaştırma halinde yatak boş hacim oranı veya boşluk faktörünü göstermektedir

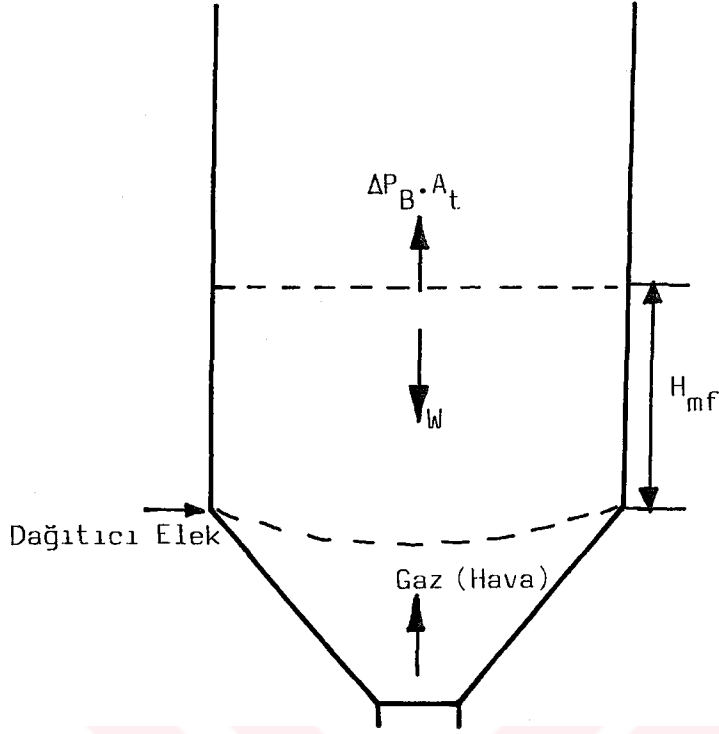
Bu denklemin ifade ettiği fiziksel duruma "Minimum Akışkanlaştırma Noktası" denir.

Minimum akışkanlaşma durumu ve yatak üzerine uygulanan kuvvetler Şekil 2.3'de gösterilmiştir.

Denklem (2.2) yeniden düzenlenerek aşağıdaki bağıntı

$$\frac{\Delta P_B}{H_{mf}} = (1-\epsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (2.3)$$

elde edilir. Aynı boyuttaki katı taneciklerin bulunduğu bir akışkan yatakta olan basınç düşüşü, Ergun denklemi ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Enerji denklemi).



Şekil 2.3. Dağıtıcı elek üzerinde akışkanlaşma hali

$$\frac{\Delta P}{L_f} g_c = 150 \frac{(1-\epsilon_f)^2}{\epsilon_f^3} \frac{\mu u}{(\phi_s d_p)^2} + 1,75 \frac{1-\epsilon_f}{\epsilon_f} \frac{\rho_g u^2}{\phi_s d_p} \quad (2.4)$$

Burada  $\phi_s$  küresellik olup taneciğe eş hacimdeki kürenin dış yüzeyinin tanecik yüzeyine oranı olarak tanımlanır.

Denklem (2.4) de;

$L_f$  Genleşmiş yatak yüksekliği, m

$\epsilon_f$  Genleşmiş yatak halinde boşluk oranı, boyutsuz

$\mu$  Akışkanın dinamik viskozitesi, kg/m.s

$u$  Akışkan hızı, m/s

$d_p$  Tanecik çapı, m' yi göstermektedir.

Denklem (2.4) viskoz ve kinetik enerji kayıplarını içermektedir. Düşük  $Re$  değerlerinde ( $Re_p < 20$ ) yalnız viskoz kayıplar önemli olduğu için yukarıdaki eşitlik aşağıdaki biçime indirgenir.

$$\frac{\Delta P}{L_f} g_c = 150 \frac{(1-\epsilon_f)^2}{\epsilon_f^3} \frac{\mu u}{(\phi_s d_p)^2}, \quad Re_p < 20 \quad (2.5)$$

Yüksek Reynolds sayılarında ( $Re_p > 1000$ ) ise yalnız kinetik enerji kayıplarını göz önüne almak yeterli olmaktadır.

$$\frac{\Delta P}{L_f} g_c = 1,75 \frac{(1-\epsilon_f)}{\epsilon_f^3} \frac{\rho_g u^2}{\phi_s d_p}, \quad Re_p > 1000 \quad (2.6)$$

Denklem (2.3) ve (2.4) ün minimum akışkanlaştırma durumunun özelliğine dayanarak birleştirilmesiyle kuadratik bir eşitlik elde edilir.

$$\frac{1,75}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_p (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2.7)$$

Burada belirlenen Denklem (2.7) minimum akışkanlaşma teorisinin sonucu olarak görülebilir ve minimum akışkanlaşmayı en genel biçimde tanımlamaktadır. Bu denklemdeki temel parametre minimum akışkanlaşma hızı ( $U_{mf}$ ) dir.

### 2.5. Minimum Akışkanlaşma Hızı

Minimum akışkanlaşma hızı, katı taneciklerin akışkanlaşmaya başladıkları noktadaki hızdır. Bu hızdan itibaren akışkan yatağa geçilmektedir. Minimum akışkanlaşma hızı Archimedes ve Reynolds sayılarına bağlı olarak iki biçimde ifade edilmektedir (6).

Küçük ve büyük tanecikler için minimum akışkanlaşma hızı ayrı ayrı verilebilir.

Küçük tanecikler için :

$$U_{mf} = \frac{\phi_s d_p}{150} \frac{\rho_p - \rho_g}{\mu} g \left( \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \right), \quad Re_p < 20 \quad (2.8)$$

büyük tanecikler için ise;

$$U_{mf}^2 = \frac{\phi_s d_p}{1,75} \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_p} g \epsilon_{mf}^3, \quad Re_p > 1000 \quad (2.9)$$

biçimini alır.

Denklem (2.7) de minimum yatak kolon boşluk oranı  $\epsilon_{mf}$  ve biçim faktörü  $\phi_s$  değerleri bilinmediği takdirde  $\phi_s$ 'ın 0,136-1,0 arası ve  $\epsilon_{mf}$ 'in 0,385-0,935 arasında değiştiği durumlarda  $\epsilon_{mf}$  ile  $\phi_s$  arasındaki ilişki için Wen ve Yu (11), tarafından aşağıdaki iki bağıntı verilmiştir.

$$\frac{1}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} = 14 \quad \text{ve} \quad \frac{1 - \epsilon_{mf}}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} = 11$$

Minimum akışkanlaşma durumundaki Reynolds sayısı

$$Re_{mf} = [(33,7)^2 + 0,0408 Ar]^{1/2} - 33,7$$

Archimedes sayısı

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2.10)$$

göz önüne alınırsa böylelikle denklem (2.7) den minimum akışkanlaşma hızı  $U_{mf}$  için aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$U_{mf} = \frac{-1650 \left( \frac{d_p \rho_g}{\mu} \right) + \sqrt{[1650 \left( \frac{d_p \rho_g}{\mu} \right)]^2 - 4(24,5) \left( \frac{d_p \rho_g}{\mu} \right) Ar}}{2[24,5 \left( \frac{d_p \rho_g}{\mu} \right)]} \quad (2.11)$$

Minimum akışkanlaşma hızının belirlenmesinde en çok kullanılan ve en iyi sonuç veren bağıntı Ergun tarafından geliştirilmiştir.

Reynolds sayılarının tümü için Ergun denklemi aşağıdaki biçimi alır

(6).

$$\frac{U_{mf} d_p \rho_g}{\mu} = \left[ (33,7)^2 + 0,0408 \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/2} - 33,7 \quad (2.12)$$

$U_{mf}$ 'in hesabı için Frantz (22), Wen ve Yu (23) ve Leva (4) tarafından bir çok alternatif yöntemler verilmiştir. Ancak en geçerli olanı yine Denklem (2.14) de verilen biçimdir.

## 2.6. Akışkan Yatakta Tanecik Terminal Hızı

Gaz hızı minimum akışkanlaşma hızının üzerinde arttırıldığında yatakta akışkanlaşma başlar. Akışkanlaşmış bir yatakta katı taneciklerin tamamının taşınmaya başladığı hız sınırı veya Şekil 2.1'de görüldüğü gibi basınç düşüşünün sıfıra yaklaştığı sınırdaki akışkanlaşma hızı "Terminal Hız" olarak adlandırılmaktadır. Dolayısıyla tanecik dolaşıma doğru yönelir. Bu yüzden terminal hız taneciklerin dolaşıma başlayacakları andaki son hızlarıdır (24). Hızlı rejime geçiş sınırını belirlemede bu hızın hesaplanması gerekir. Çünkü düşük hız rejiminde çalışan sistemlerde çalışma hızı, terminal hız ile minimum akışkanlaşma hızı sınırları arasında seçilirken, hızlı rejimde çalışma hızı terminal hızın üzerinde seçilir (20).

Akışkanlaştırma gazının sürüklenme kuvveti taneciklerin ağırlığından fazla olduğu kriteri kullanılarak partiküllerin terminal hızı Kunii ve Levenspeil (6) tarafından aşağıda verilen denklemler yardımıyla hesaplanmaktadır. Burada terminal hız ( $U_T$ ):

$$U_T = \left[ \frac{4gd_p(\rho_p - \rho_g)}{3\rho_g C_D} \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

biçiminde verilmektedir.

Denklem (2.15)de verilen sürüklenme katsayısı ( $C_D$ ) deneysel olarak belirlenir.  $C_D$ 'nin grafiksel olarak belirlenmesinde aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır:

$$(C_D Re_p)^2 = \frac{4gd_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g)}{3\mu^2} \quad (2.14)$$

Denklem (2.16) verdiği  $(C_D Re_p)^2$  terimi için  $Re_p$  grafiğinden  $\phi_s$  parametresi kullanılarak  $Re_p$  belirlenir: Şekil (E 1.3-a).

$$Re_p = \frac{d_p U_T \rho_g}{\mu} \quad (2.15)$$

Denklem (2.17) ve (2.16) den yararlanılarak Denklem (2.15) den terminal hız  $U_T$  hesaplanır.

Küresel olmayan taneciklerin hız hesabı için Wen ve Hashinger (25) tarafından aşağıdaki bağıntı verilmiştir.

$$(U_T)_{\text{küresel}} = \frac{0,153 g^{0,71} d_p^{1,14} (\rho_p - \rho_g)^{0,71}}{\rho_g^{0,29} \mu^{0,43}} \quad (2.16)$$

$$(U_T)_{\text{küresel olmayan}} = 0,843 \log\left(\frac{\phi_s}{0,065}\right) (U_T)_{\text{küresel}} \quad (2.17)$$

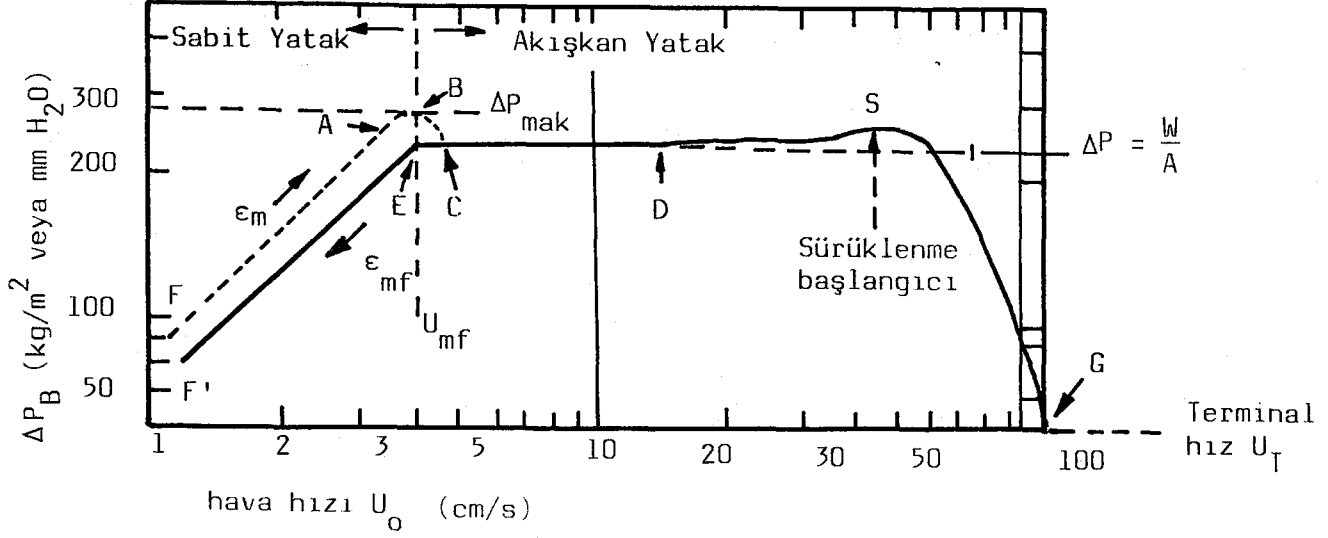
Ayrıca Kunii ve Levenspiel (6) çalışmaları sonucunda  $C_D$  ve  $Re_p$ '-ye bağlı olarak aşağıdaki terminal hız eşitliğini vermiştir.

$$C_D = \frac{10}{Re_p^{1/2}} \quad \text{için } U_T = \left[ \frac{4}{225} \frac{(\rho_p - \rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad (2.18)$$

## 2.7. Akışkan Yatakta Basınç Aşamaları

Yaklaşık aynı boyuttaki küçük taneciklerden oluşan ve ideal bir davranış gösteren bir akışkan yatakta, tüm yatak boyunca ölçülen basınç düşüşü ( $\Delta P$  kaybı) gaz akış hızına bağlı olarak logaritmik biçimde gösterilirse Şekil (2.4)'deki gibi karakteristik bir eğri elde edilir. (26). Bu eğride akışkanlaşma davranışının tanımlanmasında etkili olan önemli noktalara tekabül eden basınç düşüşü ve

hava hızları da verilmiştir.



Şekil 2.4. Belirli bir büyüklükteki kum tanecikleri için basınç düşüşü ile gaz hızı ilişkisi

- |                          |                              |
|--------------------------|------------------------------|
| F'-A - Sabit yatak       | B-C - Akışkan yatak          |
| F-A - Genleşmiş yatak    | D-S - Sürüklenme başlangıcı  |
| B - Minimum akışkanlaşma | S-G - Dolaşımli akışkanlaşma |

Şekil (2.4)'de F noktasından A noktasına kadar olan doğru parçası, sabit yatakta genleşme olgusunu gösterir. Hız biraz artırılıncaya, basınç düşüşü B ile gösterilen maksimum bir noktaya gelir, sonra yavaşça düşer ve akışkanın hızında artma olduğu halde kararlı bir basınç düşüşü değerine ulaşır (CD). Eğer gaz akış hızı azaltılırsa katı parçacıkları birbirine üstüne yerleşene kadar alçalır.

Gaz akış hızı daha fazla azaltılırsa, yeniden oluşan sabit yatakta basınç düşüşü daha önce aynı gaz akış hızında elde edilenden daha az olur (EF'). B noktasındaki hıza Minimum Akışkanlaştırma Hızı denir ( $U_{mf}$ ). D noktasındaki gaz akış hızı çok daha fazla artırılırsa basınç düşüşü biraz yükselir ve S noktasından sonra yatak içindeki tanecikler sürüklenmeye başlar. Bu durumda kararlılığın sağ-

lanabilmesi için geri besleme yapılması gerekir. G noktasında oluşan hıza Terminal Hız denir.

Tipik bir akışkanlaşma için Şekil (2.1) ve (2.4)'de gaz akış hızına karşı yatakta basınç düşüşü eğrisi gösterilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi basınç düşüşü minimum akışkanlaşma noktasında bir maksimumdan geçtikten sonra kabarcıklanmalı ve türbülanslı yatak rejimleri boyunca yaklaşık sabit kalır. Taşınım hızı sınırından sonra düşüş gösterir. Kabarcıklanmalı yatak rejiminden türbülanslı rejime geçişte ise basınç salınımları ve yığışım (slugging) olayları gözlemlenebilir.

Basınç düşmesinin bir maksimumdan geçmesinin nedeni, Leva (4) tarafından yatakta tanecikler arasındaki sürtünmeyi yenmek ve taneciklerin birbirlerinden ayrılmasını sağlamak için harcanan enerji olarak belirtilmiştir. Diğer taraftan Reboux (6) ise bu olayın yatakta genişleme esnasında taneciklerin ivmelenmesi nedeniyle oluştuğunu açıklamıştır. Eğer yüksek akışkanlaşma hızından başlanarak gaz hızının düşürülmesiyle basınç gradyanı eğrisi oluşturulursa eğeride maksimumdan geçme olayı gözlenemez. Bu yolla minimum akışkanlaşma hızı deneysel olarak belirlenebilir.

Basınç salınımlarının ise yatağın üst ve orta noktalarında oluşan kabarcıklanmalar ve dağıtıcı elek tasarımına bağlı olarak eleğin hemen üzerindeki jet akışkanlarının bileşik etkileriyle oluştuğu Fan ve arkadaşları (27) tarafından verilmiştir.

Akışkan yataklarda istenmeyen olaylardan biri de "Kanallaşma" olayıdır. Bu olay ya çok düşük gaz hızlarında yada çok yüksek gaz hızlarında meydana gelir. Kanallaşma olayının olup olmadığını anlamak için ölçülen basınç düşüşüne bakılır, eğer çok küçük ise kanal-

laşma mevcuttur. Ayrıca, kanallaşma olayının taneciklerin şekline, boyutuna ve dağıtıcı elek tipine bağlı olduğu Leva (4) tarafından belirtilmiştir.

## 2.8. Minimum Yatak Yüksekliği ve Yatak Genişlemesi

Akışkan yatakta, minimum yatak yüksekliği, minimum akışkanlaşma hızındaki yatak genişlemesi olarak tanımlanmıştır. Literatürde minimum yatak yüksekliği hesabı için iki yaklaşım bulunmaktadır. Pyle ve Harrison (28) tarafından önerilen yaklaşımlarda genişlemiş yatak yüksekliğinin bilinmesi durumunda kabarcıklanmalı bir akışkan yatakta kabarcıkların maksimum hızına bağlı olarak minimum yatak yüksekliğini aşağıda verilen ifade ile hesaplanmıştır. Burada genişlemiş yatağın yüksekliği  $H$ 'nin minimum akışkan yatak yüksekliği  $H_{mf}$ 'e oranı;

$$\frac{H}{H_{mf}} = 1 - \frac{U_f - U_{mf}}{K(U_f - U_{mf}) + U_{bo}} \quad (2.19)$$

biçiminde verilmektedir.

Denklem (2.21) de  $U_{bo} = 0,35 (gD_t)^{1/2}$  biçiminde hesaplanmakta ve  $K$  deneysel verilere dayanarak 1,2 olarak alınmaktadır.

Diğer bir yaklaşımda, minimum yatak yüksekliği Thonglimp ve arkadaşları (29) tarafından yatak içerisine konan yatak malzemesinin miktarı, minimum akışkanlaşma noktasındaki yatak ağırlığına eşitlenerek aşağıda verilen bağıntı uyarınca hesaplanmaktadır.

$$H_{mf} = \frac{4M}{(1 - \epsilon_{mf}) \pi D_t^2 \rho_p} \quad (2.20)$$

Yatak genişlemesi mekanizması kesin olarak bilinmemektedir. Bununla beraber yatak genişlemesi, minimum akışkanlaşma hızı civarındaki düşük hızlı akışkanlaşma rejimlerinde yatak içerisinde taneciklerin

tamamen asılı kaldığı ve gaz hızının artışıyla taşınım hızı sınırında taşınmaya başlama noktaları arasındaki yatak yüksekliği olarak da tanımlanabilir. Hızlı akışkanlaşma rejimlerinde, henüz çok yeni olan bir kaç araştırmada bu sınır kesin olarak verilememesine karşın boşluk oranının  $\epsilon=0,8-0,95$  aralığında olduğu belirtilmiştir. Bu boşluk oranı hızlı akışkanlaşan taneciklerin taşınmaya başladıkları durumdaki boşluk oranıdır.

İnce taneciklerin kullanıldığı bir akışkan yatak rejimi için iki faz teorisiyle verilen aşağıdaki Richardson-Zaki (30) eşitliği do-  
laşımli akışkan yataklar içinde bazı düzeltmeler yapılarak kullanılabilmiştir.

$$\frac{U_0}{U_T} = \epsilon^n \quad (2.21)$$

Burada  $n$ , tanecik-yatak çapı oranının ve tanecik Reynolds sayısının bir fonksiyonudur.  $n$  üssü iri tanecikler için 2,39 ve ince tanecikler için 4,65 alınabilir.

Literatürde, yatak genişlemesi üzerine yapılan çalışmaların çoğunda partiküler yataklar için ampirik olsa bile Denklem (2.22)'nin yatak genişlemesinin önceden belirlenmesinde oldukça doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir (4).

İki faz teorisi kullanılarak düşük hız rejimli yataklarda yatak genişlemesi, Matsen ve arkadaşları (31) tarafından bir bağıntı ile aşağıda verilmiştir.

$$\frac{H}{H_{mf}} = \frac{U_0 - U_{mf}}{0,35(gD_t)^{1/2}} \quad (2.22)$$

Hsiung ve Thodos (32) yaptıkları bir deneysel çalışmada iki faz teorisini kullanarak verilen Eşitlik (2.23)'ü aşağı verildiği gibi

ifade etmiştir.

$$\epsilon = \epsilon_{mf} \left( \frac{R_e^{-k'}}{Re_{mf}^{-k'}} \right)^n \quad (2.23)$$

Burada  $k'=0,216 Re_{mf}^{1,20} - 0,35$  ve  $n=0,28$  olarak verilmiştir.

Partiküler akışkanlaşma şartlarında çalışan bir akışkan yatakta Thonglimp ve arkadaşları (29) yatak genişlemesini incelemişlerdir. Değişik minimum yatak yükseklikleri kullanılarak, 50-194 mm. arasında değişen yatak çaplarında yürütülen deneyler sonucunda iki faz teorisini aşağıda verilen ampirik ifadeyle göstermişlerdir:

$$\epsilon = 1,57 Re^{0,29} Ga^{-0,19} \quad (2.24)$$

Yüksek akışkanlaşma rejimlerinde Denklem (2.23) de terminal hız terimi yerine "efektif" bir terminal hızı kullanılması gerektiği deneysel olarak Avidan ve Yerushalmi (21) tarafından gösterilmiştir. Yüksek hız rejiminde gerçek yatak genişlemesi tahmini için Eşitlik (2.24) de yatak çapının iki katının alınması gerektiği önerilerek eşitlik aşağıdaki gibi düzenlenmiştir.

$$\frac{H}{H_{mf}} = 1 + \frac{U_o - U_{mf}}{0,35(2g D_t)^{1/2}} \quad (2.25)$$

Aynı araştırmada hız artışı ile iki faz teorisinde önemli sapmaların olduğu da gösterilmiştir.

## 2.9. Taşınım Serbest Bırakma Yüksekliği (TDH)

Genişlemiş bir yatakta oluşan kabarcıkların patlaması sonucunda tanecikler yatak içerisinde belli bir yükselme gösterir ve geri çekilirler. Böylece taneciklerin gaz akımıyla yatak yüksekliği boyunca sürüklenme kapasitesi yavaş yavaş azalır ve bir noktadan sonra yatak içerisine çekilmeye başlar. Taneciklerin geri çekilmeye

başladığı nokta akışkan yatakta taşınım serbest bırakma yüksekliği (Transport Disengaging Height, TDH) olarak adlandırılmıştır.

Taşınım serbest bırakma yüksekliği, siklon giriş seviyesine kadar olan yükseklik olarak da tanımlanabilir. Bu konuda literatürde geniş bilgiye rastlanmamıştır. Bir araştırmada Zenz ve Weil (33), 2 inç ile 16 ft. arasında değişik çaplı yataklarda FCC katalizörleri kullanarak belirledikleri TDH değerlerini yüzeysel gaz hızının fonksiyonu olarak ifade etmişlerdir.

#### 2.10. Minimum Akışkan Boşluğu

Bir akışkan yatağın en temel özelliklerinden biri de yatak içindeki taneciklerin hareket halinde olmasıdır. Tanecik hareketinden önce akışkanlaştırma akışı tarafından temin edilmek üzere genişlemiş olması gereken yatakta, karakteristik bir boşluk vardır. (Yani fan ile havayı sisteme verince, parçacıklar harekete geçmeden önce bir hava artışı ile yatak genişler ve boşluk oluşur). Bu boşluk, akışkanlaşmanın başlangıcı yada minimum akışkanlaşma için gerekli olan "minimum akışkan boşluğu" olarak ifade edilmiştir.  $\epsilon_{mf}$  ile gösterilmektedir.  $\epsilon_{mf}$ 'in akışkanlaşma öncesinde bilinmesi gerekir.

Üçütlü (taneli) bir katının minimum akışkan boşluğu, henüz başlayan parçacık hareketi ile uyuşan  $L_{mf}$  yatak yüksekliği ve yükselen gaz akımına maruz kalan yatak tarafından kolaylıkla tayin edilmektedir. Katılar ve akışkanın yoğunlukları, kanal geçiş kesiti  $A_t$  ve yatak yüzdürücü ağırlığı ( $W$ ) bilinmek üzere; minimum akışkan boşluğu şu ifadeden hesaplanabilir (4):

$$\epsilon_{mf} = 1 - \frac{W}{L_{mf} A (\rho_p - \rho_g) g} \quad (2.26)$$

Burada  $L_{mf}$ 'in katıların harekete başladığı noktadaki yatak yüksekliği oluşu çok önemli bir husustur. Yatak yüzdürücü ağırlığı ise;

$$W = \Delta P A_t \quad (2.27)$$

olarak tanımlanmaktadır. Minimum akışkan boşluğu gözlemleri katı-gaz sistemlerde en iyi şekilde yapılabilir.  $\epsilon_{mf}$  literatürde 0,40-0,94 civarında verilmektedir (6).

### BÖLÜM 3

#### DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAK DAVRANIŞININ İNCELENMESİNE YÖNELİK TEST DÜZENİNİN KURULMASI

##### 3.1. Sistemin Yapısı

Akışkanlaşmanın soğuk analizi için tasarlanan akışkan yataklı yakma sistemi test düzeni, akışkanlaşma olayının ve dolaşımın gözlenebilmesi ve izlenebilmesi amacına yönelik olarak kurulması nedeniyle şeffaf pleksiglas malzemedan imal edilmiştir. Malzeme kalınlığı 5 mm'dir. Bu şekilde ölü noktaların ve tıkanma olan yerlerin belirlenebileceği düşünülmüştür.

Sistem kurulurken ısııl güç laboratuvarındaki dolaşimli akışkan yatak yakma sisteminin akışkanlaşma davranışının doğrudan incelenebilmesine olanak sağlaması amacıyla yatak ile siklonun boyutları ve geometrisi mevcut yakma sistemininki ile aynı alınmıştır (2). Buna göre akışkan yatağın oluşturulduğu yatak kolonu 0,125 m çapında ve 1,80 m yüksekliğinde silindirik bir yapıya sahip olup, bunun altına dağıtıcı eleğın yerleştirildiği 0,15 m yüksekliğinde bir akışkan yatak konisi ilave edilmiştir. Aradaki dağıtıcı elek ise yine 0,125 m çapındadır ve malzemeye göre tasarımı yapılmıştır. Eleğın delik çapı ise başlangıçta 1 mm alınmış (34), daha sonra 2 mm'ye çıkarılması gerekmiştir.

Akışkan yatak kolonunun yan tarafında flanşlı bir boruyla geçilen siklon yer almaktadır. Siklon tasarımı akışkan yatak kolonuna uygun olacak biçimde yapılmıştır (35). Taneciklerin dolaşım sonucu

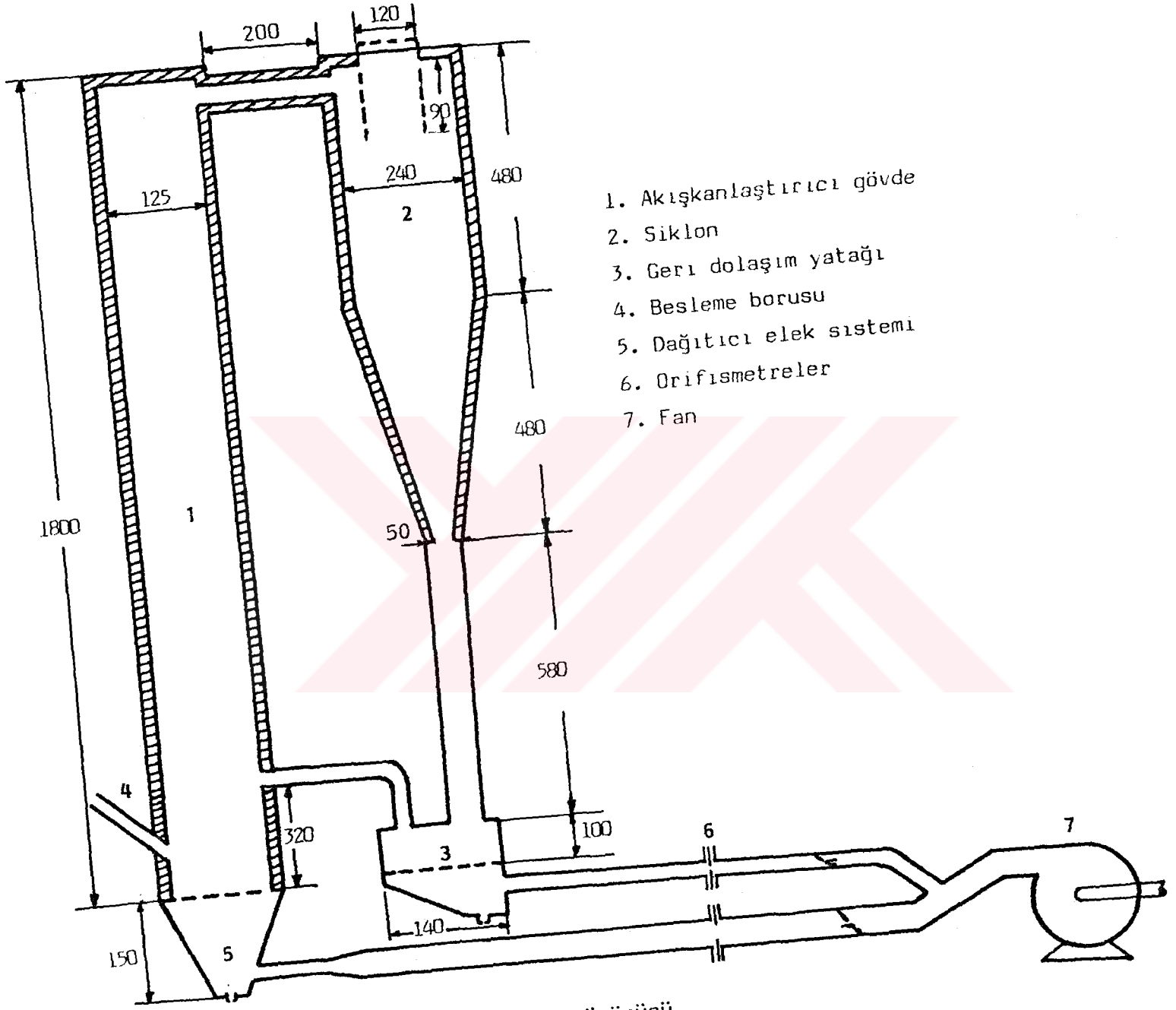
tekrar yatak bölgesine dönüşünü sağlamak ve siklon altındaki daralma nedeniyle tıkanmaları önlemek amacıyla dikdörtgensel yapıya sahip, elekli bir geri dolaşım yatağı konulması uygun görülmüştür. Gereğinde fan yardımı ile destek havası (dolaşım havası) verilerek dolaşımın uygun yönde tıkanmalar olmadan sağlanması amaçlanmıştır. Test düzeninin sistem şeması Şekil (3.1) de fotoğrafları ise Şekil (3.2) ve (3.3) de verilmiştir.

### 3.2. Kurulan Sistemin Çalışma Prensibi ve Sistem Parametreleri

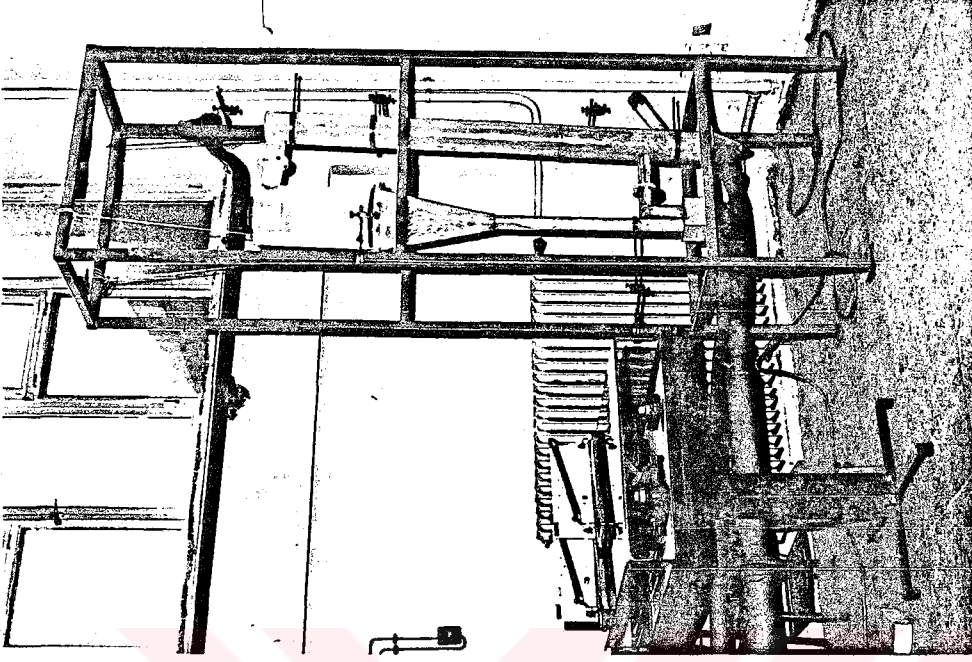
Kurulmuş olan test düzeninde, sisteme fan ile hava gönderilerek değişik tane büyüklüklerine sahip katı taneciklerin, dinamik davranışlarının incelenmesi amaçlanmaktadır. Sistemde (katı-gaz) biçiminde iki fazlı akış söz konusudur. Burada akışkan, sisteme alttan verilen hava (yani gaz) dır. Katı ise tanecikler halinde sisteme elle beslenen yatak malzemesidir.

Bu çalışmada temel sistem parametreleri; minimum akışkanlaşma hızı, terminal hız ve basınç değişimidir. Deneylerde sisteme verilen havanın hızı ayarlanarak gittikçe artırılması ve bu hızlara karşılık gelen basınç değişimlerinin ölçülmesi amaçlanmaktadır. Böylece karakteristik hız-basınç değişimi eğrisi belirlenecektir. Daha önceki bölümde açıklandığı gibi; hızların artışı sonucu, sabit yaktan, genleşmiş yatağa ve daha sonra da akışkan yatağa geçiş izlenecektir. Burada özellikle akışkan yatağa geçişteki hız üzerinde durulacak ve minimum akışkanlaşma hızı belirlenecektir. Akışkanlaşma davranışını belirleyen en önemli sistem parametresi minimum akışkanlaşma hızı olup akışkanlaşmanın başlangıcını ifade etmektedir. (36).

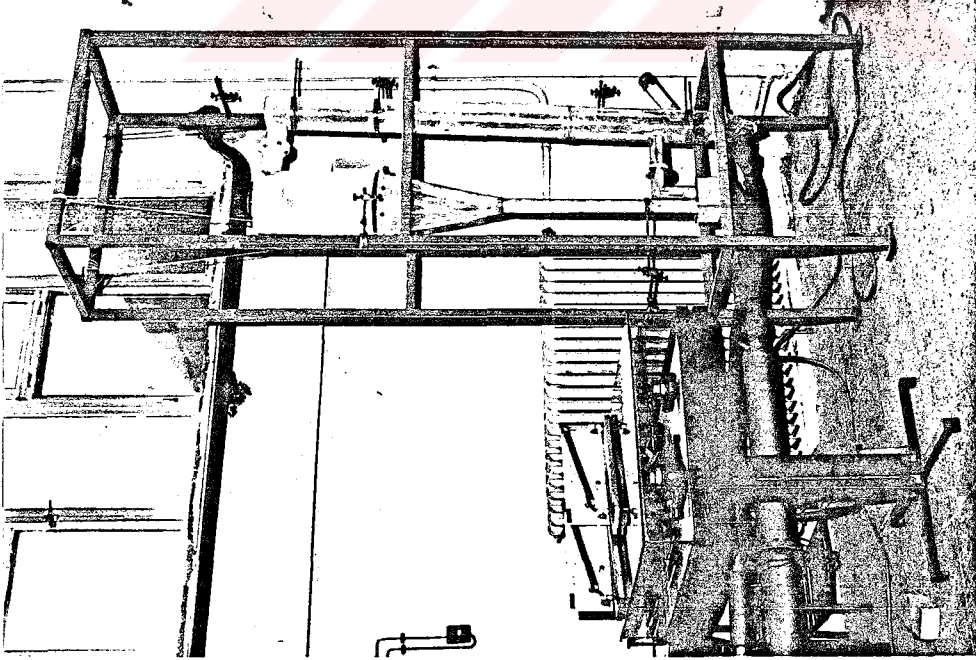
Hız daha da artırıldıkça tanecikler arasında türbülans yoluyla



Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik görünüşü



Şekil 3.3. Test düzeninin akışkanlaşma ve dolaşımın görünüşü



Şekil 3.2. Test düzeninin genel görünüşü

hızlı akışkanlaşma oluşur (Fast Fluidization). Burada bir terminal hız söz konusudur. Bu noktadan itibaren dolaşım başlar (Circulating Bed). Terminal hız hızlı-akışkan yataktan dolaşımli akışkan yatağa geçiş noktasındaki hız olması nedeniyle önem taşır.

Deneyleler oda sıcaklığında yapılacağından sisteme herhangi bir sıcaklık etkisi söz konusu değildir. Çalışmada ayrıca yatak boşluk oranı ve minimum yatak yüksekliği de belirlenecektir.

### 3.3. Akışkan Yatak İçin Dağıtıcı Eleğin Boyutlandırılması

Akışkan yatak sistemlerinin temel elemanlarından biri olan dağıtıcı elek, akışkanlaştırma için gerekli akışkanın (gaz veya sıvı) düzgün bir biçimde sisteme girmesini ve yatak malzemesinin akışkanlaştırılmasını sağlar. Bu önemli işlevinden dolayı iyi bir akışkanlaşma için, dağıtıcı eleğin tipinin ve özelliklerinin iyi belirlenmesi, boyutlandırılmasının uygun biçimde yapılması gerekir.

Dağıtıcı elek boyutlandırması, eleğin yatak içerisinde üniform bir gaz dağılımı sağlaması, kanallaşma olayına meydan vermemesi, düşük bir basınç düşüşü göstermesi, yatak ağırlığını çekmesi, deformasyona karşı dayanıklı bir malzemeden seçilmiş olması, termal genleşmelere mukavemet göstermesi, elek altına tanecik geçirmemesi ve tıkanmadan uzun süre çalıştırılabilmesi gibi özellik yönünden uygun biçimde yapılmalıdır (6,36).

Endüstriyel ve kimyasal proses uygulamalarında değişik tiplerde dağıtıcı elekler kullanılmaktadır. Akışkan yataklarda kullanılanların bazıları, delikli levha tipi, dolgulu yatak tipi, mazgal tipi delikli levha, nozul tipi ve jet tipi eleklerdir. Bu tiplerin birbirlerine göre çeşitli avantaj ve dezavantajları vardır. Çoğunlukla yapımı, kullanımı, ekonomikliği ve düşük basınç düşmesi göstermeleri

nedeniyle delikli levha tipi dağıtıcı elekler tercih edilmektedir (6).

Dağıtıcı eleğin boyutlandırılması için bulunması gereken önemli parametrelerden biri olan elektteki basınç düşüşü üzerine Agarwal ve arkadaşları (37) tarafından yapılan bir çalışmada, dağıtıcı elek boyunca olan basınç düşüşünün yataktakinin % 10'u kadar olduğu veya yaklaşık 35 cm H<sub>2</sub>O sütunu dolayında bulunduğu belirtilmiş ve bu aşağıdaki biçimde ifade edilmiştir (6). Burada verilen  $\Delta P_{\min}$ 'nin ifadedeki üç değerden hangisine eşit olduğuna bakılarak tasarım yapılır.

$$\Delta P_{d \min} = \text{Max}(0,1 \Delta P_B, 35 \text{ cm H}_2\text{O}, 100 \Delta P) \quad (3.1)$$

Hibby (38) delikli veya nozul tipi dağıtıcı elek basınç düşüşü oranının;

$$\frac{U}{U_{mf}} \sim 1-2 \quad \text{ise} \quad \frac{\Delta P_d}{\Delta P_B} = 0,15 \quad (3.2)$$

$$\frac{U}{U_{mf}} \gg 1 \quad \text{ise} \quad \frac{\Delta P_d}{\Delta P_B} = 0,015 \quad (3.3)$$

olduğunu ortaya koymuştur. Quereshi-Creasy (40) ise yatışkın bir akışkan yatak için basınç oranını aşağıdaki biçimde vermiştir.

$$\frac{\Delta P_d}{\Delta P_B} \geq 0.01 + 0,2 [1 - \exp(-0,5 Dt/H_{mf})] \quad (3.4)$$

Düz delikli bir dağıtıcı elek tasarımı için orifis teorisinden delik sayısını ve delik çapını hesaplamaya yarayan bir hesap yöntemi Kunii ve Levenspeil (6) tarafından verilmiştir. Bu yöntemde, dağıtıcı elekte delik (orifis) hızı, boyutsuz orifis katsayısı  $C'_D$  ve dağıtıcı elektteki basınç düşüşü  $\Delta P_d$ 'ye bağlı olarak Denklem (3.5) ile ifade edilmiştir (Şekil E 2.2).

$$U_{or} = C'_D \left( \frac{2g_c \Delta P_d}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

Boş kolon hızı  $U_o$  dağıtıcı elek delik orifis hızı  $U_{or}$ 'ye bağlı olarak aşağıdaki biçimde ifade edilmektedir.

$$U_o = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 U_{or} N_{or} \quad (3.6)$$

Burada  $d_{or}$  orifis dağıtıcı elek delik çapını,  $N_{or}$  ise delik sayısını göstermektedir.

Yukarıda verilen tasarım yöntemine benzer bir yöntem Richardson (41) tarafından bir nomogramla verilmiştir.

Bu yöntemde gazın genleşme faktörü de göz önüne alınmaktadır.

Bunların yanısıra en uygun tasarım Kunii ve Levenspiel'in verdikleri yöntemdir. Buna göre Kunii ve Levenspiel'in (6) çalışmaları sonucu ileri sürdükleri gibi dağıtıcı elek tasarımında en önemli parametrelerden biri de akışkanın yatağa geçişini sağlayan deliklerin çapıdır. Tasarımda genelde uyulması gereken temel şart; toplam delik alanının eleğin toplam dolu yüzey alanının % 10'unu geçmemesidir (6). Buna göre:

$$\Sigma A_d < 0,10 (\Sigma A) \quad \text{olmalıdır.} \quad (3.7)$$

Delik çapı seçilerek yukarıdaki şartı sağlayan alana tekabül eden delik sayısının belirlenmesi gerekir. Dağıtıcı elek, yataktaki basınç düşüşü ( $\Delta P_B$ ) ve eleğe geçişteki basınç düşüşü ( $\Delta P_d$ ) nün etkisi altındadır. Ayrıca gazın delikten geçiş hızı (yani orifis boyunca gaz hızı  $U_{or}$ ) ve katıların yatak boyunca çalışma hızı (boş kolon hızı,  $U_o$ ) nın da etkisi vardır. Bu nedenle dağıtıcı elek boyutlandırılmasında yukarıda belirtilen elekle ilgili basınç ve hız etkileri de hesaba katılmalı ve buna göre delik çapı ve sayısı belirlenmelidir.

Dağıtıcı elek tasarımında kullanılan denklemler sırasıyla şunlardır :

$$\frac{\Delta P_B}{H_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad \text{Denklem (2.3)}$$

$$\Delta P_d = 0,1 (\Delta P_B) \quad \text{Denklem (3.1)}$$

$$U_{or} = C'_d \left( \frac{2g_c \Delta P_d}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad \text{Denklem (3.5)}$$

$$U_o = \frac{\pi}{4} (d_{or})^2 U_{or} N_{or} \quad \text{Denklem (3.6)}$$

Bu denklemler daha önceki bölümlerde verilmiş denklemlerdir.

Tasarım hesapları için öncelikle dolaşım malzemesi olan katı taneciklerin yoğunluğu hesaplanır. Gaz akışkan hava olduğundan gazın yoğunluğu  $\rho_g = 1,187 \text{ kg/m}^3$  (25 °C oda sıcaklığında) alınacaktır. Minimum akışkan boşluğu  $\epsilon_{mf}$ , bölüm (3) de verilen  $\epsilon_{mf}$  değeri ve  $H_{mf}$  ise besleme yapılan yerin dağıtıcı elekten yüksekliği olarak alınmıştır. Bu değerler kullanılarak Denklem (2.3) den yataktaki basınç düşüşü bulunur ( $\Delta P_B$ ). Bu değer % 10'u dağıtıcı eleğe geçişteki basınç düşüşünü verir ( $\Delta P_d$ ) (Denklem 3.1'e göre). Daha sonra bulunan  $\Delta P_d$ 'nin bu değeri Denklem (3.5) kullanılarak orifis boyunca gaz hızı elde edilir ( $U_{or}$ ).

Dağıtıcı elek için istenilen delik çapı seçilir ve  $U_{or}$  değeri ile birlikte  $U_o$  uygun olarak seçilerek Denklem (3.6) den dağıtıcı elek üzerindeki delik sayısı ( $N_{or}$ ) bulunur. Sonuçta elde edilen toplam delik alanının daha önce belirtilen Denklem (3.7) deki şarta uygunluğu kontrol edilir. Bu şekilde dağıtıcı elek o malzeme için belirlenmiş olur.

## BÖLÜM 4

KURULAN DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAK DENEY SİSTEMİ  
ÜZERİNDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

## 4.1. Akışkan Yatak Bölgeleri ve Gözlemler

Kurulan test düzeni üzerinde sabit yataktan başlayarak sürekli dolaşımli akışkanlaşma sürecine geçene kadar tüm akışkanlaşma bölgeleri ve evrelerinin ayrıntılı olarak gözlenmesi amaçlanmaktadır. Bu bölgelerdeki akışkanlaşma özellikleri literatürde verilen tasarım ve işletme parametrelerini içeren matematiksel denklemler yardımı ile hesaplanıp, hesap sonuçları test düzeninde elde edilen değerlerle karşılaştırılmaya çalışılacaktır.

Deneyde akışkanlaşma sürecinin aşağıdaki bölgelerden oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.1).

- Akışkanlaşma öncesi dağıtıcı elek üzerinde yer alan sabit yatak,
- Genleşme ve akışkan yatak,
- Akışkan yatak kolonunun, taneciklerin taşınmaya başladığı siklona geçiş bölümü,
- Türbülans ve siklon bölgesi,
- Siklondan gelen taneciklerin yatağa dönüşünü sağlayan geri dolaşım yatağı.

Deneyde bu taneciklerin bu noktalardaki dinamik davranışları gözlemlenmiş ve önemli sistem parametrelerini teşkil eden sabit yatak-taki ilk hız, minimum akışkanlaşma hızı ve terminal hızı belirlemek

üzere basınç düşüşleri ölçülmüştür. Bu parametrelerin teorik hesaplanan değerleri eklerde verilmiştir.

Sistemde yatak malzemesi olarak kepek, perlit ve kendir kullanılmıştır. Mevcut fan ile yalnız kepek ve perlit ile dolaşım sağlanabilmiştir. Kepeğin akışkanlaştırılması ile ilgili veriler Tablo 4.1'de verilmiştir. Kendir ve Perlit'e ait veriler ise Tablo (4.5) ile Şekil (4.2) ve (4.3) de verilmiştir.

Tablo 4.1. Yatak malzemesi ve akışkanın karakteristik özellikleri

Yatak malzemesi	: Kepek
Yoğunluğu, $\rho_p$	: 452,16 kg/m <sup>3</sup>
Ortalama çapı, $d_p$	: 0,000645 m
Sistemde kullanılan toplam ağırlığı	: 2 kg (direnç ve yatak malzemesi)
Yatak malzemesi ağırlığı	: 0,580 kg
Akışkan (gaz)	: Hava
Yoğunluğu, $\rho_g$	: 1,187 kg/m <sup>3</sup> (25 °C ve 1 atm.)
Viskozitesi, $\mu$	: 1,83 x 10 <sup>-5</sup> kg/m.s (25 °C ve 1 atm.)

#### 4.2. Orifis Plaka İle Hava Debisinin Belirlenmesi

Akışkanlaşma davranışı fan tarafından gönderilen toplam hava debisi ve bu havanın akışkan yatak ile geri besleme yatağına dağılımına bağlıdır. Bu yüzden akışkanlaşma sürecinin incelenmesi ve en uygun akışkanlaşma koşullarının belirlenmesi için en başta debilerin elde edilmesi gerekmektedir. Hava debileri TS 1423 (42) de verilen denklemler gereğince basınç değişimine bağlı olarak belirlenmiştir. Basınç ölçümleri için akışkan yatak hava besleme kanalı ile geri besleme hava kanalına orifismetreler konulmuştur. Orifis metre hesapları Ek 4'de ve hava debileriyle ilgili denklem ve hesap yöntemi de Ek 1.1'de verilmiştir.

Hava debisinin belirlenmesi için ölçülen basınç değişimleri aynı zamanda akışkanlaşma davranışını tanımlayan hızların belirlenmesinde de kullanılmıştır. Ölçülen basınç değişimlerine karşılık gelen hızlar Ek 4'de verilen kalibrasyon eğrilerinden okunmuştur. Ölçümler sonucu belirlenen tüm değerler, en uygun akışkanlaşmayı sağlayan hava debisine (yani sisteme giren kütleli hava miktarına) bağlı olması nedeniyle deneysel sonuçlar bu bölümde Tablo 4.2 ile verilmiştir. Debi hesabı ise Ek 1.1'de anlatılmıştır.

Tablo 4.2. Yatak Malzemesi Kepek İçin Ölçülen ve Belirlenen Deneysel Sonuçlar

Hava debisi $q_m$ (m <sup>3</sup> /s)	Akış hızı $U_o$ (m/s)	Yataktaki basınç düşüşü $\Delta P$ , mm H <sub>2</sub> O
0,00230	0,187	4
0,00314	0,255	8
0,00337	0,269	10
0,00388	0,315	12
0,00425	0,346	17
0,00491	0,399 ( $U_{mf}$ )	20
0,00510	0,415	18
0,00530	0,431	18
0,00575	0,467	18
0,00609	0,495	18
0,00634	0,515	18
0,00656	0,533	18

Sabit yatak yüksekliği , :  $H_s$  : 0,20 m

Minimum akışkanlaşma yatak yüksekliği , :  $H_{mf}$  : 0,205 m

Minimum akışkanlaşma boşluk oranı , :  $\epsilon_{mf}$  : 0,47 m

Minimum akışkanlaşma konumunda yatak yüksekliği  $H_{mf} = 0,205$  m ölçülmüş ve sabit yatak konumundaki yatak yüksekliği de hesaba katılarak minimum akışkanlaşma boşluk oranı ( $\epsilon_{mf}$ ) değeri 0,47 olarak belirlenmiştir.

#### 4.3. Dolaşımli Akışkan Yatak Sisteminde Akışkanlaşmayı Tanımlayan Etkili Hızların ve Basınç Değişimlerinin Hesaplanması

Kurulan deney düzeninde sistem tasarım ve işletme koşullarına bağlı olan ilgili hızların ve basınç değişimlerinin hesaplanması ve bunların deney düzeninde ölçülen değerlerle karşılaştırılması istenmektedir. Bu bölümde hızlar ve basınç değişimlerinin hesabı ile ilgili denklemler verilmektedir. Hesap sonuçları ise eklerde sunulmuştur.

Akışkanlaşma ile ilgili basınç düşüşü ve hızların uyumluluk yönünden kontrolü için daha önce verilen Denklem (3.2) ve (3.3) kullanılmaktadır.

$$\frac{\Delta P_d}{\Delta P_B} = 0,15 \quad \frac{U}{U_{mf}} \sim 1-2 \quad \text{ise}$$

$$\frac{\Delta P_d}{\Delta P_B} = 0,015 \quad \frac{U}{U_{mf}} \gg 1 \quad \text{ise}$$

Burada  $U_{mf}$  akışkan hale gelen yataktaki minimum akışkanlaşma hızıdır.  $U$  ise deneydeki ortalama çalışma hızıdır. Akışkan yataktaki maksimum hızı belirlemek için ise aşağıda verilen eşitlik kullanılır.

$$U_{\max} = 0,07 (gD_t)^{1/2} + U_{mf} \quad (4.1)$$

#### 4.3.1. Minimum Akışkanlaşma Hızının Hesaplanması

Burada deneyin dayandırılacağı iki teorik temel kullanılacaktır. Bunlardan biri Archimedes sayısına göre belirlenen minimum akışkanlaşma hızı, diğeri de minimum akışkanlaşma teorisi sonucu ulaşılan denklemlerdir.

Ayrıca en iyi sonuç minimum akışkanlaşma hızı ( $U_{mf}$ ) in Ergun denklemi ile karşılaştırılması sonucu elde edilmektedir (6).

Archimedes sayısı ( $Ar$ ) Bölüm 2'de şu şekilde tanımlanmıştır.  
(Denklem 2.12).

$$Ar = d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) / \mu_g^2$$

Buna göre Reynolds sayısı  $Re_{mf}$  ( $U_{mf}$ 'e bağlı)

$$Re_{mf} = \frac{Ar}{150 \left(1 - \frac{\epsilon_{mf}}{3}\right) \frac{\epsilon_{mf}}{\epsilon_{mf}} + \sqrt{\frac{1,75 Ar}{3 \epsilon_{mf}}}} \quad (4.2)$$

Ayrıca

$$Re_T = \frac{Ar}{18 + 0,61 \sqrt{Ar}} \quad (4.3)$$

$$Ar < 1000 \quad , \quad U_{mf} = \frac{\rho_p d_p^2 g}{1400 \mu} \quad (4.4)$$

yazılabilir.

olarak hesaplanabilir ve deney sonucu ile karşılaştırılabilir. Literatürdeki bazı çalışmalarda Archimedes sayısı, Galileo sayısı olarak geçmektedir. Her ikisi de aynı şekilde ifade edilmektedir.

Ayrıca minimum akışkanlaşma teorisi sonucu elde edilen denklemler Bölüm 2'de, Denklem 2.8 ve 2.9 ile verildiği gibi;

$$U_{mf} = \frac{\phi_s d_p}{150} \frac{\rho_p - \rho_g}{\mu} g \left( \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \right), \quad Re_p < 20$$

$$U_{mf} = \frac{\phi_s d_p}{1,75} \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_p} g \epsilon_{mf}^3, \quad Re_p > 1000$$

şeklindedir.

Ergun denklemi daha önce de verildiği gibi (Denklem 2.12)

$$\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} = \left[ (33,7)^2 + 0,0408 \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/2} - 33,7$$

şeklindedir.

Bu denklem genelde tüm parçacıklar için geçerlidir. Bunun yanısıra küçük parçacıklar için;

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_g) g}{1650 \mu}, \quad Re_p < 20 \quad (4.5)$$

büyük parçacıklar için

$$U_{mf} = \frac{d_p (\rho_p - \rho_g) g}{24,5 \rho_g}, \quad Re_p > 1000 \quad (4.6)$$

olarak da kullanılabilir (6).

Bu denklemlerin dışında literatürde yer alan bazı denklemlerden de Ek (1.2) de kontrol için yararlanılmıştır.

#### 4.3.2. Tanecik Terminal Hızının Hesaplanması

Deneyde kullanılan parçacıkların terminal hızı ( $U_T$ ) ölçümünün karşılaştırılması için aşağıdaki denklemler verilmiştir (6).

Genel terminal hız denklemi, Bölüm 2'de Denklem (2.13) ile şu şekildedir.

$$U_T = \left[ \frac{4g d_p (\rho_p - \rho_g)}{3 \rho_g C_d} \right]^{1/2}$$

Ayrıca  $Re_p = \frac{d_p \rho_g U_T}{\mu}$  olmak üzere; terminal hızı için Reynolds sayısına bağlı aşağıdaki denklemler verilmektedir (6).

$$U_T = \frac{g(\rho_p - \rho_g) d_p^2}{18\mu}, \quad , Re_p < 0,4 \text{ için} \quad (4.7)$$

$$U_T = \left[ \frac{4(\rho_p - \rho_g)^2 g^2}{225 \rho_g \mu} \right]^{1/2} d_p, \quad , 0,4 < Re_p < 500 \text{ için} \quad (4.8)$$

$$U_T = \left[ \frac{3,1g(\rho_p - \rho_g) d_p}{\rho_g} \right]^{1/2}, \quad , 500 < Re_p < 200.000 \text{ için} \quad (4.9)$$

veya

$$U_T = \frac{\rho_p d_p g}{18\mu}, \quad , Ar < 300 \quad (4.10)$$

Ayrıca minimum akışkanlaşma hızı ile terminal hız arasında bağlantı kurmak açısından;

İnce tanecikler için : ( $Re_p < 0,4$ )

$$\frac{U_T}{U_{mf}} = 91,6 \quad (4.11)$$

Büyük tanecikler için : ( $Re_p > 1000$ )

$$\frac{U_T}{U_{mf}} = 8,72 \quad (4.12)$$

şeklinde iki denklem kullanılacaktır (Şekil E 1.3 b).

#### 4.3.3. Basınç Düşüşünün Hesaplanması

Daha önce dağıtıcı eleğe geçişteki basınç düşüşü ve yatağa geçişteki basınç düşüşü ölçümlerinin kontrolunun Denklem (3.2) ve Denklem (3.3) ile yapılacağı belirtilmiştir.

Yatak boyunca basınç düşüşü için Reynolds sayısının küçük yada büyük olma durumuna göre yani küçük yada büyük parçacıklara göre basınç ölçümünün kontrolu Bölüm 2'de verilen Denklem (2.3) ile yapılacaktır (6).

$$\frac{\Delta P_B}{H_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_g) \frac{g}{g_y}$$

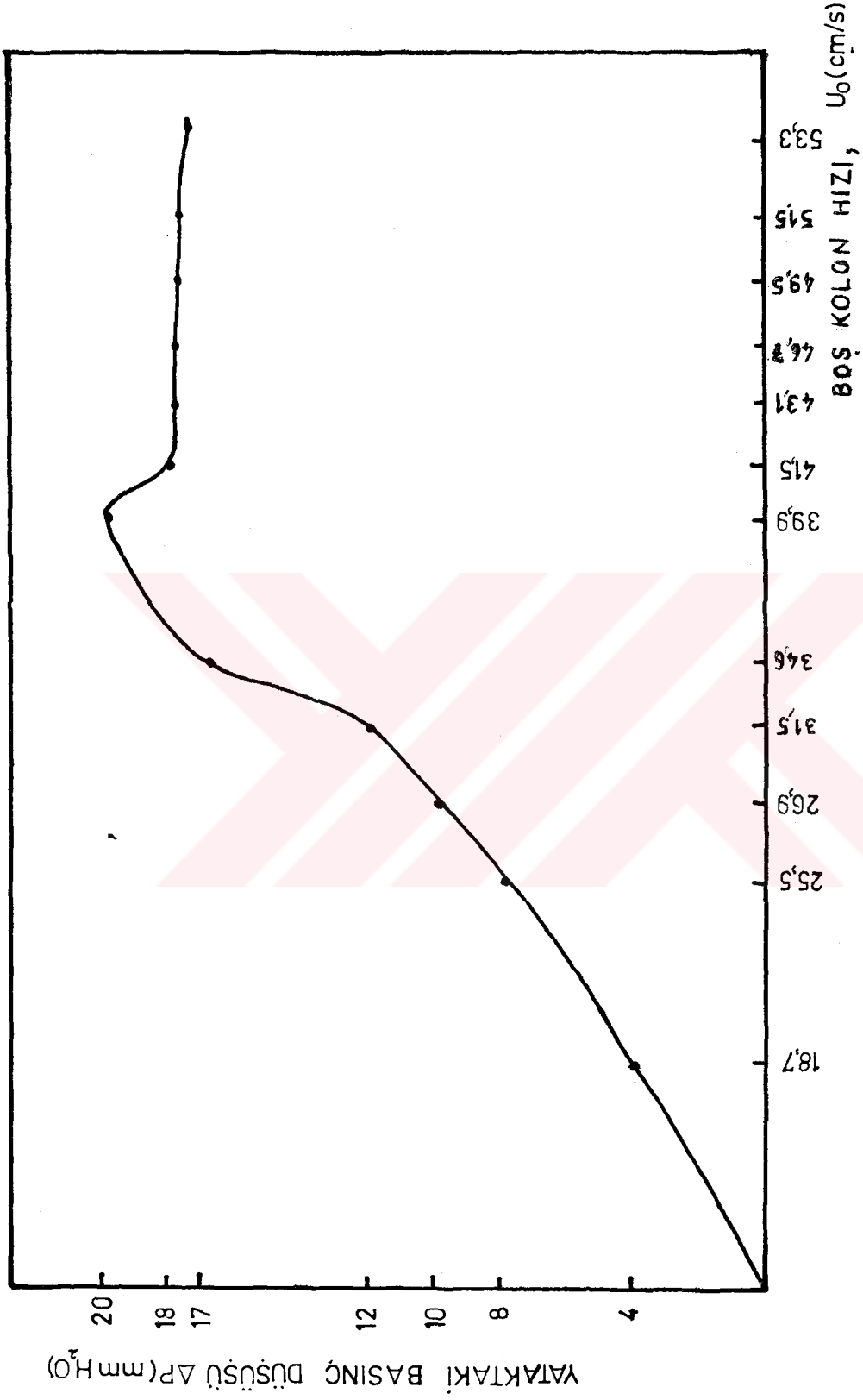
Burada deneyde ölçülen minimum akışkanlaşma yatak yüksekliği ve boşluk oranı kullanılacaktır. Tüm hesap sonuçları Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Sistem parametrelerinin korelasyonla hesaplanan değerleri

Minimum Akışkanlaşma Hızı, $U_{mf}$	:	0,0695 m/s.
Terminal Hız, $U_T$	:	1,522 m/s.
Çalışma Hızı, $U_o$	:	2,5 m/s.
Minimum Akışkan Yatak Yüksekliği, $H_{mf}$	:	0,197 m/s.
Yatakta Basınç Düşüşü, $\Delta P_B$	:	4,2 cm H <sub>2</sub> O
Dağıtıcı Elek Basınç Düşüşü	:	0,42 cm H <sub>2</sub> O
Minimum akışkanlaşma boşluk oranı $\epsilon_{mf}$	:	0,43

Tablo 4.4. Deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması

	Korelasyonla	Deneysel
Minimum akışkanlaşma hızı, $U_{mf}$ (m/s)	0,0695	0,399
Minimum yatak yüksekliği, $H_{mf}$ (m)	0,197	0,205
Minimum boşluk oranı, $\epsilon_{mf}$	0,43	0,47
Terminal hız, $U_T$ (m/s)	1,522	-
Minimum Akışkanlaşma basınç düşüşü $\Delta P$ (cm $H_2O$ )	4,2	2,4
Dağıtıcı elekte basınç düşüşü (cm $H_2O$ )	0,42	0,37
Birincil hava kütleli debisi, $q_{m1}$ ( $m^3/s$ )	-	0,00491
İkincil hava kütleli debisi, $q_{m2}$ ( $m^3/s$ )	-	0,040



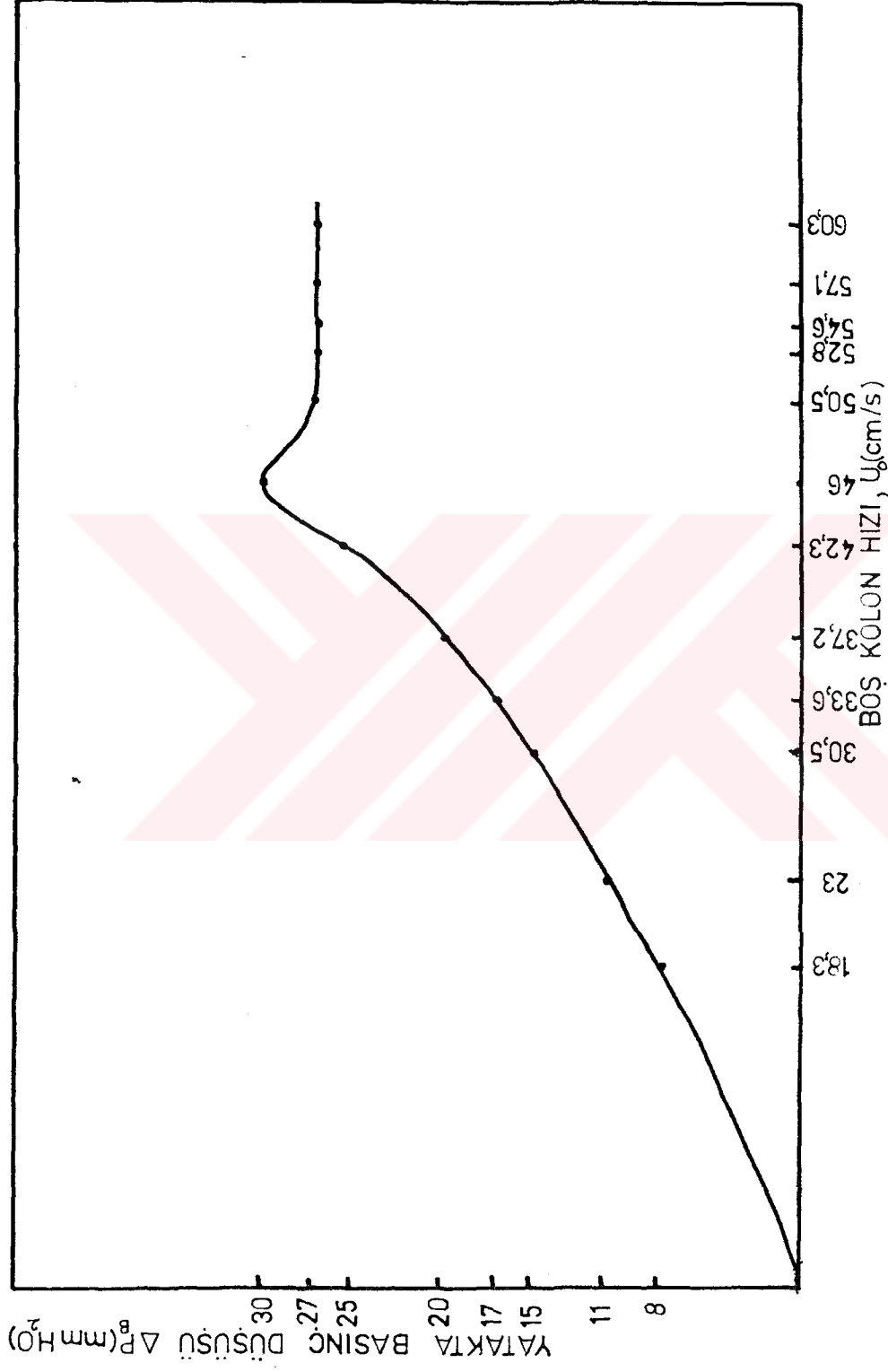
Şekil 4.1. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile oluşturulan karakteristik akışkanlaşma eğrisi (Tablo 4.2'den yararlanılmıştır.)

#### 4.4. Akışkan Yatakta Katı Taneciklerin Taşınım Özelliğinin İncelenmesi

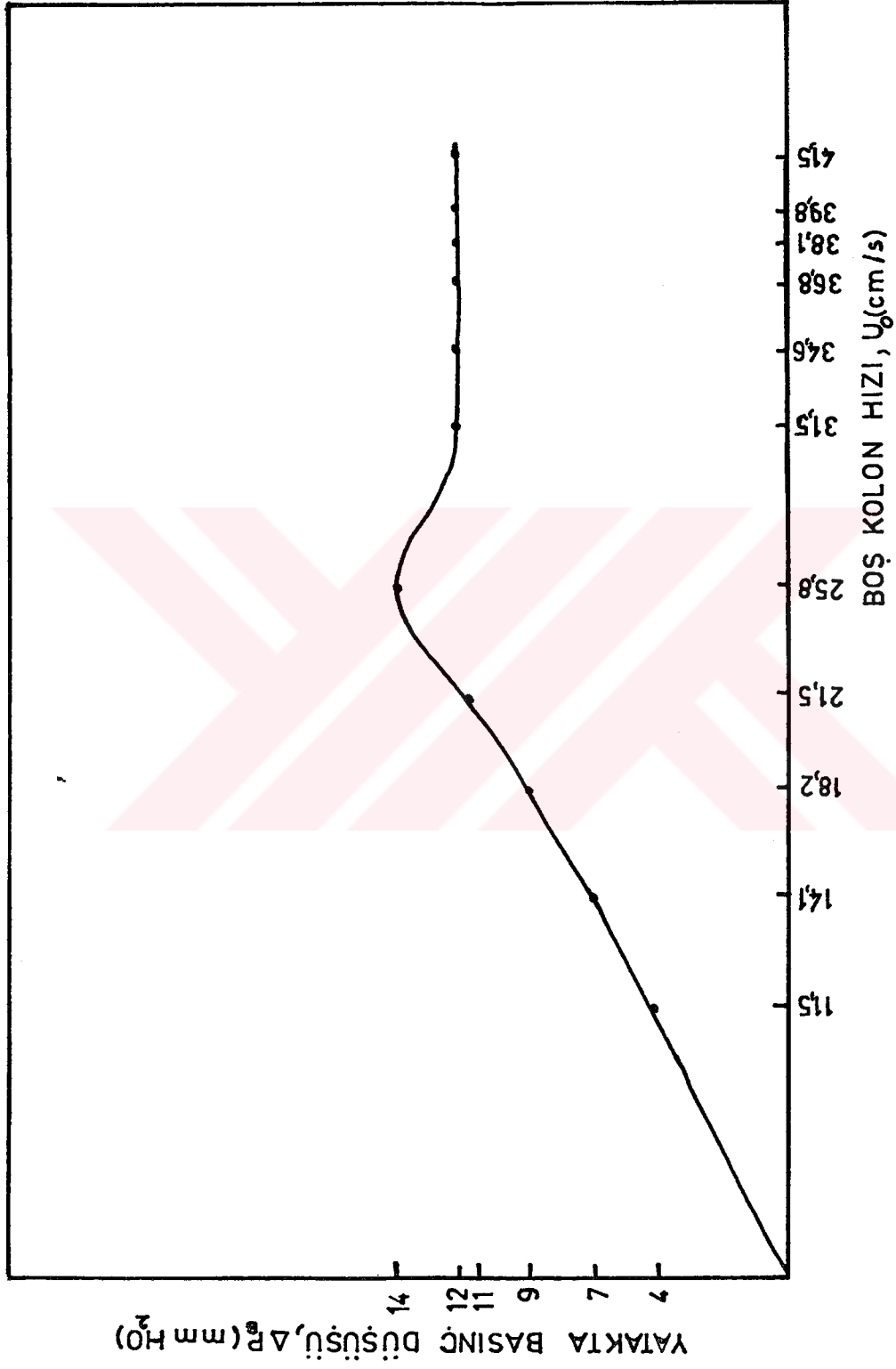
Akışkan yatak kolonunda akışkanlaşma sağlandıktan sonra daha yüksek hızlara ulaşıldıkça katı taneciklerin hava ile yukarı doğru taşınmaya başladıkları görülmektedir. Taşınım deneylerinde yatak malzemesi olarak kendir ve perlit tanecikleri kullanılmıştır. Taşınım öncesinde; kendir ve perlit'e ait akışkanlaşma deney sonuçları Tablo (4.5) de ve elde edilen akışkanlaşma eğrileri ise (Şekil 4.2) ve Şekil (4.3) de verilmiştir.

Tablo 4.5. Kendir ve Perlit İçin Ölçülen ve Belirlenen Deneysel Sonuçlar

Hava debisi $q_m$ ( $m^3/s$ )	KENDİR	
	Akış hızı $U_0$ (m/s)	Yataktaki basınç düşüşü, $\Delta P$ (mm $H_2O$ )
0,00224	0,182	8
0,00283	0,230	11
0,00375	0,305	15
0,00413	0,336	17
0,00458	0,372	20
0,00520	0,423	25
0,00566	0,460	30
0,00617	0,502	27
0,00634	0,515	27
0,00649	0,528	27
0,00671	0,546	27
0,00702	0,571	27
0,00742	0,603	27
Hava debisi $q_3$ ( $m^3/s$ )	PERLİT	
	Akış hızı $U_0$ (m/s)	Yataktaki basınç düşüşü $\Delta P$ , (mm $H_2O$ )
0,00142	0,115	4
0,00174	0,141	7
0,00224	0,182	9
0,00265	0,215	11
0,00317	0,258	12
0,00388	0,315	10
0,00425	0,346	10
0,00447	0,363	10
0,00469	0,381	10
0,00490	0,398	10
0,00511	0,415	10



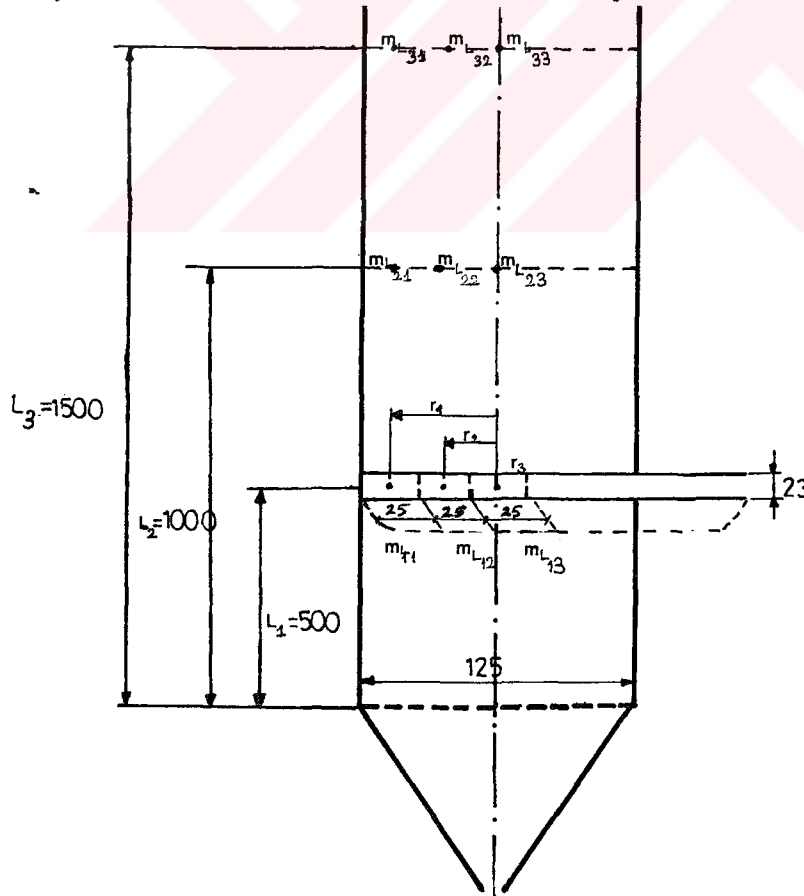
Şekil 4.2. Yatak malzemesi kendir için elde edilen akışkanlaşma eğrisi



Şekil 4.3. Yatak malzemesi perlit için elde edilen akışkanlaşma eğrisi

Bu bölümde yapılan deneylerde akışkan yatak kolonu üzerinde üç ayrı yükseklikte ( $L_1=50$  cm,  $L_2=100$  cm ve  $L_3=150$  cm), yatak yarıçapına ve akış hızına bağlı olarak kendir ve perlit için tanecik taşınım miktarları belirlenmiştir. Akışkan yatak malzemesi ortalama tane büyüklüğü  $d_p$ , elek analizi yöntemi ile kendir için 2,562 mm ve perlit için  $d_p=0,347$  mm olarak belirlenmiştir.

Deneyde belli üç yatak konumlarında yatak taşınım yoğunluklarının belirlenmesine yönelik olarak katı tanecikleri tonlayabilmek amacıyla 2,5 cmx2,3 cm boyutlarında, üç eşit bölmeye sahip bir prob (örnek alma düzeni), her üç yükseklikte de prob Şekil (4.4) de görüldüğü gibi yatak kolonu eksenine dik olarak yerleştirilerek, her defasında başlangıç koşullarında deneye yeniden başlanmıştır. Probun akışkan yatak kolonu üzerindeki konumları Şekil (4.4)'de görülmektedir.



Şekil 4.4. Tanecik taşınımı deneyinde akışkan yatak kolonunun konumu

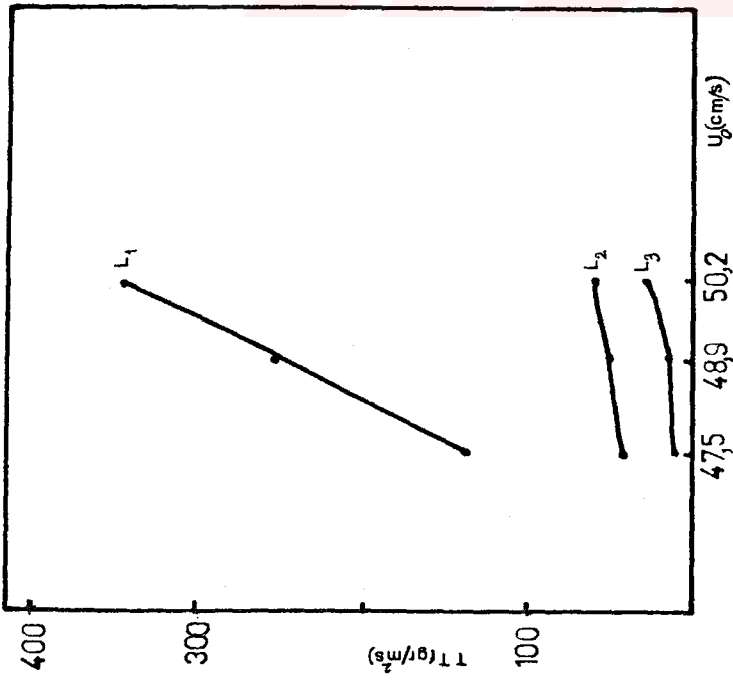
Deney sonuçları Tablo (4.6) ve (4.7) de verilmektedir. Bu tablolarla akışkan yatakta tanecik taşınımının belirlendiği boş kolan hızı  $U_0$  (cm/s) ve ölçüm süreleri  $t$ (s) olarak verilmiştir. Bu sonuçlar, grafiksel biçimde Şekil (4.5)-(4.28) de görülmektedir.

Tablo 4.6. Kendir tanecikleri için taşınım deneyi sonuçları

Yatak yüksekliği	r(cm)	$(U_0)_1=47,5$ cm/s		$(U_0)_2=48,9$ cm/s		$(U_0)_3=50,2$ cm/s		
		t(s)	TT(gr/m <sup>2</sup> s)	t(s)	TT(gr/m <sup>2</sup> s)	t(s)	TT(gr/m <sup>2</sup> s)	
$L_1=50$ cm	1	5	51	88,9	39	122	27	184
	2	2,5	51	96	39	191	27	278
	3	0	51	139	39	250	27	346
$L_2=100$ cm	4	5	186	17,4	157	22,1	119	33
	5	2,5	186	24,6	157	36,8	119	52
	6	0	186	43,0	157	51,7	119	60
$L_3=150$ cm	7	5	390	5,1	314	7,1	207	12
	8	2,5	390	9,8	314	12,6	207	21
	9	0	390	14,3	314	18,7	207	30,5

Tablo 4.7. Perlit tanecikleri için taşınım deneyi sonuçları

Yatak yüksekliği L (cm)	r (cm)	$(U_0)_1=28,1$ cm/s		$(U_0)_2=29,3$ cm/ss		$(U_0)_3=31,5$ cm/s		
		t(s)	TT(gr/m <sup>2</sup> s)	t(s)	TT(gr/m <sup>2</sup> s)	t(s)	TT(gr/m <sup>2</sup> s)	
$L_1=50$ cm	1	5	78	4,45	67	5,50	40	11
	2	2,5	78	10,10	67	12,7	40	23
	3	0	78	16,5	67	20,0	40	35
$L_2=100$ cm	4	5	458	0,57	426	0,66	367	0,9
	5	2,5	458	0,88	426	0,901	367	2,1
	6	0	458	2,57	426	2,92	367	3,7
$L_3=150$ cm	7	5	1583	0,11	1488	0,15	1057	0,26
	8	2,5	1583	0,201	1488	0,47	1057	0,65
	9	0	1583	0,73	1488	0,84	1057	1,2

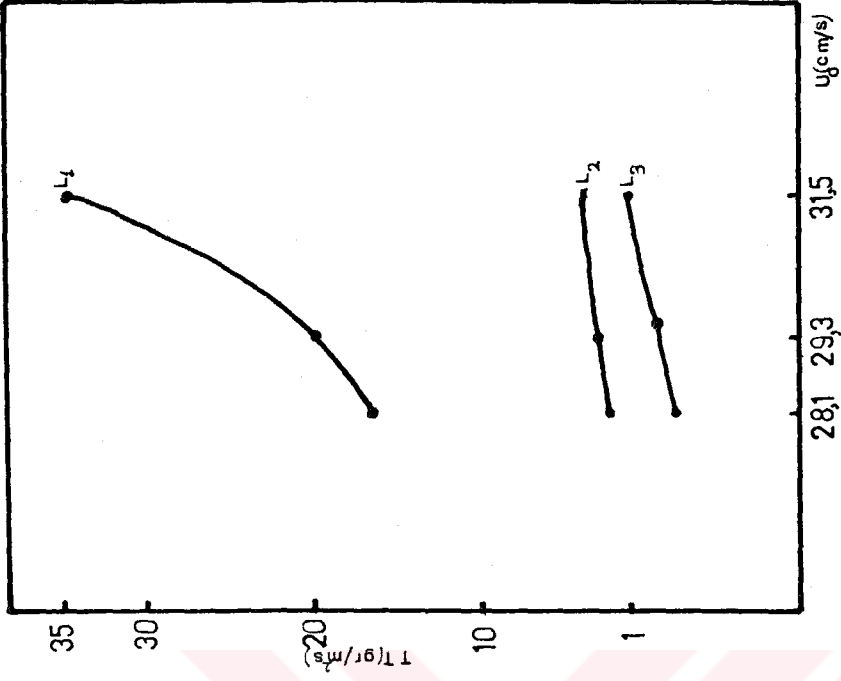


Şekil 4.5. Akışkan yatakta tanecik taşınımının, boş kolon hızı  $U_0$  ve yatak yüksekliği  $L'$ 'ye bağlı olarak  $r_3=0$  daki değişimi (yatak malzemesi kendiri)

$$L_1 = 50 \text{ cm}, \quad (U_0)_1/U_{mf} = 1,033$$

$$L_2 = 100 \text{ cm}, \quad (U_0)_2/U_{mf} = 1,063$$

$$L_3 = 150 \text{ cm}, \quad (U_0)_3/U_{mf} = 1,12$$

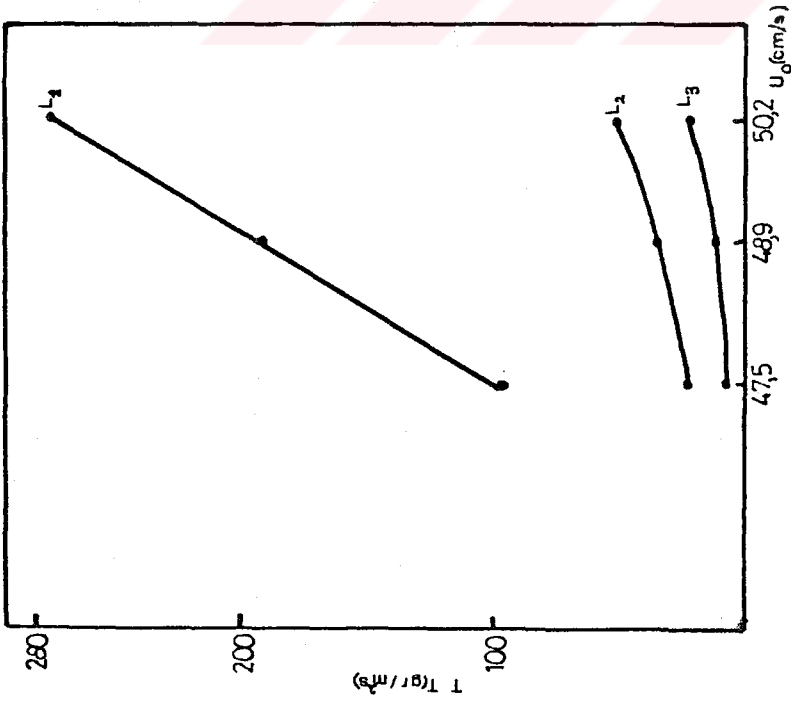


Şekil 4.6. Akışkan yatak tanecik taşınımının, boş kolon hızı  $U_0$  ve yatak yüksekliği  $L'$ 'ye bağlı olarak  $r_3=0$  daki değişimi (yatak malzemesi = perlit)

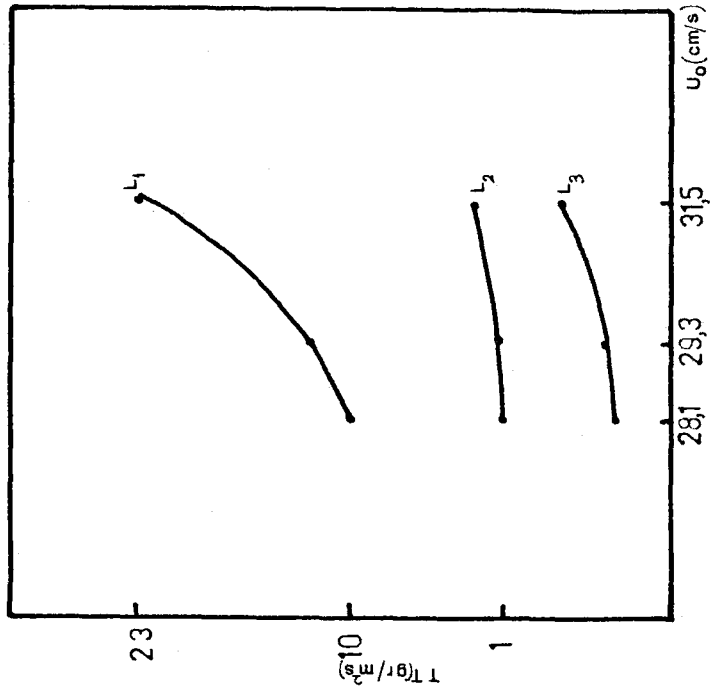
$$L_1 = 50 \text{ cm}, \quad (U_0)_1/U_{mf} = 1,09$$

$$L_2 = 100 \text{ cm}, \quad (U_0)_2/U_{mf} = 1,14$$

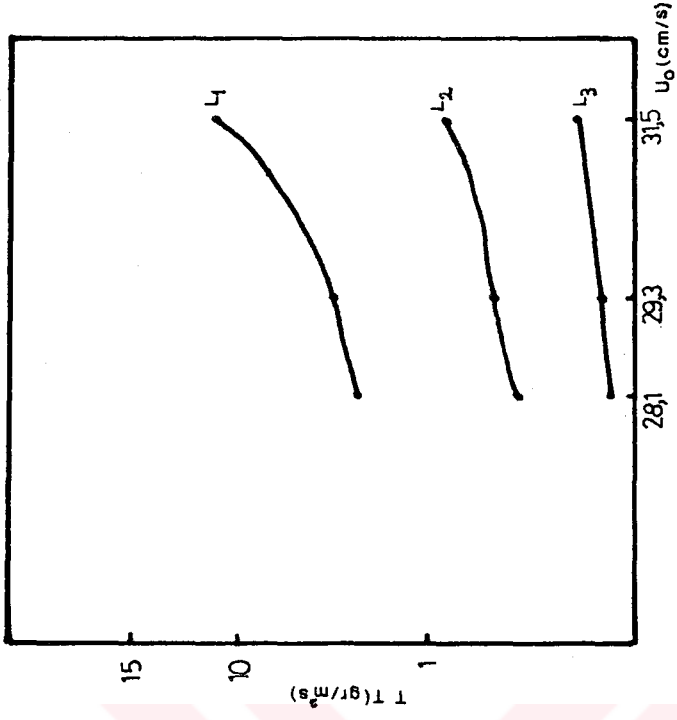
$$L_3 = 150 \text{ cm}, \quad (U_0)_3/U_{mf} = 1,22$$



Şekil 4.7. Akışkan yatak tanecik taşınımının, boş kolon hızı  $U_0$  ve yatak yüksekliği  $L$ 'ye bağlı olarak  $r_2=2,5$  cm deki de, gelişimi (yatak malzemesi kendiri)  
 $L_1 = 50$  cm  $(U_0)_1/U_{mf} = 1,038$   
 $L_2 = 100$  cm  $(U_0)_2/U_{mf} = 1,063$   
 $L_3 = 150$  cm  $(U_0)_3/U_{mf} = 1,1$



Şekil 4.8. Akışkan yatakta tanecik taşınımının, boş kolon hızı  $U_0$  ve yatak yüksekliği  $L$ 'ye bağlı olarak  $r_2=2,5$  cm deki de, gelişimi (yatak malzemesi perlit)  
 $L_1 = 50$  cm  $(U_0)_1/U_{mf} = 1,09$   
 $L_2 = 100$  cm  $(U_0)_2/U_{mf} = 1,14$   
 $L_3 = 150$  cm  $(U_0)_3/U_{mf} = 1,22$

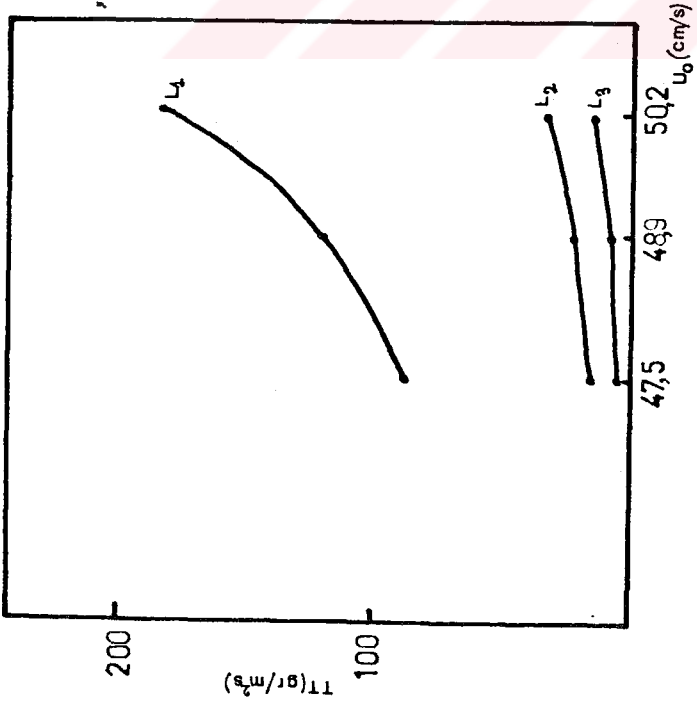


Şekil 4.9. Akışkan yatakta tanecik taşınımının, boş kolon hızı  $U_0$  ve yatak yüksekliği  $L'$ 'ye bağlı olarak  $r_1 = 5$  cm deki değişimi (yatak malzemesi kendiri)

$$L_1 = 50 \text{ cm} \quad (U_0)_1 / U_{mf} = 1,083$$

$$L_2 = 100 \text{ cm} \quad (U_0)_2 / U_{mf} = 1,063$$

$$L_3 = 150 \text{ cm} \quad (U_0)_3 / U_{mf} = 1,1$$

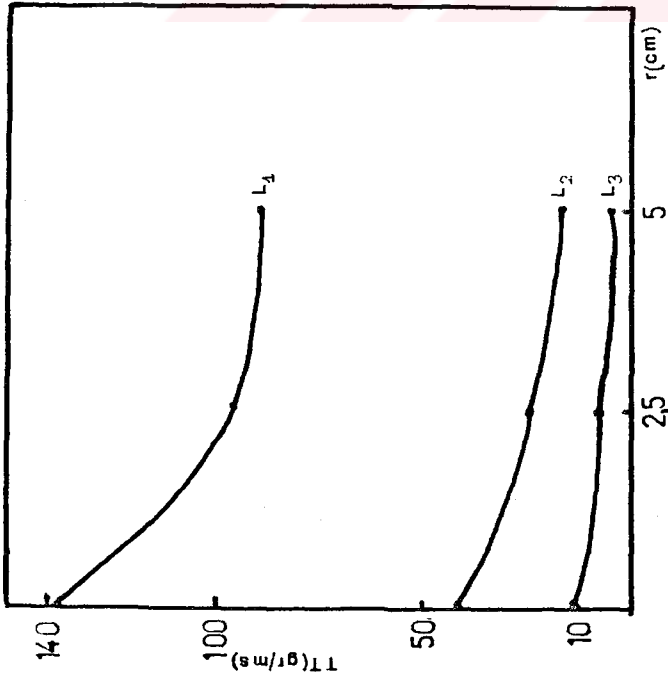


Şekil 4.10. Akışkan yatakta tanecik boş kolon hızı  $U_0$  ve yatak yüksekliğine bağlı olarak  $r_1 = 5$  cm deki değişimi (yatak malzemesi)

$$L_1 = 50 \text{ cm} \quad (U_0)_1 / U_{mf} = 1,01$$

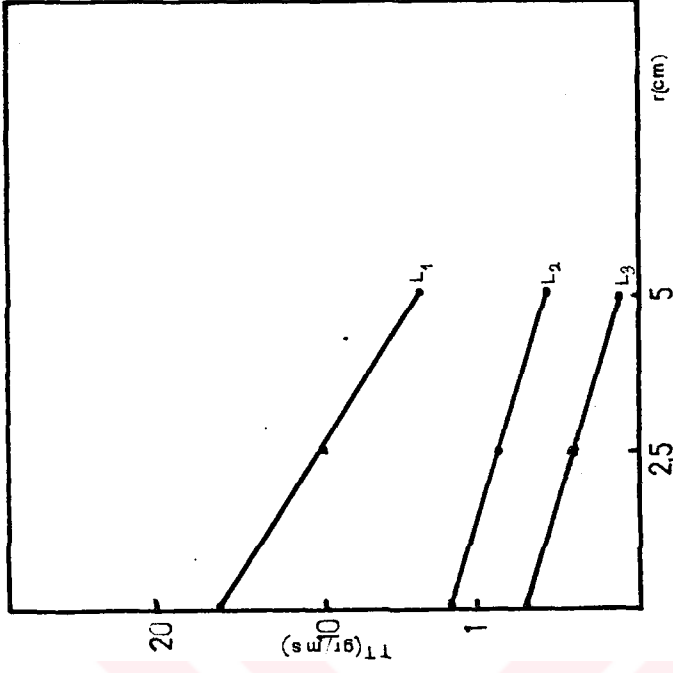
$$L_2 = 100 \text{ cm} \quad (U_0)_2 / U_{mf} = 1,14$$

$$L_3 = 150 \text{ cm} \quad (U_0)_3 / U_{mf} = 1,22$$



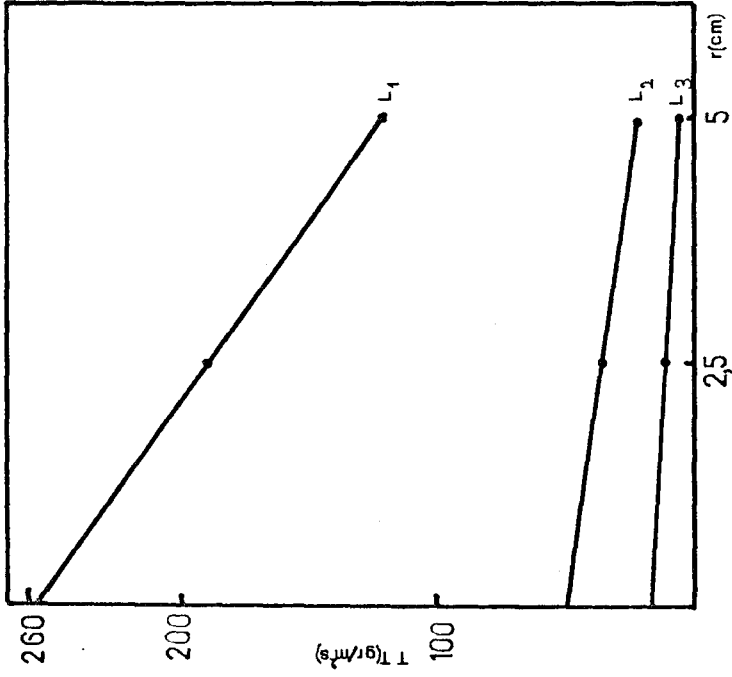
Şekil 4.11. Akışkan yatakta tanecik taşınının yatak yarıçapı  $r$  ve yatak yüksekliği  $L$ 'ye bağlı olarak  $(U_0)_1 = 47,5$  cm/s deki değişimi (yatak malzemesi kendir)

$$\begin{aligned} L_1 &= 50 \text{ cm} & (U_0)_1 / U_{mf} &= 1,033 \\ L_2 &= 100 \text{ cm} \\ L_3 &= 150 \text{ cm} \end{aligned}$$

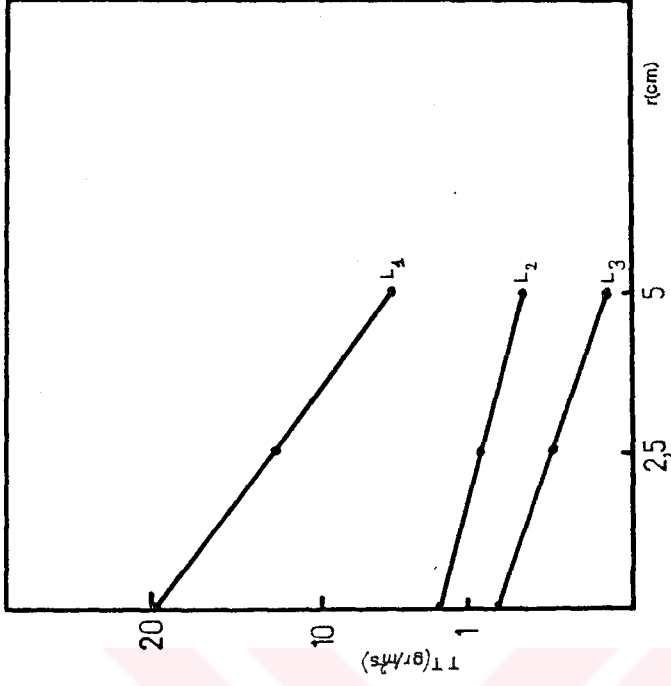


Şekil 4.12. Akışkan yatakta tanecik taşınının yatak yarıçapı  $r$  ve yatak yüksekliği  $L$ 'ye bağlı olarak  $(U_0)_1 = 28,1$  cm/s'deki değişimi (yatak malzemesi perlit)

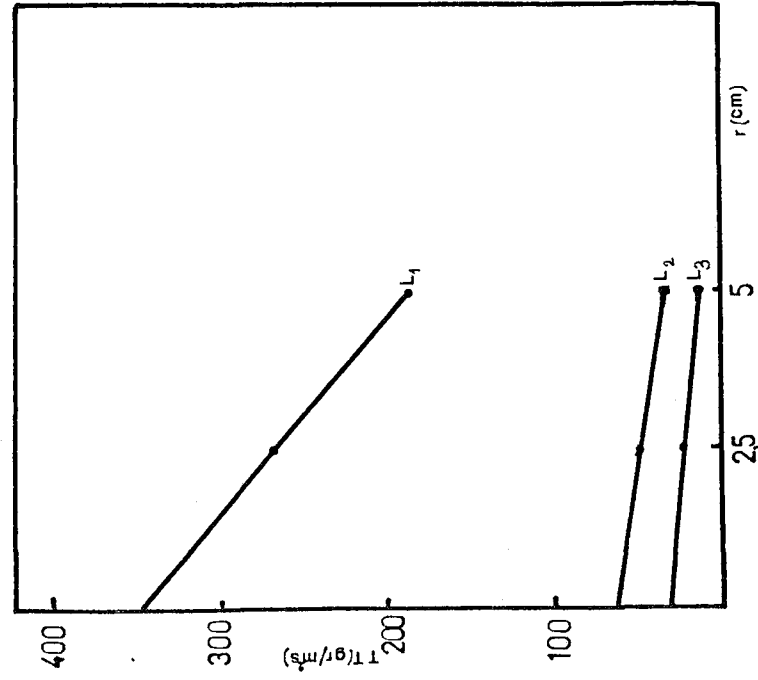
$$\begin{aligned} L_1 &= 50 \text{ cm} & (U_0)_1 &= 1,09 \\ L_2 &= 100 \text{ cm} \\ L_3 &= 150 \text{ cm} \end{aligned}$$



Şekil 4.13. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yarıçapı  $r$  ve yatak yüksekliği  $L$ 'ye bağlı olarak  $(U_0)_2 = 48,9$  cm/s'-deki değişimi (yatak malzemesi perlit)  $(U_0)_2/U_{mf} = 1,063$   
 $L_1 = 50$  cm  
 $L_2 = 100$  cm  
 $L_3 = 150$  cm



Şekil 4.14. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yarıçapı  $r$  ve yatak yüksekliği  $L$ 'ye bağlı olarak  $(U_0)_2 = 29,3$  cm/s'-deki değişimi (yatak malzemesi perlit)  $(U_0)_2/U_{mf} = 1,14$   
 $L_1 = 50$  cm  
 $L_2 = 100$  cm  
 $L_3 = 150$  cm

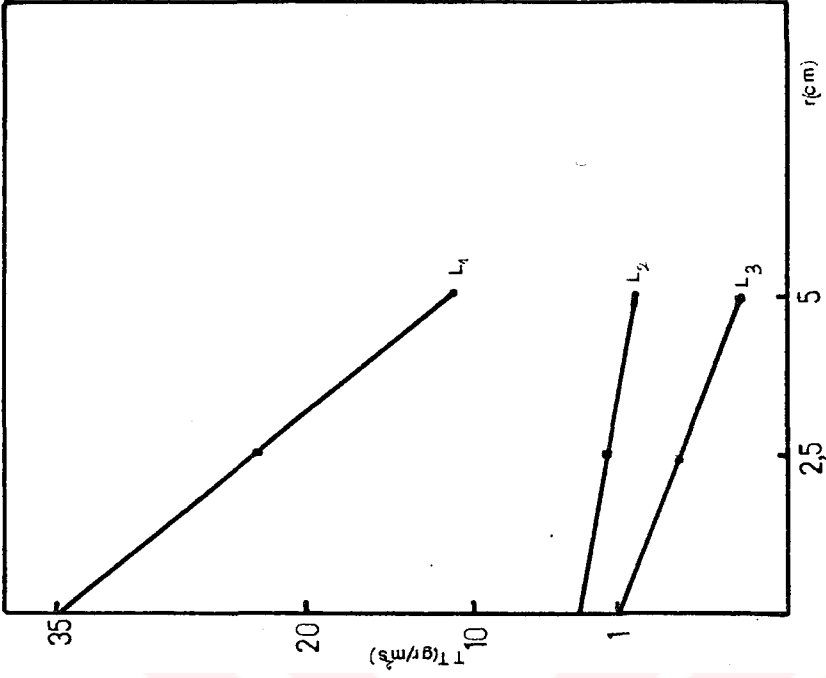


Şekil 4.15. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yarıçapı  $r$  ve yatak yüksekliği  $L$ 'ye bağlı olarak  $(U)_3 = 50,2$  cm'deki değişimi (yatak malzemesi kendiri)

$$L_1 = 50 \text{ cm} \quad U_0 = 50,2 \text{ cm}$$

$$L_2 = 100 \text{ cm} \quad (U_0)/U_{mf} = 1,1$$

$$L_3 = 150 \text{ cm}$$

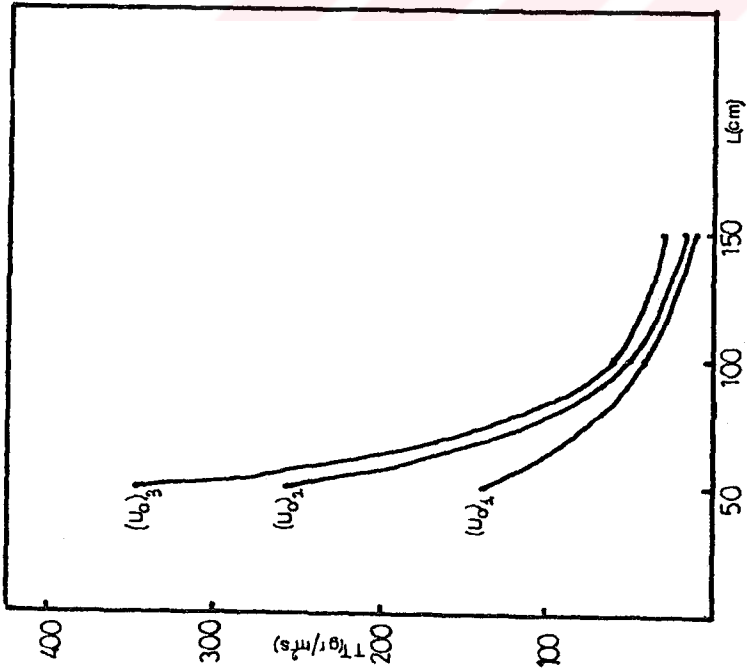


Şekil 4.16. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yarıçapı  $r$  ve yatak yüksekliği  $L$ 'ye bağlı olarak  $(U)_3 = 31,5$  cm/s'deki değişimi (yatak malzemesi perlit)

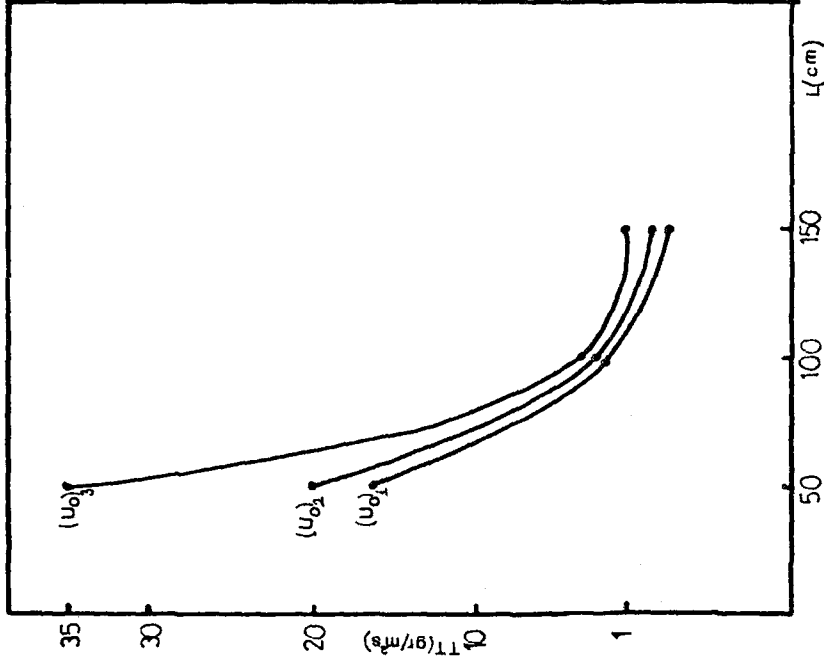
$$L_1 = 50 \text{ cm} \quad (U_0)_3/U_{mf} = 1,22$$

$$L_2 = 100 \text{ cm}$$

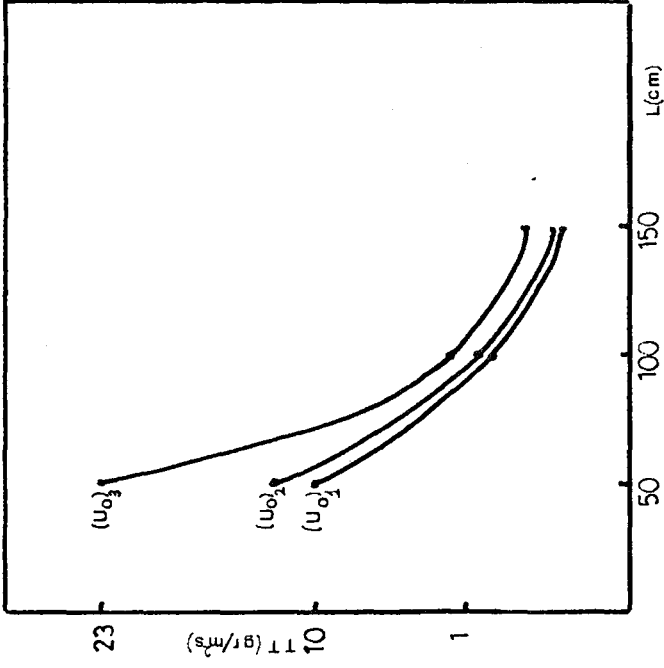
$$L_3 = 150 \text{ cm}$$



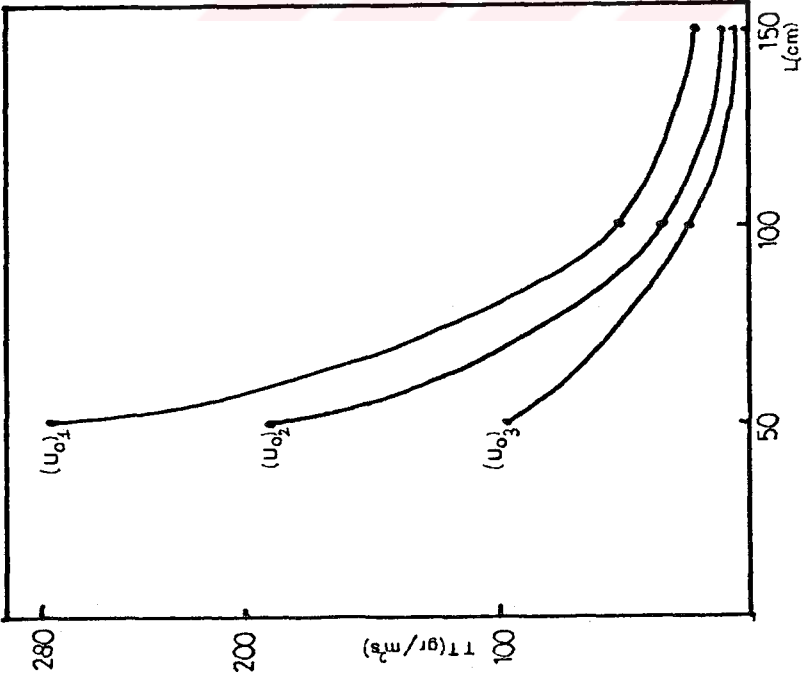
Şekil 4.17. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği  $L$  ve boş kolon hızı  $U_0$  a bağlı olarak  $r_3=0'$ 'daki değişimi (yatak malzemesi kendir)  
 $(U_0)_1 = 47,5$  cm/s,  $(U_0)_1/U_{mf}=1,033$   
 $(U_0)_2 = 48,9$  cm/s,  $(U_0)_2/U_{mf}=1,063$   
 $(U_0)_3 = 50,2$  cm/s,  $(U_0)_3/U_{mf}=1,1$



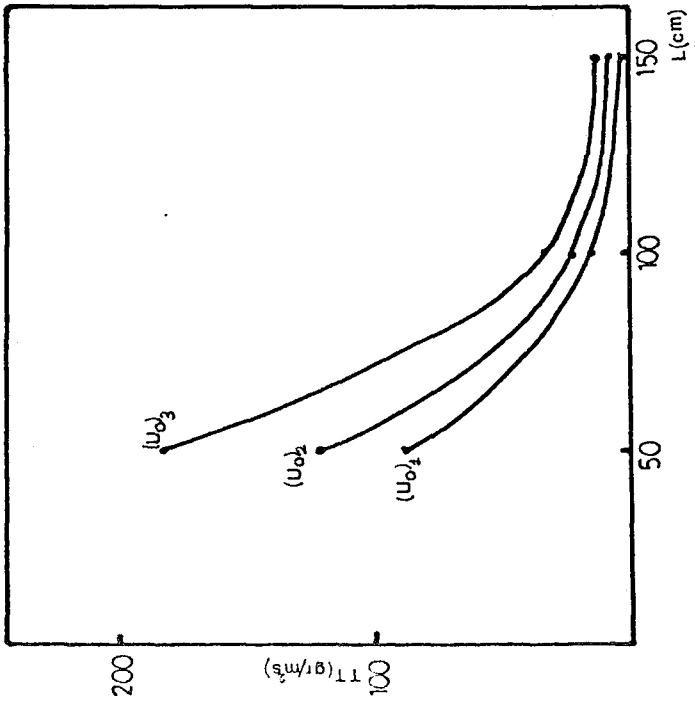
Şekil 4.18. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği  $L$  ve boş kolon hızı  $U_0$  a bağlı olarak  $r_3=0'$ 'daki değişimi (yatak malzemesi perlit)  
 $(U_0)_1 = 28,1$  cm/s,  $(U_0)_1/U_{mf}=1,09$   
 $(U_0)_2 = 24,3$  cm/s,  $(U_0)_2/U_{mf}=1,14$   
 $(U_0)_3 = 31,5$  cm/s,  $(U_0)_3/U_{mf}=1,22$



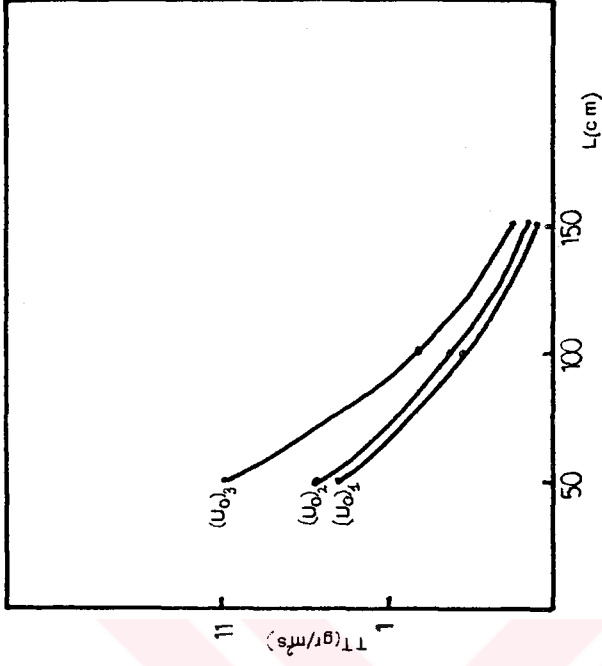
Şekil 4.20. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği  $L$  ve boş kolon hızı  $U_0$ 'a bağlı olarak  $r_2=2,5$  cm deki de-ğişimi (yatak malzemesi perlit)  
 $(U_0)_1 = 28,1$  cm/s,  $(U_0)_1/U_{mf} = 1,09$   
 $(U_0)_2 = 29,3$  cm/s,  $(U_0)_2/U_{mf} = 1,14$   
 $(U_0)_3 = 31,5$  cm/s,  $(U_0)_3/U_{mf} = 1,22$



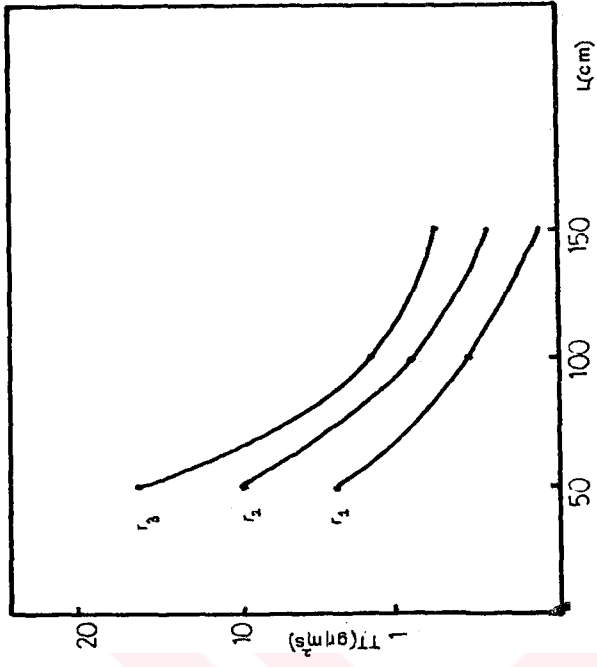
Şekil 4.19. Akışkan tanecik taşınımının yatak yüksekliği  $L$  ve boş kolon hızı  $U_0$ 'a bağlı olarak  $r_2=2,5$  cm'deki de-ğişimi (yatak malzemesi kadar)  
 $(U_0)_1 = 47,5$  cm/s,  $(U_0)_1/U_{mf}=1,033$   
 $(U_0)_2 = 48,4$  cm/s,  $(U_0)_2/U_{mf}=1,063$   
 $(U_0)_3 = 50,2$  cm/s,  $(U_0)_3/U_{mf}=1,1$



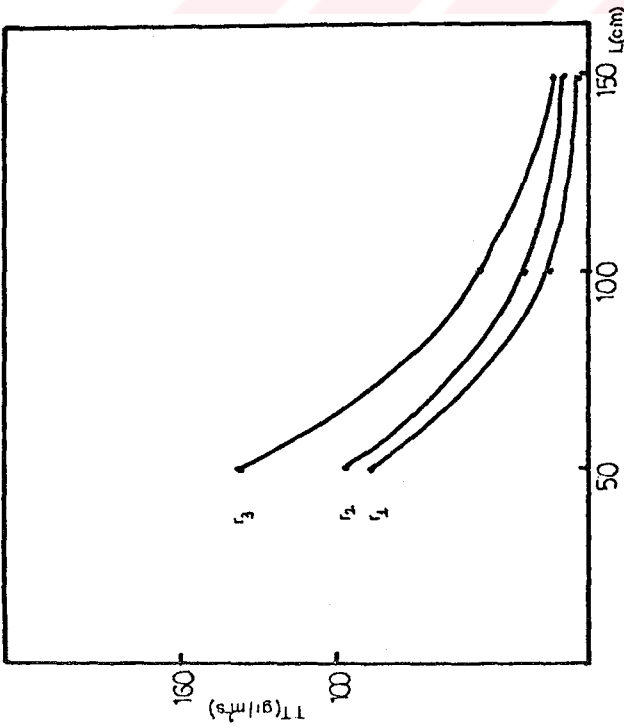
Şekil 4.21. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği  $L$  ve boş kolon hızı  $U_0$ 'a bağlı olarak  $r_1=5$  cm deki değeri (yatak malzemesi kendir)  
 $(U_0)_1 = 47,5$  cm/s  $(U_0)_1/U_{mf} = 1,033$   
 $(U_0)_2 = 48,9$  cm/s  $(U_0)_2/U_{mf} = 1,066$   
 $(U_0)_3 = 50,2$  cm/s  $(U_0)_3/U_{mf} = 1,1$



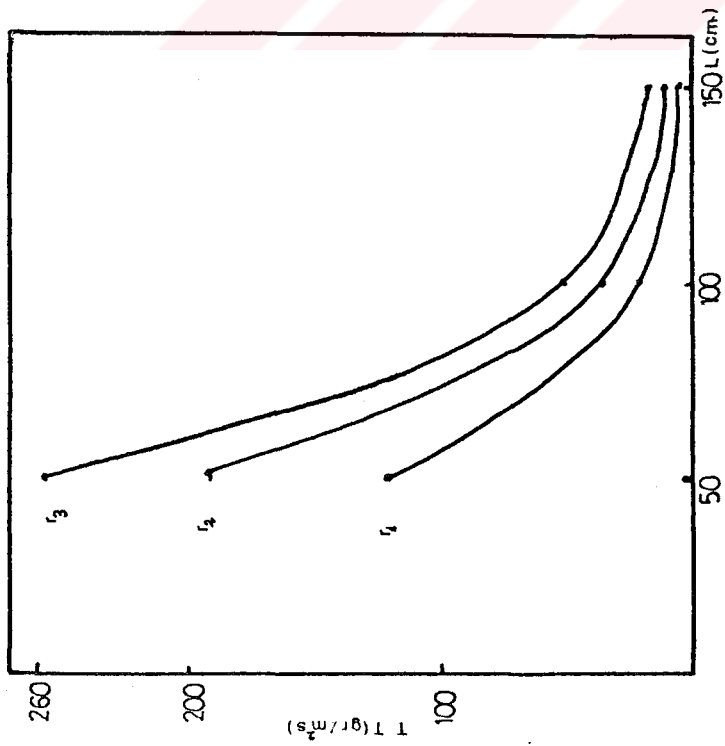
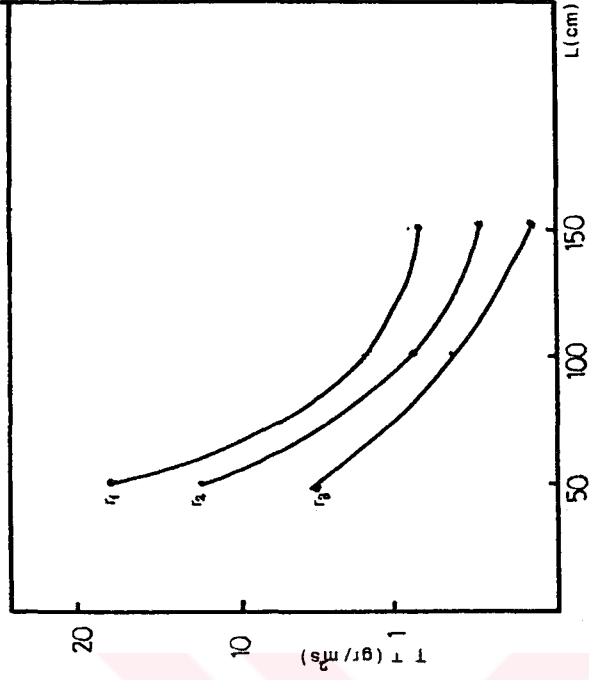
Şekil 4.22. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği  $L$  ve boş kolon hızı  $U_0$ 'a bağlı olarak  $r_1=5$  cm'deki değeri (yatak malzemesi perlit)  
 $(U_0)_1 = 28,1$  cm/s  $(U_0)_1/U_{mf} = 1,09$   
 $(U_0)_2 = 29,3$  cm/s  $(U_0)_2/U_{mf} = 1,14$   
 $(U_0)_3 = 31,5$  cm/s  $(U_0)_3/U_{mf} = 1,22$



Şekil 4.23. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği L ve yatak yarıçapı  $r$ 'ye bağlı olarak  $(U_0)_1 = 47,5$  cm/s'deki değişimi (yatak malzemesi kendiri)  
 $r_3 = 0$   $(U_0)_1/U_{mf} = 1,033$   
 $r_2 = 2,5$  cm  
 $r_1 = 5$  cm

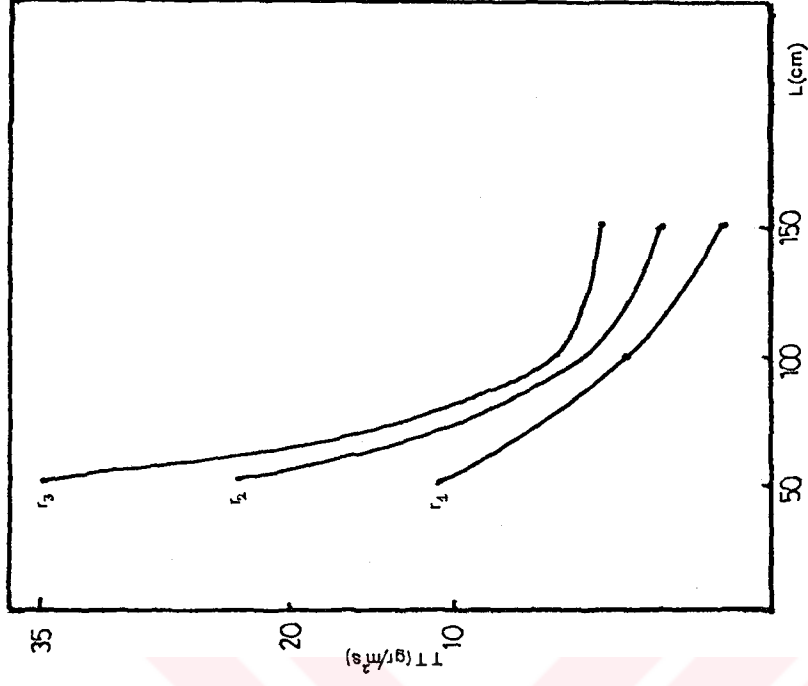


Şekil 4.24. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği L ve yatak yarıçapı  $r$ 'ye bağlı olarak  $(U_0)_1 = 28,1$  cm/s'deki değişimi (yatak malzemesi perlit)  
 $r_3 = 0$   $(U_0)_1/U_{mf} = 1,09$   
 $r_2 = 2,5$  cm  
 $r_1 = 5$  cm

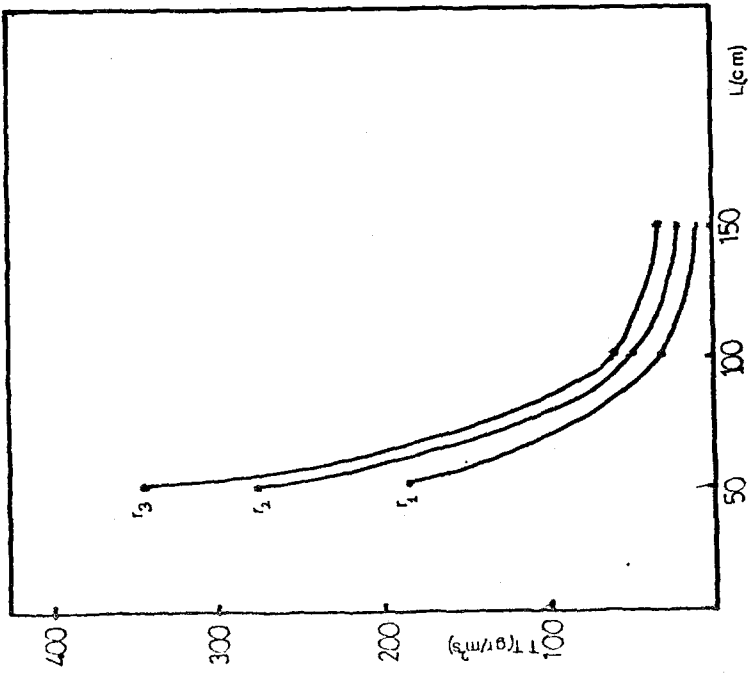


Şekil 4.25. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği L ve yatak yarıçapı  $r_1$ 'ye bağlı olarak  $(U_0)_2 = 48,9$  cm/s'indeki değişimi (yatak malzemesi kendir)  
 $r_3 = 0$   $(U_0)_2/U_{mf} = 1,063$   
 $r_2 = 2,5$  cm  
 $r_1 = 5$  cm

Şekil 4.26. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği L ve yatak yarıçapı  $r_1$ 'ye bağlı olarak  $(U_0)_2 = 29,3$  cm/s'indeki değişimi (yatak malzemesi perlit)  
 $r_3 = 0$   $(U_0)_2/U_{mf} = 1,14$   
 $r_2 = 2,5$  cm  
 $r_1 = 5$  cm



Şekil 4.28. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği ve yatak yarıçapı  $r$ 'ye bağlı olarak  $(U_0)_3 = 31,5$  cm/s' -deki değişimi (yatak malzemesi perlit)  
 $r_3 = 0$   $(U_0)_3 = 1,22$   
 $r_2 = 2,5$   
 $r_1 = 5$  cm



Şekil 4.27. Akışkan yatakta tanecik taşınımının yatak yüksekliği  $L$  ve yatak yarıçapı  $r$ 'ye bağlı olarak  $(U_0)_3 = 50,2$  cm/s' -deki değişimi (yatak malzemesi kendir)  
 $r_3 = 0$   $(U_0)_3/U_{mf} = 1,1$   
 $r_2 = 2,5$  cm  
 $r_1 = 5$  cm

## BÖLÜM 5

## SONUÇLAR VE İRDELENMESİ

Bu çalışmada Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Isıl-Güç laboratuvarında mevcut bulunan dolaşımli akışkan yatak yakma sisteminin işleyişinin ve gözlenemeyen akışkanlaşma davranışının incelenmesi amacıyla şeffaf pleksiglas malzemedan soğuk çalışmaya yönelik bir deney sistemi kurulmuştur. İşletme yönünden uygun akışkan yatak tasarımı ve akışkanlaşma ile ilgili parametrelerin ileride yapılacak çalışmalarda uygulamaya yönelik biçimde belirlenebilmesi amacıyla soğuk akışkan yatak geometrisi ve boyutlarının mevcut dolaşımli akışkan yatak yakma sistemi ile aynı olmasına özen gösterilmiştir.

Deney sistemi kurulduktan sonra akışkanlaşma davranışı ve özellikle minimum akışkanlaşma üzerinde durulmuştur. İlk olarak kepek yatak malzemesi olarak kullanılmış ve dolaşımın sağlandığı gözlenmiştir. Bu malzeme için akışkanlaşma davranışı incelenerek ilgili korelasyonlardan elde edilen hesap sonuçları Tablo (4.3) de verilmiştir. Minimum akışkanlaşma ile ilgili hesap sonuçları Tablo(4.4) de deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ancak yatak davranışını belirleyen parametrelerden biri olan terminal hız deneysel olarak gözlenemediği için ölçülememiş bu nedenle ölçüm sonucu Tablo(4.4)de verilememiştir. Hesap ve deneysel sonuçlar arasındaki farklılık genelde ortalama tane büyüklüğünün ve minimum boşluk oranının çok hassas bir biçimde belirlenememesinden ve ölçümlerin çok hassas yapılamamasından kaynaklanmaktadır. Deney sonucu elde edilen akışkanlaşma eğrisi ise Şekil(4.1)-

de verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi eğri beklenen akışkanlaşma özelliğini göstermektedir.

Ayrıca akışkan yatakta tanecik taşınımının üzerinde de durulmuştur. Tanecik taşınımı ile ilgili olarak yapılan deneylerde ise kendir ve perlit olmak üzere iki değişik malzeme kullanılmıştır. Yatak malzemeleri için ortalama tane büyüklüğü  $d_p$ , elek analizi yöntemi ile belirlenmiş olup; kendir için  $d_p=2,562$  mm ve perlit için  $d_p=0,347$  mm'dir. Bu iki malzemeden perlit ile dolaşım sağlandığı, ancak kendir için fan kapasitesinin yetersiz kaldığı görülmüştür. Kendir'in yoğunluğu  $909,73$  kg/m<sup>3</sup> olduğu halde perlitin yoğunluğu  $200$  kg/m<sup>3</sup> civarındadır. Bu ise; perlitin kendire oranla yaklaşık 4,5 kat daha ağır olduğunu göstermektedir.

Bu nedenlerle gerek akışkanlaşma ve gerekse taşınım deneylerinde kendir için gerekli hızların perlitte oranla çok daha fazla olması beklenir. Deneylerden elde edilen sonuçlar ise bunu doğrulamaktadır. Deney sonuçları Bölüm 4'de Tablo (4.6) ve (4.7) de verilmiş olup, ayrıca Şekil (4.5)-(4.28) de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Şekil (4.5)-(4.28) den görüldüğü gibi; kendir ve perlit için belirlenen birim zamanda birim yüzeye düşen katı tanecik taşınımını birbirinden oldukça farklıdır. Bu ise; malzemelerin tane büyüklüğü ve yoğunluk farkından kaynaklanmaktadır. Örneğin; Şekil (4.5) ve (4.6) da görülen boş kolon hızı  $U_0$  ve yatak yüksekliği L'ye bağlı olarak yatak merkezinde maksimum tanecik taşınımı, kendir için  $346$  gr/m<sup>2</sup> s iken, perlit için  $35$  gr/m<sup>2</sup> s olarak belirlenmiştir.

Öte yandan, tanecik taşınımının, yatak kolonunun merkezinden duvara doğru giderek azaldığı belirlenmiştir. Kolon akış hızının en yüksek olduğu yatak merkezine yaklaşıldıkça taneciklerin daha yoğun taşınımına girdikleri görülmektedir. Taşınım yoğunluğunun çapsal yönde-

ki dağılımları Şekil (4.11)-(4.16) da verilmiştir.

Yatak yüksekliği arttıkça tanecik taşınımının azaldığı, taneciklerin sabit ve değişen hızlardaki taşınımının daha uzun sürelerde gerçekleştiği belirlenmiştir (Şekil (4.17)-(4.28)). Bu ise yatak yüksekliği arttıkça hızın etkisinin azalması ve taneciklerin seyreklemesinden kaynaklanmaktadır. Kendir ve perlit arasında tanecik taşınım yoğunluğundaki fark yatak yüksekliğine bağlı olarak artmaktadır. (Şekil (4.17)-(4.28)).



## BÖLÜM 6

## İLERİYE DÖNÜK ÇALIŞMALAR İLE İLGİLİ ÖNERİLER

Bu çalışmada dolaşımli akışkan yatak malzemesi olarak kullanılan kepek ile soğuk analiz için yapılabilecek başlıca çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, minimum akışkanlaşma hızı kütsel hava debisi, minimum akışkanlaşma yüksekliği, minimum akışkanlaşma boşluk oranı, terminal hız, sürekli dolaşım için gerekli yatak malzemesi ağırlığı ve olayla ilgili basınç değişimleri belirlenmiştir. Dolaşım sayısı ise malzemenin buna imkan vermemesi nedeniyle belirlenememiştir.

Bu konuda ileriye dönük çalışmalar yönünden yapılabilecek ve yapılması gereken bazı deneysel çalışmalar ana başlıklarla aşağıda verilmiştir. Bunlar:

- Çeşitli yatak malzemelerinin (plastik granül, cam kürecikler, kum, çeşitli bitki tohumları vb.) fiziksel özelliklerine göre akışkanlaşma davranışını belirleyen hızların hesaplanması ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırması.

- Çeşitli yatak malzemeleri için (katı/hava) oranlarının (kg hava/kg katı) belirlenmesi.

- Yatak malzemelerine bağlı olarak dolaşım sayısı ve optimum dolaşım sayısının belirlenmesi. (Dolaşım/dakika)

- Türlü rejimlerde toplam boşluk hacim oranının yine yatak malzemesine bağlı olarak belirlenmesi.

- Endüstriyel yatak malzemeleri ile ilgili akışkanlaşma rejim bölgeleri ve karakteristik eğrilerin çıkarılması.

- Çeşitli yatak malzemeleri için basınç düşüşü dağılımları ve güç gereksinimlerinin belirlenmesi.

- Küçük boyutlardaki deney sistemleri sonuçlarının endüstriyel boyutlardaki sistemlere taşınması ile ilgili boyutsal analiz çalışmaları.

- Tanecik taşınımı ile ilgili deneylerin daha hassas ve sık hız aralıklarında ve yüksek hızlarda yapılması,  $U_o/U_{mf}$  oranlarının belirlenmesi.



## KAYNAKLAR

1. Reh, L., Chem. Eng. Progr., 67(2), 58, (1971).
2. Plass, L., H. Bierbach ve P. Gummel, "Experience with Combustion in Circulating Fluidized Bed", Lurgi G m b H Gervinustrage, 17/19, Frankfurt, am Main 1., (1986).
3. Grace, J.R., C.J. Lim, C.M.H. Brereton ve j. Chaouki, "Circulating Fluidized Bed Reactor Design and Operation", University of British Columbia Vancouver, Baskı için AIChE dergisine gönderilmiş, Canada, (1986).
4. Leva, M., "Fluidization", Mc Graw-Hill, New York, 1st. ed., (1959).
5. Zenz, F.A., How to Predict Gravity Flow Rates, Petr. Refiner 36. (1957).
6. Kunii, D., O. Levenspiel, "Fluidization Engineering", John Wiley and Sons. Inc., New York, (1969).
7. Weisman, Richard W. Lennon, Gerard P. Robert, Edward W Experiment on fluidization in unbounded domains Journal of Hydraulic Engineering 114: 502-15 My'88
8. Horio, Masayuki Nonaka, Akira  
A generalized bubble diameter correlation for gas-solid fluidized beds AIChE Journal 33: 1865-72 N'87.
9. Shrivastava, S. Mathur, A. Saxena, S.C.  
On the determination of minimum fluidization velocity by the method of Yang et al. AIChE Journal 32: 1227-9 JI'86.

10. Kang, Yong Kim, Sang D.  
Radial dispersion characteristics of two-and three-phase fluidized beds Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development 25 : 717-22 JI'86.
11. Cooper, D.J. Clough, D.E.  
Optimal, real-time monitoring of particle size distribution in a fluidized bed AIChE Journal 32: 389-96 Mr'86.
12. Geldart, Derek Rhodes, Martin  
Developments in Fluidization  
The Chemical Engineer No. : 422: 30-2 F'86.
13. Raskakov, A.P. Tuponogov, V.G. Phillippovsky, N.F.  
Uniformity of fluidization on a multi-orifice distributor  
The Canadian Journal of Chemical Engineering 63: 886-90 D'85.
14. Weimer, A.W. Quardener, G.J.  
On dense phase voidage and bubble size in high pressure fluidized beds of fine powders.  
AIChE Journal 31: 1019-28 Je'85.
15. Chen, Peishi Pei, David C.T.  
Fluidization characteristics of fine particles  
The Canadian Journal of Chemical Engineering 62: 464-8 Ag'84.
16. Falei Guo  
Gas flow and mixing behaviour in fine-powder fluidized bed AIChE Journal 33: 1895-8 N'87.
17. Lakshmanan, Chandrasekharan C. Potter, Owen E.  
Cinematik modeling of dynamics of solids mixing in fluidized beds  
Industrial & Engineering Chemistry Research 26:292-6 F'87.

18. Vural, H., "Akışkan Yatakta Yakma Teknolojisinde Gelişmeler ve Yerli Enerjiye Dönüş Çabaları". TÜBİTAK Gebze-KOCAELİ
19. Vural, H., "Alüminyum Üretiminde Kömürün Yeri ve Akışkan Yatak Teknolojisi", TÜBİTAK Marmara Bilimsel Araştırma Enstitüsü, Gebze - KOCAELİ.
20. Yerushalmi, T. ve N.T. Cankurt, "Further Studies of Regimes of Fluidization", Power Technology, 24, 187-205, (1979).
21. Avidan, A.A., ve J.Yerushalmi, "Bed Expansion in High Velocity Fluidization", Power Technology, 32, 223-232, (1982).
22. Frantz, J.F., "Design For Fluidization" Hydrocarbons Div., Monsanto Chemical Co., September 17, (1962).
23. Wen, C.Y., ve Y.H. Yu, "A Generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity", AIChE J., 12, 610, (1966).
24. Broadhurst, T. E. ve H.A. Becker, "Onset of Fluization and Slugging in Beds of Uniform Particles", AIChE J., 21, 238-247, (1975).
25. Gelperin, N.I., ve V.G. Einstein, "Heat Transfer in Fluidized Bed" University Press, Dept. of Chem. Eng. Univ. Of New-Castle.
26. Wen, C.Y., R.E. Hashinger, "Elutriation of Solid Particle from a Dense Phase Fluidized Bed", AIChE J., 6 (2), 220, (1969).
27. Botterill, J.S.M., "Fluid-bed Heat Transfer", Academic Press, New York, (1975).
28. Fan, L.T., T. Ho., S. Hiraoka ve W.P. Walawender, "Pressure Fluctuations in a Fluidized Bed", AIChE J., 27(3), 388,(1981).
29. Pyle, D.L., D. Harrison, "An Experimental Investigation of the Two-Phase Theory of Fluidization", Chem. Eng. Sci., 22, 1199-1207, (1967).

30. Thonglimp, V., N. Higuily et L. Laguerie "Vitesse Minimale de Fluidization et Expansion des Couches Fluidisees par un Gaz", Powder Tech., 38, 233-253, (1984).
31. Richardson, J.F. ve W.N. Zaki, "Incipient Fluidization and Particulate Systems", in Fluidization (edited by Davidson, J.F. and Harrison, D.), Chapter 2, 26, Academic Press. (1971).
32. Matsen, J.M., S. Houmand ve J.F. Davidson, Chem.Eng.Sci., 24, 1743, (1969).
33. Hsiung, T.H. ve G. Thodos, Can. J. Chem.Eng. Prog., 42, 221, (1977).
34. Zenz, F.A., N.A. Weil, "A Theoretical-Empirical Approach to the Mechanism of Particle Entrainment from Fluidized Beds", AIChE J., 4 (4), 472-479, (1958).
35. Vural, H., Heperkan, H., Özcan, M., "Application of Double Plate Distributors to Fluidized Bed Combustion Systems", TÜBİTAK Marmara Araştırma Ens., Gebze-Kocaeli.
36. Stern, C.A., "Air Pollution" Third Edition, Academic Press, New York, San Francisco, London, 1977.
37. Geldert, D., "The Design of Distributors for Gas Fluidized Beds", Powder Tech., 42, 67-78, (1985).
38. Agarwal, J.C., W.L., Davis ve D.T., King, Chem. Eng. Progr., 58, 85, (1962).
39. Hiby, J.W., Chem. Eng. Tech., 36, 228, (1964).
40. Quereshi, A.E., ve D.E. Creasy, Powder Tech., 22, 113, (1979).
41. Richardson, D.R., "How to Design Fluid-Flow Distributors", Chem. Eng., 68(2), 83, (1961).

42. TS 1423 "Orifis Plaka ile Hava Verdisinin Ölçülmesi (1974).
43. Byers, R.L., W.Licht, "Design Fundamentals of Particulate Collection for Air Pollution Control", AICHE Today Series, New York, (1974).
44. Trees, J., Trans. Inst. Chem. Eng., 40, 286, (1962).
45. Saxena, S.C. ve G.J. Vogel, "The Measurement of Incipient Fluidization Velocities in a Bed of Coarse Dolomite at Temperature and Pressure", Trans. Inst. Chem. Eng., 55, 184, (1977).
46. Todes, D.M., ve V.D. Goroshkov, "Influence of Temperature on Incipient Fluidization of Limestone, Lime, Coal Ash and Corundum", Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 20, 319-326, (1981).
47. Masaaki, N., Y. Hamada, S. Toyama, " An Experimental Investigation of Minimum Velocity of Elevated Temperatures and Pressures", The Can J. of Chem. Eng., 63, 8-12, (1985).
48. Yang, W.C., D.C. Chitester, R.M. Kornosky ve D.L. Keairns, " A Generalized Methodology for Estimating Minimum Fluidization Velocity at Elevated Pressure and Temperature" AICHE J., 31 (7), 1086, (1985).
49. Agarwal, O.P., ve J. Storrow, Chem. and Ind. p.278 Leva, M., Fluidization, Mc Graw Hill, London, (1956).
50. Taylor, T.E., B.K., Biswas, R.W. Bryers, T. Taoda, "An Experimental Study of Coke Breeze in a Fluidized Bed Combustor" AICHE Symp. Ser., 75 (176), 231, (1978).



E K L E R

## EK 1. DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAK SİSTEMİNİN SİSTEM PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI

Bu çalışmada kurulması amaçlanan Dolaşımli Akışkan Yatak Deney Sisteminin hidrodinamik davranışı ile ilgili teorik hesaplamalar Bölüm 4.3'de verilen denklemler kullanılarak yapılmıştır. Hesaplarda kullanılan, akışkan ve katıya ait karakteristik özellikler ise daha önce Tablo (4.1) de verilmiştir.

### Ek 1.1. Kütleli Hava Debisinin Hesaplanması

Kütleli hava debisi  $q_m$ , TS 1423'e uygun olarak aşağıda verilen denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$q_m = \alpha \epsilon \frac{\pi}{4} D^2 \sqrt{2\Delta P \rho_g} \quad (\text{kg/s}) \quad (\text{El.1})$$

Burada,

$\alpha$  : Akış katsayısı olup = 0,57 çap oranı için TS 1423'den belirlenmiştir. çap oranı sisteme giden her iki değişken çaplı boruya ait olan debiler için Ek 4'de verilen orifis plaka tasarımına göre belirlenmiştir.

$$(U_0 = 2,5 \text{ m/s'de, } D = 0,105 \text{ m için } Re_D = 0,1702 \times 10^5 \\ D = 0,053 \text{ m için } Re_D = 0,0859 \times 10^5)$$

$\epsilon$  : Genleşme katsayısı, hava için  $\epsilon = 1$  alınmıştır.

$D$  : Orifis metre boru çapı, m .  $D = 0,105$  (4"lik) ve  $D = 0,05$  (2"lik)

$\Delta P$  : Orifis metredeki basınç düşüşü,  $\text{kN/m}^2$  ölçülen değer 0,2 düzeltme faktörüyle çarpıldıktan sonra Denklem El.1'de kullanılmıştır.

$\rho_g$  : Havanın yoğunluğu olup,  $\rho_g = 1,187 \text{ kg/m}^3$ .

## Ek.1.2. Minimum Akışkanlaşma Hızının Hesaplanması

Minimum akışkanlaşma hızının teorik hesabı için Bölüm 2 ve Bölüm 4'de verilen, literatürde bulunan denklemler kullanılmış ve bulunan değerlerin ortalaması alınmıştır. (Kepek  $\rho_p = 452,16 \text{ kg/m}^3$ ,  $d_p = 0,645 \text{ mm}$ )

a. Kunii ve Levenspeil(6)

$$\frac{U_{mf} d_p \rho_g}{\mu} = \left[ (33,7)^2 + 0,0408 \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/2} - 33,7$$

şeklinde verilen Ergun Denklemi'nden;

$$U_{mf} = 0,0587 \text{ bulunmuştur.}$$

b. Broadhurst ve Becker (24)

$$Ga = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} = 4207,72 \text{ olarak bulunmuş olup ilerde}$$

verilen diğer yaklaşımlarda da aynı  $Ga = 4207,72$  değeri kullanılmıştır.

$$Re_{mf} = \left( \frac{Ga}{2.42 \times 10^5 \times Ga^{-0,85} (\rho_p - \rho_g)^{0,13} + 37,7} \right)^{0,5} \text{ denkleminde}$$

$$Re_{mf} = 2,9523 \text{ ve buna göre Re}$$

$$Re_{mf} = \frac{d_p \rho_g U_{mf}}{\mu} \text{ den}$$

$$U_{mf} = 0,0706 \text{ m/s bulunmuştur.}$$

c. Thonglimp ve arkadaşları (30)

$$Re_{mf} = \left[ (31,6)^2 + 0,0425 Ga \right]^{1/2} - 31,6 \text{ denkleminde}$$

$$Re_{mf} = 2,7131 \text{ ve } Re_{mf} = \frac{d_p \rho_g U_{mf}}{\mu} \text{ den}$$

$$U_{mf} = 0,0648 \text{ m/s bulunmuştur.}$$

İkinci bir yaklaşımla  $Re_{mf} < 30$  kabul edilerek verilen

$Re_{mf} = 7,54 \times 10^{-4} Ga^{0,98}$  bağıntısından  $U_{mf} = 0,0642$  m/s olarak hesap-

lanmıştır. Bu bağıntıdan hesaplanan  $Re_{mf} = 2,685$  olup verilen sınıra uygundur.

d. Masaaki ve arkadaşları (35)

$Re_{mf} = [(33,95)^2 + 0,0465 Ga]^{1/2} - 33,95$  denkleminde

$$Re_{mf} = 2,7687 \quad \text{ve} \quad Re_{mf} = \frac{d_p \rho_g U_{mf}}{\mu} \quad \text{den}$$

$U_{mf} = 0,0662$  m/s bulunmuştur.

e. Saxena ve Vogel (45)

$Re_{mf} = [(25,28)^2 + 0,0571 Ga]^{1/2} - 25,28$  denkleminde

$$Re_{mf} = 4,3737 \quad \text{ve} \quad Re_{mf} = \frac{d_p \rho_g U_{mf}}{\mu} \quad \text{den}$$

$U_{mf} = 0,1045$  m/s. bulunmuştur.

f. Todes ve Goroshkov (46)

$Re_{mf} = \frac{Ga}{1400 + 5,22 (Ga)^{1/2}}$  denkleminde

$$Re_{mf} = 2,4202 \quad \text{ve} \quad Re_{mf} = \frac{d_p \rho_g U_{mf}}{\mu} \quad \text{den}$$

$U_{mf} = 0,0578$  m/s bulunmuştur.

Hesaplanan bütün sonuçların ortalaması alınarak minimum akış-  
kanlaşma hızı  $U_{mf} = 0,0695$  m/s olarak belirlenmiştir.

Kendir  $\rightarrow d_p = 2,562$  mm,  $\rho_p = 909,73$  kg/m<sup>3</sup>

$$a. \quad \frac{U_{mf} d_p \rho_g}{\mu} = \left[ (33,7)^2 + 0,0408 \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{2} \right]^{1/2} - 33,7 \quad \text{den;}$$

$$U_{mf} = 0,706 \quad \text{m/s}$$

b. Broadhurst ve Becker (24)

$$Ga = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g)}{2 \mu} = 531251,78 \quad \text{olmak üzere}$$

$$Re_{mf} = \left( \frac{Ga}{2,42 \times 10^5 \times Ga^{-0,85} (\rho_p - \rho_g)^{0,13} + 37,7} \right)^{0,5} \text{ den } Re_{mf} = 107,84$$

ve  $U_{mf} = 0,649 \text{ m/s}$

c. Thonglimp ve Ark (30)

$$Re_{mf} = [ (31,6)^2 + 0,0425 Ga ]^{1/2} - 31,6 \text{ dan}$$

$$Re_{mf} = 121,95 \text{ ve } U_{mf} = 0,734 \text{ m/s}$$

d. Masaaki ve ark. (35)

$$Re_{mf} = [ (33,95)^2 + 0,0465 Ga ]^{1/2} - 33,95 \text{ den}$$

$$Re_{mf} = 126,85 \text{ ve } U_{mf} = 0,763 \text{ m/s}$$

e. Saxena ve Vogel (45)

$$Re_{mf} = [ (25,28)^2 + 0,0571 Ga ]^{1/2} - 25,28 \text{ den}$$

$$Re_{mf} = 150,71 \text{ ve } U_{mf} = 0,907 \text{ m/s}$$

f. Todes ve Goroshkov (46)

$$Re_{mf} = \frac{Ga}{1400 + 5,22(Ga)^{1/2}} \text{ den}$$

$$Re_{mf} = 102,07 \text{ ve } U_{mf} = 0,614 \text{ m/s.}$$

Tüm sonuçların ortalaması alınarak

$$U_{mf} = 0,729 \text{ m/s} \text{ bulundu.}$$

Perlit  $\rightarrow \rho_p = 200 \text{ kg/m}^3, d_p = 0,347 \text{ mm}$

$$a. \frac{U_{mf} d_p \rho_g}{\mu} = \left[ (33,7)^2 + 0,0408 \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/2} - 33,7 \text{ den,}$$

$$U_{mf} = 0,00775 \text{ m/s}$$

b. Broadhurst ve Becker (24)

$$Ga = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu} = 288,84 \text{ olmak üzere;}$$

$$Re_{mf} = \left( \frac{Ga}{2,42 \times 10^5 \times Ga^{-0,85} (\rho_p - \rho_g)^{0,13} + 37,7} \right)^{0,5} \text{ den}$$

$$Re_{mf} = 0,271 \quad U_{mf} = 0,012 \text{ m/s}$$

c. Rhonglimp ve ark (30)

$$Re_{mf} = [(31,6)^2 + 0,0425 Ga]^{1/2} - 31,6 \text{ den}$$

$$Re_{mf} = 0,194 \quad \text{ve} \quad U_{mf} = 0,0086 \text{ m/s}$$

d. Masaaki ve ark (35)

$$Re_{mf} = [(33,95)^2 + 0,0465 Ga]^{1/2} - 33,95 \text{ den}$$

$$Re_{mf} = 0,197 \quad \text{ve} \quad U_{mf} = 0,00876 \text{ m/s}$$

e. Saxena ve Vogel (45)

$$Re_{mf} = [(25,28)^2 + 0,0571 Ga]^{1/2} - 25,28 \text{ den}$$

$$Re_{mf} = 0,324 \quad U_{mf} = 0,0144 \text{ m/s}$$

f. Todes ve Goroshkov (46)

$$Re_{mf} = \frac{Ga}{1400 + 5,22(Ga)^{1/2}} \text{ den}$$

$$Re_{mf} = 0,194 \quad \text{ve} \quad U_{mf} = 0,00862 \text{ m/s}$$

Tüm sonuçların ortalaması alınarak  $U_{mf} = 0,01 \text{ m/s}$  bulundu.

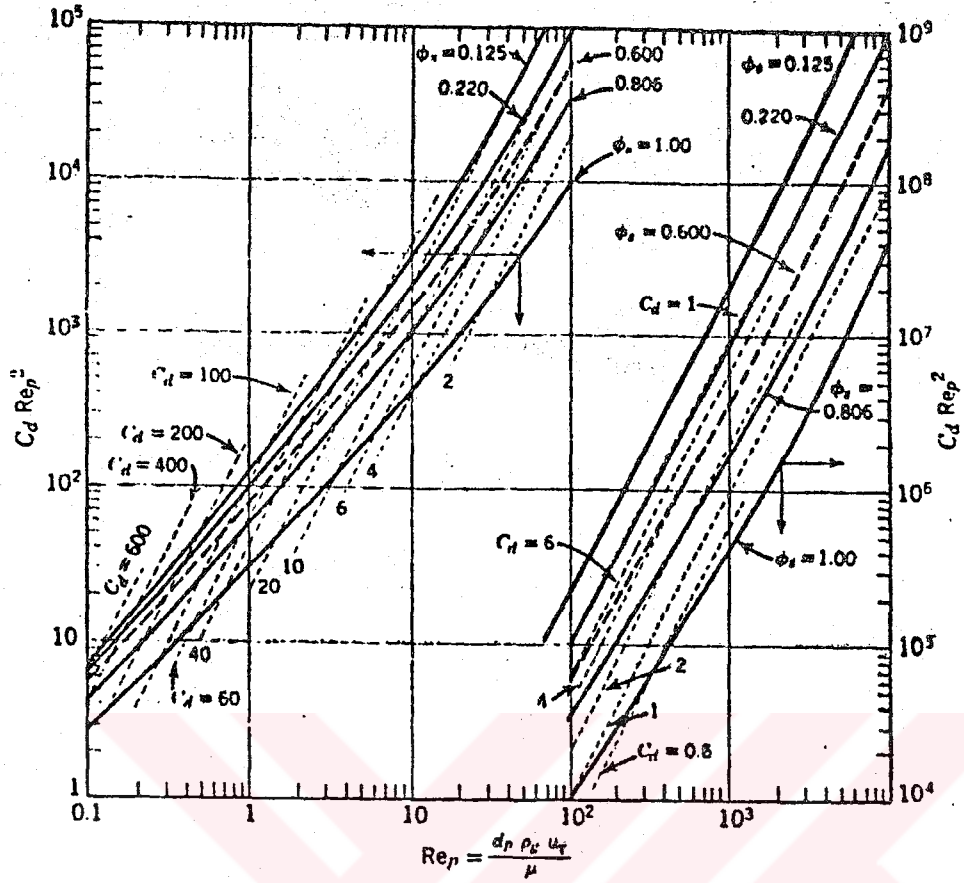
### Ek.1.3. Terminal Hızın Hesaplanması

Terminal hızın teorik hesabında Bölüm 2.6'de verilen Denklemler (2.16) ve (2.18) kullanılmıştır.

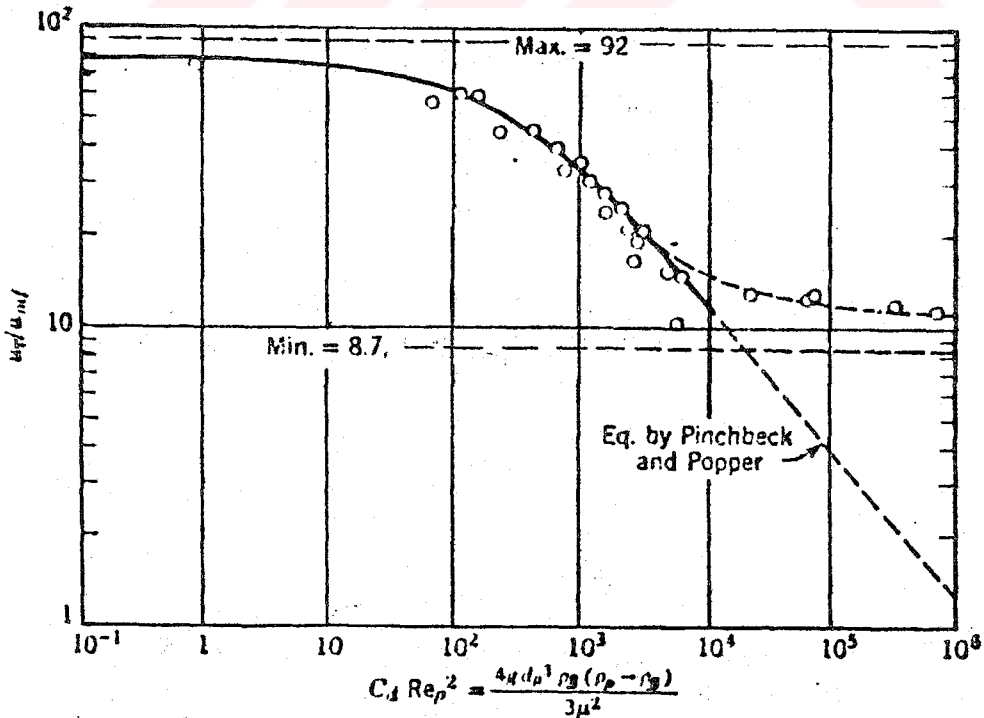
$$(U_T)_{\text{küresel}} = \frac{0,153 g^{0,71} d_p^{1,14} (\rho_p - \rho_g)^{0,71}}{\rho_g^{0,29} \mu^{0,43}} \text{ denkleminde}$$

ilgili değerler Tablo 4.1'den alınmak üzere; ( $g=9,81 \text{ m/s}^2$ )

$$U_T = 1,418 \text{ m/s}$$



Şekil E 1.3-a Akışkanla ilerleyen taneciklerin terminal hızının hesabında kullanılan diyagram (Brown, [6])



Şekil E 1.3-b Terminal hızın minimum akışkanlaşma hızının oranı (Pinchbeck ve Popper [6])

Ayrıca ikinci bir yaklaşımla Denklem (2.18) den :

$$U_T = \left[ \frac{4}{225} \frac{(\rho_p - \rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p$$

$U_T = 1,626$  m/s. bulunmuştur. Ortalama alınarak terminal hız  $U_T = 1,522$  olarak belirlenmiştir. Hızlı akışkanlaşma rejiminde ve dolaşımli akışkan yatak sistemlerinde genellikle terminal hızın ( $U_T$ ) üzerinde çalışıldığı için çalışma hızı (boş kolon hızı) 2,5 m/s olarak seçilmiştir.

#### Ek 1.4. Minimum Akışkan Boşluğunun Hesaplanması

Minimum akışkan boşluğu,  $E_{mf}$ 'in değeri 50 ml. hacmindeki kendir, perlit ve kepek alınarak boşluklarını dolduran su hacmini ölçmek suretiyle belirlenmiştir.

50 ml kendirdeki boşluğu dolduran su hacmi = 18 ml.

$$E_{mf} = \frac{18,5}{50} = 0,37$$

50 ml perlitteki boşluğu dolduran su hacmi = 12 ml.

$$E_{mf} = \frac{12}{50} = 0,24$$

50 ml kepektaki boşluğu dolduran su hacmi = 23,5 ml.

$$E_{mf} = \frac{23,5}{50} = 0,47$$

Burada özellikle kepek ve perlit'in bir miktar su çekmiş olması düşünüldüğünden  $E_{mf}$  değerleri hassas değildir.

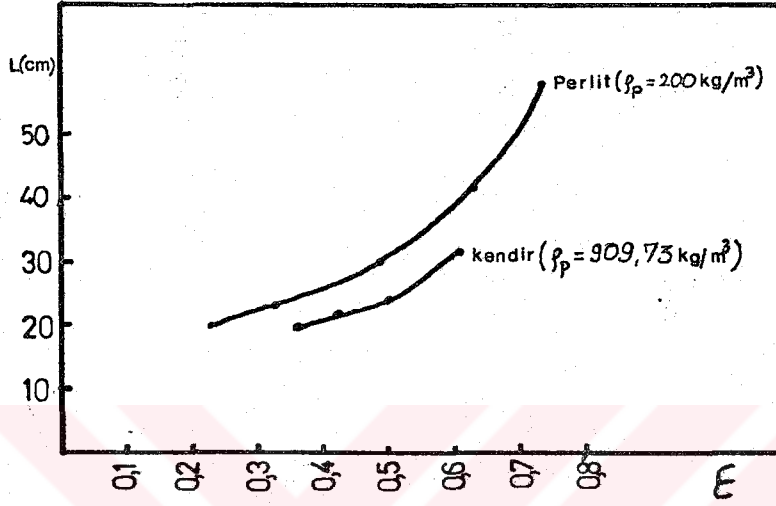
Ayrıca kendir ve perlit için ölçülen yatak yüksekliklerine bağlı olarak; aşağıdaki Denklem (E1-4) den boşluk oranları belirlenmiştir.

$$\frac{L}{L_{mf}} = \frac{1-E_{mf}}{1-E} \quad (E 1.4)$$

Buna göre; bulunan değer Tablo E1.4 ve Şekil E1.4'de verilmiştir.

Tablo El.4. Yatak yüksekliğine bağlı boşluk oranları

Kendir	L(cm)	20	20,2	20,5	21	22,5	24	32
	E	0,364	0,37	0,379	0,394	0,434	0,501	0,602
Perlit	L(cm)	20	20,5	23	30	42	57	
	E	0,221	0,24	0,323	0,481	0,629	0,727	



Şekil El.4. Yatak yüksekliğine bağlı boşluk oranları

#### Ek 1.5. Yatak Yüksekliğinin Hesaplanması

Akışkan yatakta minimum yatak yüksekliği Bölüm (2.8) de verilen yaklaşımlar kullanılarak hesaplanmıştır. Thonglimp ve arkadaşlarının verdiği yaklaşımla minimum yatak yüksekliği yatak içerisine konacak olan yatak malzemesinin ağırlığına göre aşağıdaki gibi bulunur (30).

$$a. H_{mf} = \frac{4M}{(1-\epsilon_{mf})\pi D_t^2 \rho_p} \quad \text{Denklem (2.19)}$$

Yatak malzemesi olarak 0,580 kg kepek kullanılmıştır. Kepek yoğunluğu 452,16 kg/m<sup>3</sup>, yatak çapı 0,125 m ve daha önce belirlenen minimum akışkanlaşma boşluk oranı  $\epsilon_{mf} = 0,47$  olarak alınmış ve buna göre Denklem (2.21) den minimum yatak yüksekliği

$H_{mf} = 0,197$  m bulunmuştur. Ölçülen değer ise 0,205 m'dir.

b. Avidan ve Yerushalmi hızlı rejimde çalışan bir yatak için Denklem (2.25) ile maximum yatak yüksekliğini hesaplamıştır (21).

$$\frac{H_{\max}}{H_{mf}} = 1 + \frac{U_o - U_{mf}}{0,35 (2g D_t)^{1/2}} \quad \begin{array}{l} U_o = 2,5 \text{ m/s} \\ U_{mf} = 0,0695 \text{ m/s} \end{array}$$

$$\frac{H_{\max}}{H_{mf}} = 5,434 \text{ elde edilir.}$$

$$H_{\max} = 1,070 \text{ m}$$

Buradan minimum akışkanlaşan taneciklerin 98,8 cm den sonra seyrek-leşerek yukarı doğru hızlandıkları görülmektedir.

#### Ek 1.6. Basınç Düşüşünün Hesaplanması

Minimum Akışkanlaşma noktasına ulaşmayı sağlayan minimum akışkanlaşma hızına tekabül eden basınç düşüşünü kontrol etmek amacıyla Bölüm (2.4)deki minimum akışkanlaşma teorisinde Denklem (2.3) ile verilen eşitlikten kısmen bir hesap yapılabilir. Çünkü burada minimum akışkanlaşma yatak yüksekliği deneysel değerdir (6).

$$\frac{P_B}{H_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_g) \frac{g}{g_c}$$

Burada; yerçekimi ivmesi  $g_c = 1 \text{ m/s}^2$  olmak üzere diğer değerler ilgili Tablo (4.1) den alınarak;

$$P_B = 42,028 \text{ kg/m}^2 = 420,28 \text{ N/m}^2 = 0,420 \text{ kN/m}^2 \text{ veya}$$

$$P_B = 42 \text{ mm H}_2\text{O} \text{ bulunmuştur.}$$

Bu basınç değişimi yatakta minimum akışkanlaşma konumundaki basınç düşüşüdür. Deneyde orifimetreden ölçülen değer ise  $0,17 \text{ kN/m}^2$  yani  $17 \text{ mm H}_2\text{O}$  dir.

Yine Bölüm (2.10) da Denklem (2.27) den

$W = \Delta P A_t$  için yine

$$\Delta P = \frac{0,580 \text{ (kg)}}{0,0123 \text{ (m}^2)} = 42,926 \text{ kg/m}^2 = 47,154 \text{ mm H}_2\text{O bulunur.}$$

Burada  $W = 0,580 \text{ kg}$ , yatak malzemesi ağırlığı,

$A = 0,0123 \text{ m}^2$  yatak kesit alanı'dır.

Dağıtıcı elektteki basınç düşüşü

$$P_d = 0,1 \Delta P_B \text{ den}$$

$$\Delta P_d = 4,202 \text{ kg/m}^2 = 4,2 \text{ mm H}_2\text{O bulunur.}$$

$$\frac{\Delta P_d}{\Delta P_B} = \frac{4,2028}{42,028} = 0,1$$

Denklem (3.31) de verilen yaklaşım ile;

$$\frac{P_d}{P_B} \geq 0,01 + 0,2 \left[ 1 - \exp \left( -0,5 D_t / H_{mf} \right) \right]$$

$D_t = 0,125 \text{ m}$  ve  $H_{mf} = 0,205 \text{ m}$  için

$$\frac{\Delta P_d}{\Delta P_B} \geq 0,0157 \text{ doğruluğu görülür.}$$

## EK 2. DAĞITICI ELEK TASARIMI

Kunii ve Levenspeil (6) tarafından verilen dağıtıcı elek tasarım sırasına göre hesaplamalar yapılmıştır.

$$\Delta P_{d_{\min}} = (0,1 P_B)_{\max} ; 35 \text{ cm H}_2\text{O}$$

Dağıtıcı elektteki basınç düşüşü,  $\Delta P_d = 35 \text{ cm H}_2\text{O}$  sütunu olarak alınmıştır.

$$Re = \frac{D_t U_o \rho}{\mu} = \frac{(0,125\text{m})(2,5 \text{ m/s})(1,187 \text{ kg/m}^3)}{1,83 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}} = 20269,80$$

$C'_D = 0,6$  (referans (6)dan alınan Şekil (E2.2) den okunmuştur).

$$U_{or} = C'_D \left( \frac{2g_c \Delta P_d}{t} \right)^{1/2} = \left( \frac{2(981 \text{ gcm/g}_f \text{ s}^2)(35 \text{ cm})}{(1,187 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3)} \right)^{1/2} \times 0,6 = 45,64 \text{ cm/s}$$

$$U_{or} = 45,64 \text{ m/s} ;$$

$$\frac{U}{U_{or}} = \frac{2,5}{45,64} = 0,0547 ; \% 5,47$$

$$U = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 U_{or} N_{or}$$

$$N_{or} = \frac{4U}{(U_{or}) d_{or}^2} = \frac{4 \cdot 2,5}{3,14(45,64) d_{or}^2} , \quad N_{or} = \frac{0,0697}{d_{or}^2}$$

$$\text{Dağıtıcı elek kesit alanı, } A = \frac{\pi}{4} \left[ (12,5 \text{ cm})^2 - (2 \text{ cm})^2 \right] = 120 \text{ cm}^2$$

$$N_I = (120) N_{or}$$

$d_{or} = 2\text{mm}$  seçilmiştir.

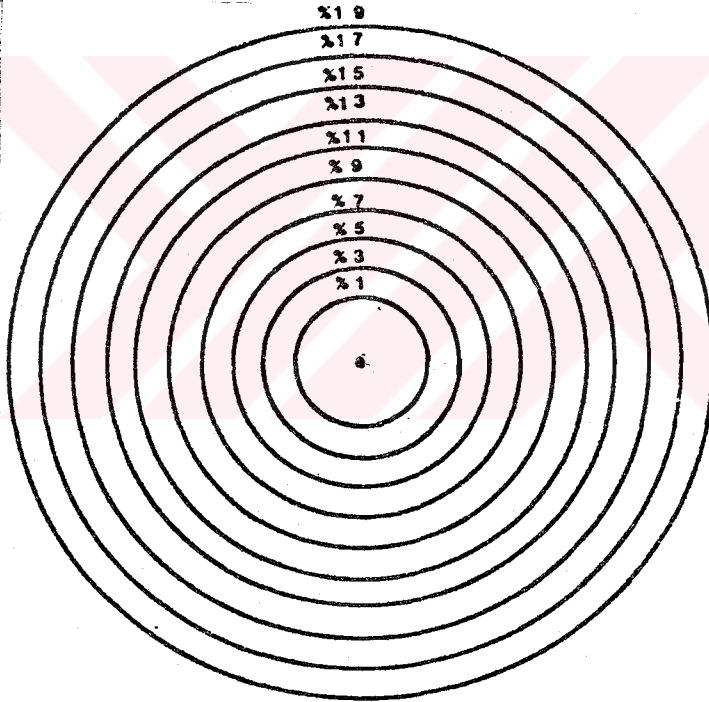
$$N_{or} = \frac{0,0697}{(0,2\text{cm})^2} \quad N_{or} = 1,743 \left( \frac{1}{\text{cm}^2} \right) \quad N_I = 209 \text{ (cm}^2\text{)}.$$

$d_{or} = 2\text{mm}$  olmak üzere

$$N_{or} = 1,743 \left( \frac{1}{\text{cm}^2} \right) \text{ den}$$

$$N_T = 209 (\text{cm}^2) 1,743 \left( \frac{1}{\text{cm}^2} \right) = 364,2 \text{ adet } 365 \text{ adet.}$$

$N_T = 365$  adet orifis deliği 2mm kalınlığındaki pleksiğlas plaka üzerine referans (32) de verildiği gibi dairesel çizilmiş ve deliklerin plaka üzerine dağılım yüzdeleri Şekil (E 2.1) de gösterilmiştir.



Şekil E 2.1. Dağıtıcı elek üzerine orifis deliklerinin diziliş yüzdeleri.

#### Ek.2.1. Geri Sirkülasyon Akışkanlaştırıcı Tasarımı

Geri sirkülasyon için akışkan yatak sistemi dikdörtgen boyutlarda tasarlanmış ve 0,10 m x 0,14 m x 0,10 m boyutlarında kurulmuştur.

$$\text{Eşdeğer yatak çapı} = 4 \frac{\text{Kesit alanı}}{\text{Çevre uzunluğu}} = 4 \frac{0,14 \times 0,10}{0,48} = 0,117 \text{ m}$$

Dağıtıcı elek tasarımı ise Ek 2'de verilen prosedüre göre yapılmıştır.

Geri besleme boş kolon akış hızı = 2m/s alınmıştır.

$$Re = \frac{D_t U \rho_g}{\mu} = \frac{(0,117 \text{ m})(2,5 \text{ m/s})(1,187 \text{ kg/m}^3)}{(1,83 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s})} = 18666,53$$

$C'_D = 0,6$  alınarak

$$U_{or} = C'_D \left( \frac{2g_c \Delta P_D}{g} \right)^{1/2} \quad U_{or} = 45,64 \text{ m/s.}$$

$$\frac{U}{U_{or}} = \frac{2,5}{45,64} = 0,0547 \quad \% 5,47$$

$$U = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 U_{or} N_{or}$$

$$N_{or} = \frac{4U}{U_{or} d_{or}^2} = \frac{4 \cdot 2,5}{3,14 \cdot 45,64 d_{or}^2} \quad N_{or} = \frac{0,697}{d_{or}^2}$$

$d_{or}$	0,15	0,20	0,25
$N_{or} \text{ 1/cm}^2$	2,48	1,395	0,893

Belirlenen orifislerden 0,25 cm orifis çapı seçilmiş ve toplam orifis sayısı

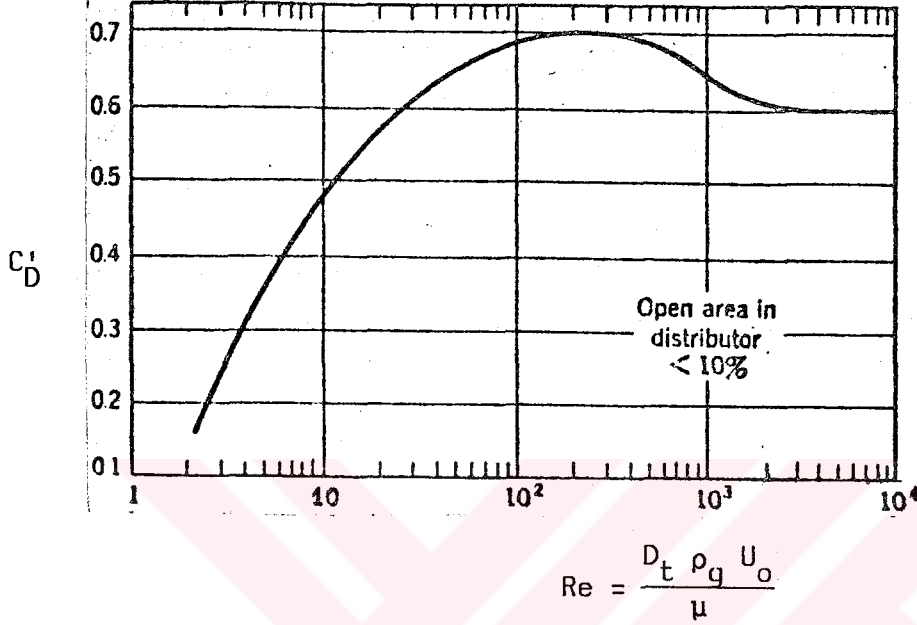
$N_T = (0,14 \text{ m})(0,10 \text{ m}) \times (1,115 \times 10^4 \text{ 1/m}^2) = 126,56$  156 adet orifis olarak hesaplanmıştır. Bu orifisler plaka üzerine eşkenar üçgen dizilişle sıralanmıştır.

Geri sirkülasyon hızı hesabında referans (6) da verilen yaklaşımla geri sirkülasyon hızı hesaplanmıştır.

$$G_s = U_o \quad s \quad (1-\epsilon)$$

$$G_s = \rho_p (1-\epsilon_{mf}) = 452,16 \text{ (kg/m}^3)(1-0,49) = 230,6 \text{ kg/m}^3$$

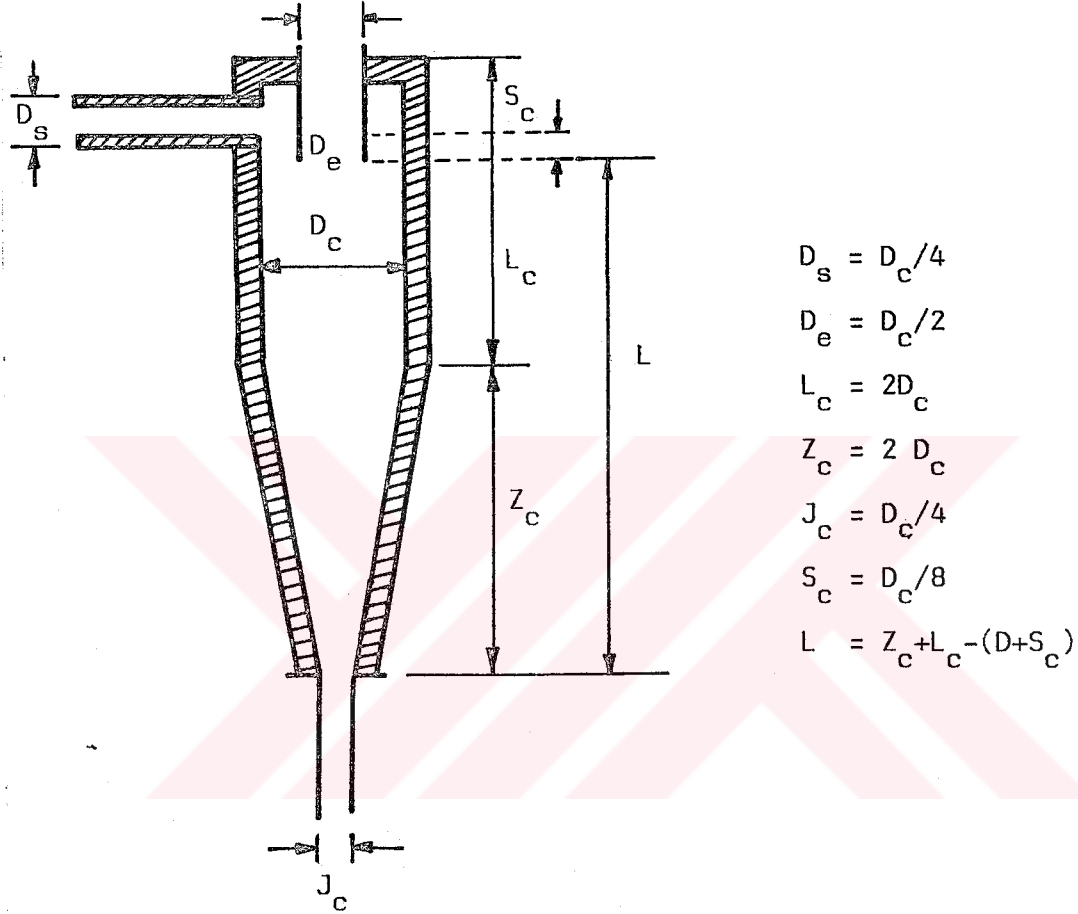
Tüm geri sirkülasyon şartlarında çalıştığı varsayılmıştır. Buna göre;  $G_s$   $294 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$  olarak belirlenmiştir. Burada boşluk hacim oranı  $\epsilon_{mf} = 0,49$  olarak alınmıştır.



Şekil E 2.2. Yatak çapına bağlı Reynolds sayısına karşılık gelen orifis katsayısı (6).

## EK 3. SIKLON TASARIMI

Siklon tasarımı için Byers ve Licht (43) tarafından verilen oranlar gözönünde tutularak Knowlton (36) 'un ortaya koyduğu prosedür izlenmiştir.



Şekil E 3. Siklon tasarım şeması

$$\text{Siklon giriş alanı} = \frac{\text{Yatağa giren havanın debisi}}{\text{Havanın siklona giriş hızı}} = \frac{\dot{q}_m}{U_{gs}} = A_s$$

$$\dot{q}_m = A_s U_{gs} = \frac{(0,125)^2}{4} 4,5$$

$$\dot{q}_m = 0,055 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_s = \frac{0,055 \text{ (m}^3/\text{s)}}{20 \text{ (m/s)}} = 2,76 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$V_{gs} = 20 \text{ m/s}$  alındı. normal olarak 6-21 m/s arasında bir giriş hızı ile çalışılır.

$$A_s = \frac{\pi D^2}{4} \rightarrow D = \sqrt{\frac{4A_s}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 2,76 \times 10^{-3}}{\pi}}$$

$$D = 0,059 \text{ m}$$

$$D = 59 \text{ mm} \approx 60 \text{ mm}$$

$D_s = 60 \text{ mm}$  için;

$$D_c = 4D_s \rightarrow D_c = 240 \text{ mm}$$

$$D_e = D_c/2 \rightarrow D_e = 120 \text{ mm}$$

$$L_c = 2D_c \rightarrow L_c = 480 \text{ mm}$$

$$Z_c = 2D_c \rightarrow Z_c = 480 \text{ mm}$$

$$J_c = D_c/4 \rightarrow J_c = 60 \text{ mm}$$

$$S_c = D_c/8 \rightarrow S_c = 30 \text{ mm}$$

$$L = z_c + L_c - (D + S_c)$$

$$L = 480 + 480 - (60 + 30)$$

$$L = 870 \text{ mm}$$

#### EK 4. HAVA ORİFİSMETRELERİNİN TASARIM HESAPLARI VE KALİBRASYON EĞRİLERİ

Hava hızlarının kontrolünde orifismetreler kullanılmıştır. Bu orifismetrelerin orifis çapları hesabı aşağıdaki bağlantıyla verilmiştir (42,50)

$$\beta^2 = \frac{4 M}{0,61 \pi D_a^2 \sqrt{2g_c (P_a - P_b) \rho}} \quad (E 4.1)$$

Birincil hava orifis çapı hesabı :

$$D = 0,105 \text{ m}$$

$$\rho_a = 1,187 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{\text{hava}} = (8 \text{ m/s}) \left( \frac{\pi}{4} \right) ((0,105)^2 (\text{m}^2)) = 0,070 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$m = (0,070 \text{ m}^3/\text{s})(1,187 \text{ kg/m}^3) = 0,0831 \text{ kg/s}$$

$$P_a - P_b = 10 \text{ cm H}_2\text{O} = 980,6 \text{ (30}^\circ \text{ eğik monometrede 20 cm H}_2\text{O)}$$

$$g_c = 1 \frac{\text{kg m}}{\text{N s}^2}$$

Eşitlik (E 3.1) den çap oranı,  $\beta$  hesaplanarak orifis çapı aşağıda verildiği gibi belirlendi.

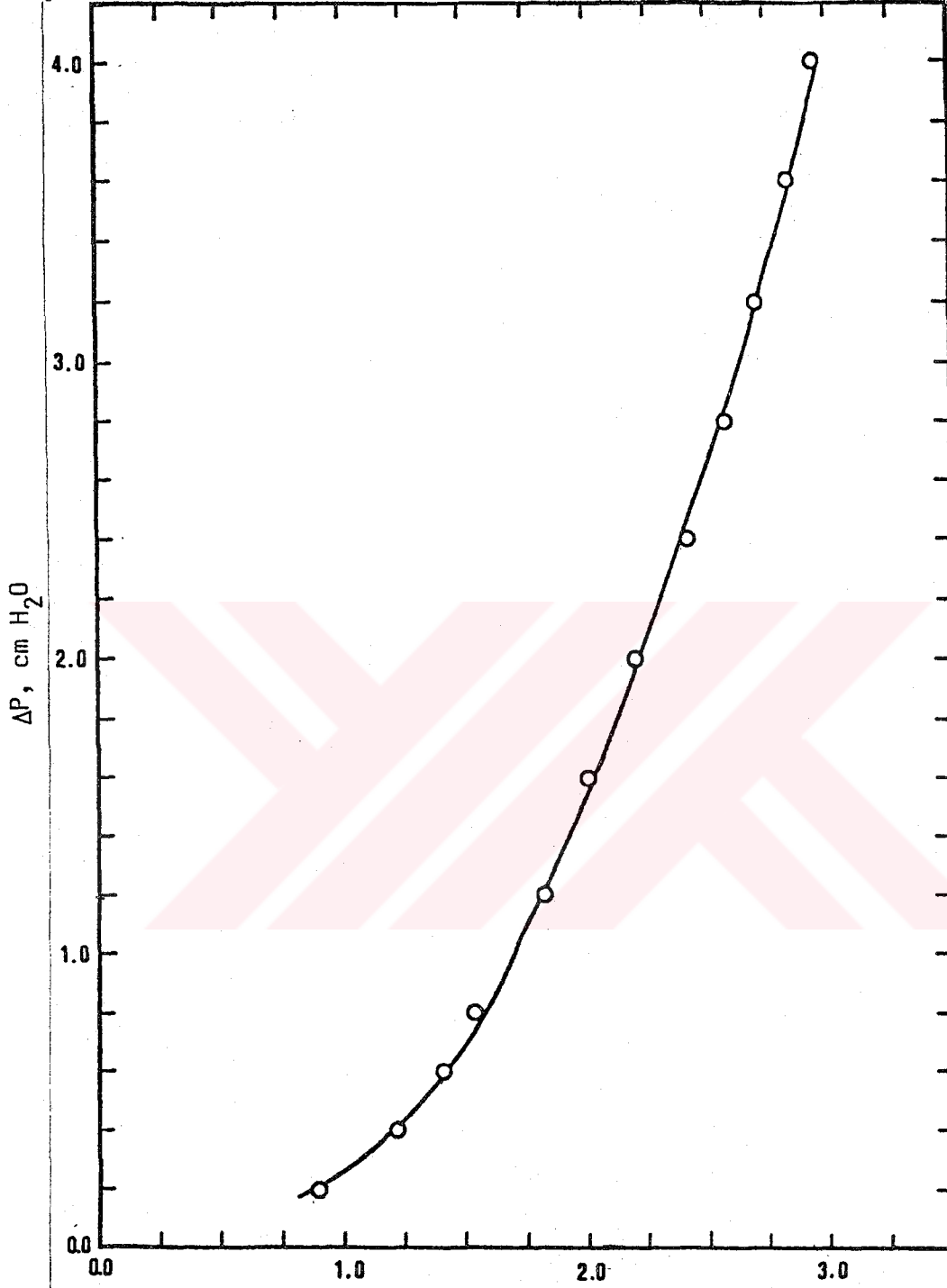
$$\beta = 0,571$$

$$d = \beta \cdot D \quad d = 0,06 \text{ m}$$

Aynı hesaplama yöntemiyle ikincil hava orifismetrelerinin orifis çapları hesaplanarak aşağıda verildi.

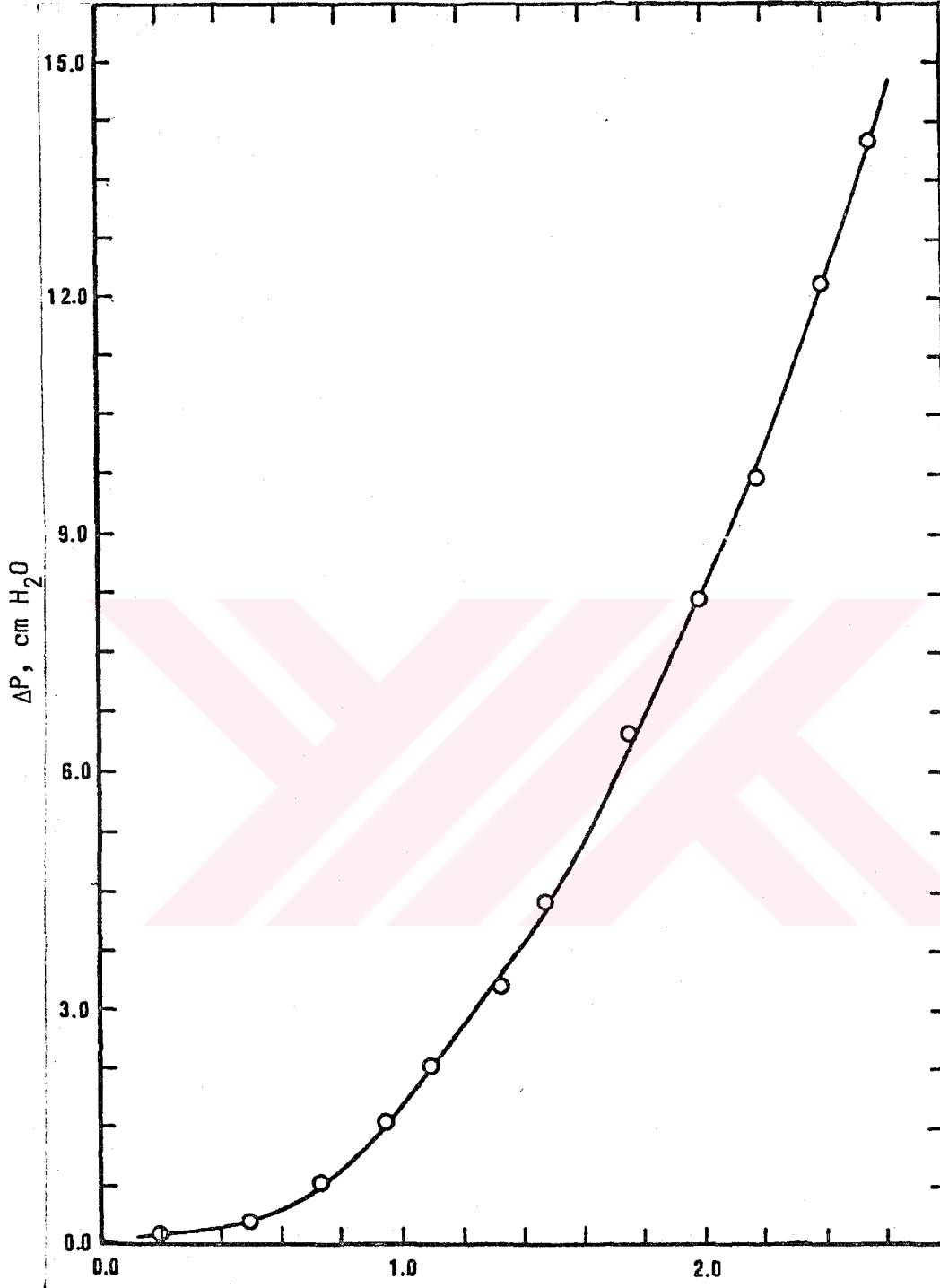
$$\text{İkincil hava orifis çapı } D = 0,053 \text{ m, } d = 0,03 \text{ m}$$

Orifismetrelerin manometre vanaları, üst akım tarafında boru çapının bir katı, alt akım tarafında boru çapının 0,5 katı olarak alınmıştır.



Boş kolon hava akış hızı, m/s

Şekil E.4-a Birincil hava orifismetresi kalibrasyon eğrisi  
(Orifis çapı,  $d=0,06$  m).



Boş kolon hava akış hızı, m/s  
Şekil E.4-b İkincil hava (geri döngü) orifismetresi kalibrasyon eğrisi (Orifis çapı  $d=0,03$  m).

## EK 5. ELEK ANALİZİ İLE ORTALAMA TANE BÜYÜKLÜĞÜNÜN BELİRLENMESİ

Kendir için (500 gr)

Elek çap aralığı (mm)	Numune ağırlığı (gr)	$(x/d_p)_i$
0 - 0,9	0	
0,9 - 1	1	0,00211
1 - 1,6	62	0,09538
1,6 - 2,38	69	0,06935
2,38- 3,15	107	0,00740
3,15- 4,0	261	0,14601

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum_i (x/d_p)_i} = 2,562 \text{ mm}$$

Perlit için (50 gr)

Elek çap aralığı (mm)	Numune ağırlığı (gr)	$(x/d_p)_i$
0 - 0,071	0	
0,071- 0,1	1,6211	0,37920
0,1 - 0,2	4,6710	0,62280
0,2 - 0,25	4,2398	0,37687
0,25 - 0,4	6,2709	0,38590
0,4 - 0,71	26,5792	0,95781
0,71 - 0,9	5,820	0,14459
0,9 - 1	0,798	0,01680


$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum_i (x/d_p)_i} = 0,347 \text{ mm}$$

Kepek için (200 gr)

Elek çap aralığı (mm)	Numune ağırlığı (gr)	$(x/d_p)_i$
0 - 0,16	0	
0,16 - 0,25	3,05	0,07439
0,25 - 0,40	5,16	0,07938
0,40 - 0,95	180,92	1,34015
0,95 - 1,0	10,87	0,05574

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum_i (x/d_p)_i} = 0,645 \text{ mm}$$

**T. C.**  
**Yükseköğretim Kurulu**  
**Dokümantasyon Merkezi**



Ö Z G E Ç M İ Ş

## ÖZGEÇMİŞ

1963 yılında Samsun'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara'da tamamladıktan sonra 1981 yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde yüksek öğrenimine başladı. 1986'da mezun olarak aynı yıl Makina Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalında yüksek lisans programına girdi. 1987-1989 yılları arasında Gazi Üniversitesi Enerji-Çevre Sistemleri ve Endüstriyel Rehabilitasyon Araştırma Merkezi'nde proje mühendisi olarak görev yaptı. Burada Devlet Planlama Teşkilatı adına yürütülen EFOM-12C Enerji Arz Modelinin Türkiye'ye Uygulanması projesi'nde çalışmalarını sürdürdü.

Yüksekoğretim Kurulu  
Dokümantasyon Merkezi

Leyla Mutlu

Örnek Mah. 1280 Konutlar

C/12 Blok, Daire 11

ANKARA

Tel.: 347 64 51