



Damıtma kolonu tasarımı: Dolgulu kolon tasarım modellerinin karşılaştırılması

Aynur Şenol*

İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 34320, Avcılar, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Damıtma kolonu tasarımı
- Dolgulu kolon tasarımına ilişkin fiziksel ölçütler
- Dolgulu kolon tasarım modellerinin istatistik analizi

Makale Bilgileri

Tarama Makalesi
Geliş: 11.12.2015
Kabul: 04.05.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.337614

Anahtar Kelimeler:

Damıtma kolonu,
tasarım,
dolgulu kolon,
modelleme

ÖZET

Şekil ve dış yüzey alanı itibarı ile farklı kütle iletimi etkinliğine sahip çeşitli geometrik yapıdaki raflar (tepsiler) ve dolgu maddeleri ayırma aracı olarak damıtma kolonlarında kullanılmaktadır. Uygun bir damıtma kolonu seçimine dönük stratejik tasarım etkenleri geniş literatür veri topluluğu çerçevesinde irdelenmiş ve ilgili temas araçlarının işletme özellikleri karşılaştırılmıştır. Tasarım uygulamalarında tanımlanması gereken en belirleyici etkenler ise fazlararası kütle transfer alanı, ayırma etkinliği, basınç düşmesi ve buhar kapasitesidir. Bu temel tasarım nicelikleri ışığında, tepsili tertibatlar ile gelişigüzel yerleştirilmiş ve düzgün istiflenmiş dolgulara ilişkin genel tasarım modelleri tartışılmıştır. Genellikle, değerlendirme kapsamına giren dolgulu kolon tasarım modelleri film veya penetrasyon teorisine dayanır. Bu bağlamda, dolgulu kolon tasarımına ilişkin en çok kullanılan modellerin hesapsal tahminleri karşılaştırılmıştır. Burada konulan ana hedef ise, dolgulu kolon tasarım modellerinin güvenilirlik seviyelerinin tanımlanmasıdır. Bu genel amaçlı tasarım yaklaşımları ilgili tablolarda gösterilmiştir.

Design of a distillation column: Comparison of packed column design models

H I G H L I G H T S

- Design of a distillation column
- Physical criteria for designing a packed column
- Statistical analysis of packed column design models

Article Info

Review Article
Received: 11.12.2015
Accepted: 04.05.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.337614

Keywords:

Distillation column,
design,
packed column,
modeling

ABSTRACT

Various geometrically constructed packings and plates are commonly used as separating tools in distillation columns since they possess different mass transfer efficiency due to their shape and surface properties. The strategic design factors required for the selection of a proper distillation column have been analyzed on the basis of a large literature data bank and the operating properties of relevant contacting tools have been compared. In the design practice, the mass transfer interfacial area, the efficiency, the pressure drop and the vapor capacity are the most promising factors that need to be characterized. In view of these design factors, the common design models covering plate devices, and random and structured packings have been discussed. The evaluated packed column design models are generally dependent on the film or penetration theory. In this regard, the predictive performances of the most useful models for the packed column design have been compared. Here, the main goal is placed on the description of the confidence levels of packed column design models. These common design approaches are presented in the relevant tables.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz kimya teknolojisinde en çok kullanılan ve en önemli termik ayırma işlemlerinden biri damıttır. Damıtma işleminin itici gücü ise ayrılması gereken karışımdaki bileşenlerin uçuculuklarının birbirinden farklı olmasına dayanır [1]. Ayırma için gerekli enerjinin diğer birçok işlemlere kıyasla en dolaysız şekli ile kullanılması, ayrılması istenen bileşenlerin kaynama noktaları arasında farklılıklar olduğu sürece, en ekonomik ayırma işlemi olarak pek çok kere damıtmayı gerektirir [2]. Kademeli ayırma işlemi için tasarımılanan damıtma cihazları, Raoult kanunu uyarınca normal homojenli sıvı karışımları, özel azeotropik karışımları veya yakın kaynama noktalı bileşenlerden oluşan karışımların saflaştırılması bakımından diğer teçhizat türlerine tercih edilir [3]. Bu son iki uygulamada damıtma işleminin yüksek kütle iletim hızları ile sürdürülebilir olması için sıvı karışımına yardımcı ayırma ajanı olarak tuz veya iyonik sıvıların katılımına ihtiyaç vardır. Bundan başka, azeotropik bileşimler basıncın fonksiyonu olduğundan basıncın artması ile $y-x$ denge diyagramındaki minimum azeotropik (mümtaz) nokta aşağı doğru kayar; böylece, seri bağlı olan kolonlardan biri normal basınç veya düşük basınçta diğeri daha yüksek basınçta çalıştırmak suretiyle azeotrop oluşturan bileşenleri birbirinden ayırmak mümkün olur ve düşük basınçta çalışan kolon altından zor uçucu bileşen, yüksek basınçlı kolon altından da kolay uçucu bileşen alınır [4]. Faz denge münasebetlerine değişik difüzyon mekanizmaları ile kontrol edilen kütle transfer hızlarına dayanarak, sıvı karışımlarını ayırmak için dolgu, raflı, püskürtmeli, karıştırma ve ıslak-duvar kolon tipleri kullanılmaktadır [5]. Kademeli damıtma cihazlarının tasarımında genellikle iki hedef konulmaktadır: 1) fazlar arasında geniş bir temas yüzeyi ile ısı ve madde alışverişi için diğer lehte şartlar sağlamaktır, 2) aşırı kolon basınç düşmesi olmadan kararlı operasyon koşulları altında optimum karışım miktarlarını işleme sokmaktır [6]. Ayırma etkinliği bakımından raflı kolonlarda, herbir tepsi elemanı ideal bir denge derişimi basamağını temsil etmektedir. Dolgu yatağı boyunca sıvı ile buhar arasında sürekli temas olanağı sağlayan dolgu kolonlar ise diferansiyel kolonlar olarak tasarlanmaktadır [7]. Sürekli temas ortamında fazlar arasındaki ısı ve kütle alışverişi özel yapıdaki dolgu maddelerinin yüzeyinde gerçekleşmektedir. Ayırma etkinliği, kapasite, maliyet vs. gibi ölçütlere dayalı olarak damıtma kolonları karşılaştırıldığında, ikili sistem yapısını gözetmeksizin eşdeğer operasyon şartları için 4 ft çapındaki kampanalı ve 12 in çapındaki sübaplı tepsili kolonların Raschig halkası, Berl eyeri veya Intalox eyeri ile donatılmış dolgu kolonlara kıyasla yaklaşık %15-%40 oranında daha yüksek kapasite ve daha geniş buhar yükü çalışma aralığı (çalışma esnekliği veya fleksibilite) sergiledikleri görülmüştür [7]. Dolgu kolonlar ise vakumu gerektiren uygulamalarda etkin olmaktadır [8]. Intalox eyeri ve yeni tip iç ve dış dolgu yüzeyleri boyunca çok yönlü sıvı-buhar temas olanağı sağlayan dolgu yapıları ise, diğer dolgulara kıyasla daha üstün ayırma etkinliği sergilemekte olup yaklaşık %20-%40 kadar daha küçük HETP (teorik tepsiye eşdeğer dolgu

tabakası yüksekliği) değerleri vermektedir [9]. Benzer buhar yüklenme faktörü ($F = u_G \rho_G^{0.5}$) temeline göre yapılan karşılaştırmalarda ise, %85-%90 boğulma oranı bölgesi için tepsili kolonlara ilişkin HETP'nin dolgu kolonlarınkine oranla yaklaşık 2 kat daha büyük olduğu ve geniş bir buhar yükü çalışma aralığında oldukça sabit kaldığı görülmüştür [7]. Dolgu kolonlar, köpük yapma eğilimi gösteren yakın kaynama noktalı karışımların veya ısıya duyarlı korozif ve viskoz maddelerin saflaştırılması bakımından tepsili kolonlara tercih edilir [10]. Dolgu maddesi daha az sıvı tutunması ve daha küçük basınç düşüşü sağladığı için vakum uygulamalarında tepsilere tercih edilir. Kanallaşma sorunları yüzünden çapı 1,2 m'den büyük kolonlarda dolguların kullanılmaması tavsiye edilir. Buna karşılık, pratikçe çapı 60 cm'den daha küçük olan kolonlar dolgu maddeli olarak seçilmelidir. Zira küçük çaplı raflı kolonların yapımı zordur [11].

2. DAMITMA KOLONU TASARIM ÖLÇÜTLERİ (DESIGN CRITERIA FOR A DISTILLATION COLUMN)

Bolles ve Fair [6] endüstriyel ölçekli uygun bir damıtma sistemini tasarımılabilmek için algoritmalarca belirlenmesi gereken 7 temel tasarım büyüklüğünü öngörmektedir: 1) buhar akış hızı (normal ve boğulma şartlarında) 2) sıvı akış hızı 3) kolondaki basınç derecelenmesi 4) temas sisteminin ayırma etkinliği (HETP) 5) birim teçhizat hacmi başına maliyet 6) temas sisteminin işlemsel esnekliği/fleksibilitesi (fleksibilitesi yüksek olan sistemlerde HETP geniş bir buhar yükü aralığında değişmemektedir) 7) tasarım yönteminin güvenilirliği. Bazı hallerde ısı iletimi gereçleri, korozyon etkenleri, ikili sistemin ısıya karşı duyarlılığı gibi etkenleri de karşılaşılan münferit şartlara bağlı olarak değerlendirilir. Bu ölçütler uyarınca Wagner vd. [9] tarafından yapılan karşılaştırmada ise, yüksek etkinliğe sahip dolgu iç ve dış yüzey bölgelerinde akış olanakları sağlayan yeni tip modern dolgu maddelerinin diğer dolgulara kıyasla yaklaşık %60-%80 oranında daha randımanlı çalıştıkları görülmüştür. Dünyada en modern geometrik yapıdaki tepsiler ve dolgu maddeleri ve bunlara ait tasarım algoritmaları Koch-Glitsch uluslararası imalatçı kuruluş tarafından geliştirilmektedir. Kapasite ve etkinlik dışında temas sisteminin seçimini belirleyen başka önemli unsur da tesis masraflarıdır. Fiyat büyük ölçüde malzemenin seçimine bağlıdır. Bu durumda, dolgu faktörü $F_p = a_p/\varepsilon^3$ değerine bağlı olarak farklı dolgu malzemeleri için Eckert'in [10] teklif ettiği Ekonomi Faktörü ($E_c = F_p^{0.5} \times \$/ft^3$ dolgu) fiziksel ölçüt olarak kullanılabilir. Petrokimya endüstrisinde belli bir ayırmanın maliyetini düşürebilmek için başta sübaplı, kampanalı (fanuslu) ve delikli tepsiler olmak üzere değişik tepsi türleri kullanılmaktadır [11]. Raflı kolonlarda buhar ve sıvı arasındaki temas alanını arttırabilmek ve sistemi dengede tutabilmek için tepsilerin yanı sıra yardımcı elemanlara da ihtiyaç vardır. Bunlar akma boruları, giriş-çıkış setleri ve sıçrama engelleridir. Delikli veya kampanalı tepsilerde delik veya kampana çapı küçüldükçe ayırma etkinliği artmakta ve normal işletmede çalışılan buhar hızı aralığı genişlemektedir.

Ancak, kalın levhalara küçük deliklerin veya kampanaların yerleştirilmesinde de teknik zorluklar mevcuttur. Deliklerin veya kampanaların düzenlenmesi iki türlü olur: ya kare (square pitch) ya da üçgen (triangular pitch) yerleşim düzeni kullanılır [2]. Pratikte genellikle üçgen yöntemi uygulanmaktadır. İki deliğin veya kampananın merkezleri arasındaki mesafe delik veya kampana çapının 1 ile 5 katı arasında değişir. Deliklerin veya kampanaların serbest alan yüzdesi ise, kolon kesit alanının %5-%15'i kadardır. Endüstriyel delikli tepsilerde delik çapları 2 ile 25 mm arasında değişebilir; fakat en yaygın seçilen delik çapları 3-9 mm arasındadır [2]. Paslanmaz çelik veya bakır malzemesinden imal edilen tepsi levhalarının kalınlığı genellikle delik veya kampana çapının 1/2'si ile 1/3'ü arasında sınırlıdır. Toplama setleri (veya giriş-çıkış setleri, inlet-outlet weirs) ise tepsi üzerinde belli bir sıvı yüksekliğini temin eden yardımcı tepsi tertibatlarıdır. Tepsidede tutulan sıvının dinamik yüksekliği, buharın tepsiye giriş noktasının (delikli veya sübaplı tepsinin yüzeyi ya da kampanadaki yarığın tepesi) üzerindeki sıvı yüksekliğine eşdeğerdir [12]. Uygulanan vakum veya normal işletme şartlarına göre set yükseklikleri 3 ile 10 cm arasında değişebilir [13]. Tepsili temas sistemlerinde, sıvı karışımı aşırı sıçrama veya köpüklenmenin olduğu bir özellikte ise çıkış seti yanında sıçrama engelleri (splash baffles) bulundurmamak yaygın bir uygulamadır [14]. Tepsiler arasındaki mesafenin (T_s) küçük kolonlarda 30 cm, ticari kolonlarda 60 cm ve büyük vakum kolonlarında da 120 cm boyutunda olması tavsiye edilir [2].

Sıvı akışının bir tepside bir alt tepsiye iletilmesini sağlayan akma boruları (downcomers) tekli veya çoklu dairesel demet şeklinde tasarlanırlar [14]. Akma borusunun kapasitesi (m^3 akan sıvı/zaman×boru kesit alanı), köpüklenmenin olduğu sistemler için 6-9 cm/s civarında tutulur, köpüklenmenin olmadığı sistemler için ise 18 cm/s'ye kadar yükseltilir. Akma borusunun alt ucunun bir alttaki tepsiye olan mesafesi 6-12,5 mm olarak tutulur; fakat akışa fazla direnç göstererek taşmaya neden olmaması için de bu mesafenin 12,5 mm'den daha az olmaması tavsiye edilir [2]. Esasen aynı etkinliği sürdürdüğünde kampanalı ve sübaplı tepsilerden daha yüksek kapasiteli olmalarına rağmen, delikli tepsilerin tasarımı oldukları işletme şartlarından daha düşük buhar hızları ile çalışılması pratikçe uygun değildir [15]. Tepsili damıtma kolonlarının en büyük kusuru ise tasarımı oldukları buhar hızının altında çalıştırıldıkları takdirde “boşalma” (dumping) veya “ağlama” (weeping) olarak tabir edilen, sıvının tepsi boşluk alanından serbestçe aşağıya akması olayının cereyan etmesidir [2]. Boşalma, tepsideki sıvı hidrostatik basıncı, bu sıvıyı tepside tutan buhar basıncına eşit olduğu zaman meydana gelir. Ağlama ise, buharın delik veya kampana çıkışında yarattığı vakum nedeniyle, bir kısım sıvının buhar yolunu takip ederek alt tepsiye sızması ile başlar. Tepsi veriminin düşmesine yol açan bu iki olayın önlenmesi için (i) delik veya kampana çapının küçük tutulması, (ii) tepsi kalınlığının artırılması, (iii) belli bir tepsi düzenine ilişkin minimum buhar kütleli hızının (V_m) tasarımı gerekmektedir [11]. Tepsili damıtma sistemine ilişkin diğer önemli işletme parametresi de işletme koşullarında boğulma meydana getiren

maksimum (boğulma) buhar hızıdır (U_f). Pratikte, bu fiziksel kısıtlamaların yarattığı etkileri karşılayabilmek için optimum bir tepsili kolon tasarımı gerektirir [16]. Tipik bir delikli veya kampanalı tepsili kolon tasarımında uygulanan hesapsal işlemler ana hatlarıyla Kister [2] ve Chohey [11] tarafından verilmiştir: i) Normal delikli tepsili kolonlarda deliklerin toplam alanı kolon kesit alanının %8-%15'i kadar seçilir, delik çapları (d_{ho}) ise 2-4 mm alınır, delikler arasındaki mesafe $t_{ho} = (2,5 \div 4)d_{ho}$ (mm) denklemi ile hesaplanır; ii) Akma boruları ile toplama setlerinin alanları kolon kesit alanının %10'u kadardır; iii) Deliklerin toplam açıklık oranı $\psi_{ho} = 0,9(d_{ho}/t_{ho})^2$ denklemi ile hesaplanır, akma ve toplama setlerinin alanları da dikkate alınırse tepsinin toplam açıklık oranı $\psi_t = 0,8\psi_{ho}$ bulunur; iv) Bir tepsideki delik sayısı $n_{ho} = ((d_{ho})_E/d_{ho})^2$ eşitliği ile hesaplanır, ($d_{ho})_E$ deliklerin hepsine ait eşdeğer çaptır; v) Buhar yükleme F -faktörü $F = u_v \rho_v^{0,5}$ denklemi ile hesaplanır, burada u_v (m/s) buhar yüzeysel hızı, ρ_v (kg/m^3) buhar yoğunluğudur (Almanca kaynaklara göre F 'nin hesabı için $F = 4,5 \times 10^{-3} T_s^{1/2} / d_{ho}^{1/5}$ yaklaşımı kullanılabilir, T_s (mm) raflar arasındaki mesafedir); vi) Kolondaki buhar hızı $u_{v,k} = F[(\rho_L - \rho_v)/\rho_v]^{0,5}$ m/s olarak hesaplanır, ρ_L ve ρ_v sıvı ve buhar yoğunluklarıdır; vii) Deliklerdeki buhar hızının hesabı için $u_{v,ho} = 10/\rho_v^{0,5}$ eşitliği kullanılabilir; viii) Akma setindeki sıvının akış hızı kütle denkleğinden türetilmiş olan $u_{L,d} = LM_L/(A_0 \rho_L)$ eşitliği ile hesaplanabilir, kolondaki sıvı miktarı $L = r \times D_{out}$ eşitliği ile hesaplanır, r reflüks oranı, D_{out} destilat miktarı, M_L sıvı karışımının ortalama molekül ağırlığı, A_0 akma setinin kesit alanı $A_0 \approx 0,1A_k$, A_k kolon kesit alanıdır; ix) Bu verilerden hareketle kolonlardaki maksimum buhar hızı (boğulma hızı) U_f ve minimum buhar kütleli debisi V_m hesaplanır, $V_m = (\rho_L u_{v,ho} / M_L) \{ C' d_k - [LM_L / (u_{L,d} \rho_L)]^{0,5} / 3 \}^2$, $C' = 53,17$ katsayı, d_k (m) kolon çapıdır, $U_f = C(\sigma/20)^{0,2} [(\rho_L - \rho_v)/\rho_v]^{0,5}$, C katsayısının değeri [11] nolu kaynaktan bulunur, σ sıvı faz yüzey gerilimidir. Raflı kolonların mühendislik tasarımı %60 boğulma oranına göre yapılır [11]. Diğer bir deyimle, tepsi türü ve model güvenilirliğine ilişkin emniyet katsayılarının katılımıyla $0,6U_f$ buhar hızı için kolon çapı d_k hesaplanır.

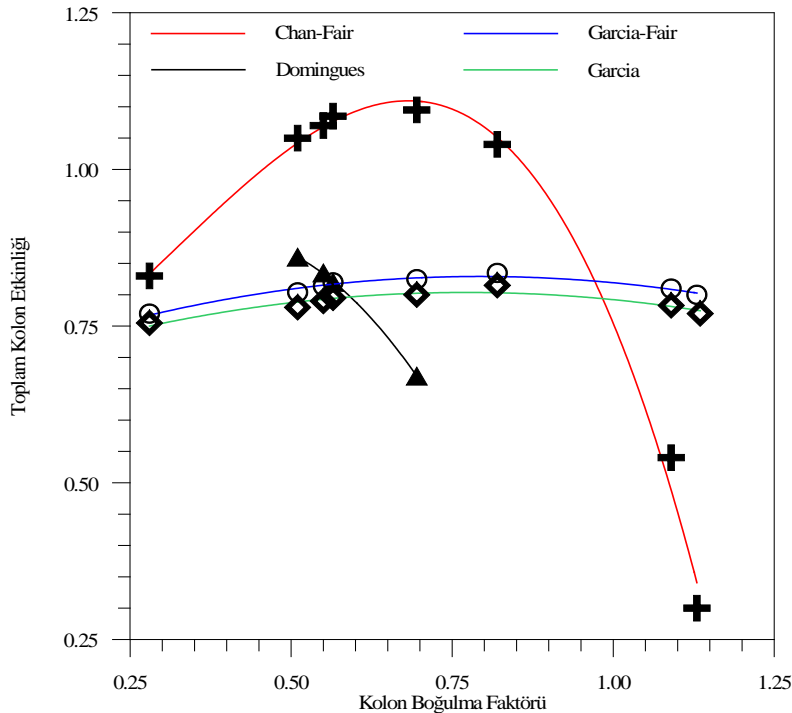
Yukarıda verilen tasarım eşitliklerinin büyük bir kısmı kampanalı tepsili kolonlar için de geçerlidir. İstisnai durumlar için kampanalara özel olarak uyarlanan tasarım eşitlikleri kullanılır: i) F faktörü için $F = 0,05(T_s - d_{kam})^{1/2} / d_{kam}^{2/3}$ denklemi kullanılabilir. T_s (mm) tepsiler arasındaki mesafe, d_{kam} (mm) kampana çapıdır ii) Tepsideki toplam kampana sayısı $n_{kam} = 3[(d_k/6d_{kam}) + 1]^2 + 1$ eşitliği ile hesaplanabilir d_k (m) kolon çapı, d_{kam} (mm) kampana çapıdır. Bundan başka tepside meydana gelen basınç düşmesi, temas sisteminin maliyeti ve işlemsel esnekliği/fleksibilitesi, tasarım yönteminin güvenilirliği vs gibi etkenlerin de algoritmalarca belirlenmesi gerekmektedir. Diğer raflı kolon türlerine ilişkin hesap yöntemleri ise Kisler [2], Seader ve Henley [4], Chohey [11], Xu vd. [12], Garcia ve Fair [13], Domingues vd. [15], Noriler vd. [16], ve Taylor [17] isimli kaynaklarda verilmiştir. Dolgulu kolonlarda dolgu yüzeyinde sağlanan sürekli gaz-sıvı teması çeşitli kampanalı, delikli veya sübaplı tepsiler aracılığıyla kesikli, tesirli kademeler halinde de

gerçekleştirilebilir. Herbir tepside dengeye ulaşıldığı kabul edilerek, Raoult kanunu uyarınca saflaştırmak için gerekli olan teorik tepsi sayısı $y/(1-y) = \alpha x/(1-x)$ bağıntısından türetilir [2]. Burada α bağıl uçuculuk, x ve y ise bileşenin sıvı ve buhar fazındaki mol kesirleridir. Ancak pratikte ideal dengeye ulaşmanın mümkün olmadığı için bulunan teorik tepsi sayısı pratik geçerliliği olan ortalama bir tepsi randıman katsayısı (toplam etkinlik faktörü) E_0 ile bölünerek gerçek denge durumları sayısına geçilir ($E_0 = N_{\text{teorik}}/N_{\text{gerçek}}$). Tepsie ilişkin bireysel ayırma etkinliği ise Murphree etkinlik faktörü ile belirlenir, $E_M = (y_A^s - y_A^g)/(y_A^* - y_A^g)$; burada, y_A^g ve y_A^s tepsi girişi ve çıkışındaki A bileşenin buhar fazı mol kesirleri, y_A^* ise dengedeki A bileşenin mol kesridir [11].

Ancak, kolon boyunca kütle aktarım dirençleri ve dolayısıyla, Murphree etkinliği de tepside tepsiye önemli değer değişiklikleri göstermektedir. Bu bağlamda, optimum bir E_M değerini tasarımılabilmek için buhar ve sıvı akış hızları, toplama seti yüksekliği, delik veya kampana çapı, tepside sıvının izlediği yol, sıvı fazın yüzey gerilimi ve tepsinin toplam açıklık oranı gibi etkenlerin algoritmalarca belirlenmesini gerektirir. Garcia ve Fair [13] ise, raftaki sıvı-buhar dispersiyonunun konumu itibarıyla üç farklı hidrodinamik rejimle geliştiği varsayımdan hareketle, film kökenli kolon etkinliği modelleri geliştirmiştir. Genellikle, büyük ticari kolonların mühendislik tasarımına dönük toplam etkinlik faktörü $E_0 = 0,6$ (%60) olarak alınmaktadır [4]. Ancak, pratik uygulamalarda başka bir E_0 değeri de seçilebilir. Zira, tepsi özelliğine özgün E_0 değeri değişken olmakla birlikte, belli bir ayırma ve sistem için güvenilir bir etkinlik değeri de teorik yoldan tahmin etmek oldukça zordur [11]. Bu bağlamda, Domingues vd. [15], tepsideki fazların

akış düzenine göre çapraz akışlı sübaplı ve zıt/çift yön akışlı raflı (dualflow tray) kolonların toplam etkinliklerine ilişkin deneysel veriler ile film kökenli teorik model sonuçları karşılaştırmıştır. Şekil 1'de görüldüğü gibi, sübaplı tepsiye ilişkin dört ayrı modelin öngördüğü toplam kolon etkinliği değerleri arasında büyük farklılıklar gözlemlenmektedir ki bu durum model güvenilirliği açısından tasarım hatalarına yol açmaktadır [15].

Buna karşılık, raflı kolondaki hidrodinamik akış rejimine bakılmaksızın teorik yaklaşımların öngördüğü optimum E_0 değeri de yaklaşık olarak %64'dür [16]. Söz konusu modellerin uygulama alanlarını sınırlayan başlıca unsurlar ise tepsi yapısı, işleme tabi tutulan sıvı karışımının fiziksel özellikleri, tepsideki sıvı akımının izlediği yol ve çalışma rejimine ilişkin kütle, momentum ve enerji denklemleridir [17]. Bütün bu etkenler uyarınca, Noriler vd. [16]'nın geliştirdiği akışkan dinamiği modeli aracılığıyla delikli tepsili bir kolonun nokta ve toplam etkinlikleri ile bileşen ve sıcaklık profillerini teorik olarak tahmin etmek hasıl olmuştur. Bu model, diğer yaklaşımlara oranla deneysel tepsi etkinliği ölçümlerine daha yakın sonuçlar vermektedir. Bütün bu bilgiler ışığında, model emniyet faktörlerini de kullanarak tepsili kolon tasarımı yapılmalıdır. Günümüzün mevcut gelişme düzeyinde, ticari damıtma kolonlarının mühendislik tasarımı film veya penetrasyon teorisine dayalı genel amaçlı algoritmalar vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Genellikle, sistem etkenleri, akış şartları ile ilgili etkenler ve fiziksel etkenler olarak 3 temel tasarım ölçütü çerçevesinde damıtma kolonlarının randımanları ve işletme özellikleri karşılaştırılmaktadır [4]. Sonuç olarak, belirli özelliklere sahip bir damıtma düzeneğini tasarımılabilmek için çok



Şekil 1. Sübaplı tepsili kolona ilişkin değişik tasarım modellerinin öngördüğü toplam etkinlik değerlerinin karşılaştırılması [15] (Comparison of the total efficiency values predicted by different design models relative to a valve tray column [15])

sayıda değişkenin bağlı etkilerinin istatistik analizi gerekmektedir (Tablo 1). Tablo 1'deki veriler ışığında en uygun kolon tipinin seçimi için sistem, akış ve maliyet

ölçütleri olmak üzere çok değişkenli değerlendirmeyi kapsayan optimum etkenler matrisinin oluşturulmasına dayanır. Genel olarak, tepsili kolonların tasarımı ve bakımı

Tablo 1. Damıtma kolonlarına ilişkin işletme özelliklerinin karşılaştırılması [1]
(Comparison of the operating properties of the distillation columns [1])

Etken ^a	Rafli kolon			Dolgu kolon	
	Delikli / Sübaplı tepsi	Kampanalı tepsi	Çift yön/Zıt akışlı tepsi	Gelişigüzel yerleştirilmiş dolgular	Örgü tipi istiflenmiş dogular
I. Sistem Etkenleri					
Kolon çapı: < 1 m	1	1	1	3	2
1-3 m	3	2	2	2	2
> 3 m	3	1	2	2	1
Isıya duyarlı sistem	2	1	2	3	0
Kirletici-tıkayıcı sistem	2	1	3	1	0
Korozif sistem	2	1	2	3	1
Viskoz sistem	2	1	1	3	0
İçten soğutmalı sistem	2	3	1	1	0
Köpük yapan sistem	2	1	2	3	0
Yakın kaynayan sistem	1	1	1	3	1
Süspansiyon sistemi	2	1	3	1	0
Çalışma basıncı:					
< 20 kPa	2	1	0	2	3
20-101,3 kPa	3	2	1	2	1
> 101,3 kPa	3	2	2	2	0
II. Akış Etkenleri					
Yüksek fleksibilite	2	3	1	1 ^b	2
Küçük basınç düşmesi	1	0	0	2	2
Düşük sıvı debileri	1	3	0	1	2
Yan akımlar olanakları	3	3	2	1	0
Sıvı tutunması	yüksek	yüksek	yüksek	küçük	küçük
Yüksek kapasite	2	0	2	2	3
III. Fiziksel Etkenler					
Bakım	kolay ^c	kolay ^c	kolay ^c	zor	zor
Düşük maliyet	2	1	3	2	1
Tasarım kolaylığı	3	2	1	2	1

^a 0 ayırma ünitesinin kullanılması uygun değildir, 1 düşük randımanlı ayırma ünitesi, 2 genelde uygulanabilir ayırma ünitesi, 3 en uygun seçenek. ^b Optimum akış hızı için tasarımların. ^c Rafli kolonlarda adam delikleri açılabilir.

Tablo 2. Damıtma kolonlarında kullanılan temas sistemlerinin randımanları [19]
(Performance of the contacting systems used in the distillation columns [19])

Etken ^a	Kampanalı tepsi	Delikli tepsi	Sübaplı tepsi	Çift yön akışlı tepsi	Gelişigüzel yerleştirilmiş dolgu	Düzgün istiflenmiş dolgu
Buhar kapasitesi	3	4	4	5	5 (2) ^c	5
Sıvı kapasitesi	4	4	4	5	5 (3)	5
Etkinlik (Z/N_p) ^b	4	3	4	3	4 (2)	5
Fleksibilite	5	3	5	1	4 (2)	5
Basınç düşmesi	2	3	3	3	4 (2)	5
Düşük maliyet	3	5	4	5	2 (3)	1
Kirletici sistemler için kapasite	3	3	3	4	2 (2)	1
Tasarım kolaylığı	4	4	3	2	3 (3)	3

^a 5 mükemmel, 4 çok iyi, 3 iyi, 2 orta, 1 kötü. ^b N_p gerçek tepsi sayısı, Z dolgu yüksekliği. ^c Parantez içindeki değerler yüksek boşluk kesrine (ε) sahip dolgular için geçerlidir.

kolay, işlemsel eksekliği (fleksibilitesi) geniş ve kapasitesi de yüksek olduğundan petrokimya tesislerinde ayırma işlemi için tepsili damıtma araçları tercih edilir [11]. Daha düşük kapasiteli vakum uygulamalarında ise dolgu maddesi küçük basınç düşüşü sağladığı için tepsilere tercih edilir [7]. Fakat bakımı zor olduğu için sinai ölçekte dolgulu kolonlara rağbet düşüktür. Reaktif destilasyon uygulamalarına dönük düşük termal dayanıklılıktaki maddelerin saflaştırılmasında kullanılan buhar-sıvı-sıvı üç evreli dolgulu damıtma kolonlarının yaklaşık %10-%40 oranında ayırma etkinliği kaybına uğradıkları görülmüştür [18].

Chen vd. [18] göre etkinlik kaybına sebebiyet veren başlıca unsurlar, kararsız haldeki ikinci sıvı faz akışında meydana gelen fazlararası yüzey alanı azalması ve kütle transfer hızlarının düşük olmasıdır. Damıtma kolonları için geliştirilen Bolles ve Fair'ın [6] tasarım yöntemi uyarınca, buhar ve sıvı kapasiteleri, ayırma etkinliği, basınç düşüşü, çalışma esnekliği (fleksibilite) ve teçhizat maliyeti ölçütlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu ölçütlerden esinlenerek, standart ve özel yapıdaki tepsiler ile gelişigüzel yerleştirilmiş ve düzgün istiflenmiş (örgü tipi) dolguların performanslarına dönük daha geniş kapsamlı bir karşılaştırma Gualito vd. [19] tarafından yapılmıştır (Tablo 2). Geniş bir değişkenler matrisi yapısına sahip geliştirilmiş tasarım algoritması niteliğindeki bu son çalışma Texas Üniversitesi Ayırma Prosesleri Araştırma Programı (Separation Research Program at the University of Texas in Austin) çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Tablo 2'deki damıtma kolonuna ilişkin tasarım ölçütlerinin istatistik sonuçları uyarınca, tıkanma problemi ve ekonomi faktörü hariç, düzgün istiflenmiş dolgulu kolonlar diğerlerine kıyasla daha yüksek etkinlik ve kapasite ve daha düşük kolon basınç düşüşü özelliklerine sahiptir. Taylor [17] ise, temas sisteminin etkinlik, kapasite ve fleksibilite özelliklerinin yanı sıra seçilen tasarım yönteminin güvenilirliğinin de önemli etken olduğunu ileri sürmektedir. Ayrıca, ticari biyodizel üretim tesislerinde yer alan damıtma kolonlarının randımanlarını iyileştirmek ve işletme maliyetlerini asgariye düşürmek için kolon kompozit-entalpi eğrileri ile ekserji kaybı profillerinin simülasyonu ve termodinamik analizi gerekmektedir [20]. Nitekim, Nguyen ve Demirel'in [20] simülasyon yöntemi uyarınca, besleme karışımının sıcaklığında ve sıvının reflüks oranında yapılan değişikliklerle toplam ekserji kayıpları %47 nispetinde azaltılmıştır.

3. DOLGULU KOLON TASARIMINA İLİŞKİN FİZİKSEL ÖLÇÜTLER (PHYSICAL CRITERIA FOR DESIGNING A PACKED COLUMN)

Dolgulu damıtma kolonlarında muhtelif tip ve boyutta dolgu maddeleri kullanılmakla birlikte verim ve ayırma etkinliği açısından normal bir işletmede geniş buhar-sıvı temas alanı, küçük sıvı tutunması ve geniş buhar hızı çalışma aralığı sağlayabilen dolgu profillerinin genellikle tercih edildiği bilinmektedir [21]. Ayrıca, dolgulu kolonun optimum çalışma sahasının algoritmalarca tanımlanabilmesi önemlidir [22]. Bolles ve Fair [6] optimum buhar yükünü boğulma

hızının %70-%80'i şeklinde teklif etmektedir. Bu bağlamda, gelişigüzel doldurulmuş ve kafes şeklinde istiflenmiş dolgulu kolonların mühendislik tasarımı, etkinlik ve kapasite etkenlerinin de yer aldığı geniş değişkenler matrisinin irdelenmesini gerektirir [23].

Dolgu ayırma etkinliği ve kolon kapasitesi ise dolgunun geometrisi ve düzenlenmesinin, sıvı ve buhar akış hızlarının, kolon basınç düşmesinin, iki akışkanın fiziksel özellikleri ile kütle iletimi dirençlerinin bir fonksiyonudur [24]. Bu bilgiler yardımıyla kolon çapı (d_k) ve dolgu yüksekliği (Z) fiziksel kule tasarımı olarak bulunur. Bolles ve Fair'ın [6] öngördüğü kolon tasarımı basamakları kronolojik olarak şu şekilde uygulanır: 1. Dolgu maddesi seçimi. Amaca yönelik olarak uygun bir dolgu maddesi seçilir; 2. Kolon kapasitesi (kolon çapı, d_k) tayini. Uygulanması amaçlanan işletme şartlarına göre algoritmalarca maksimum buhar hızı (boğulma hızı) hesaplanır. Bu verilerden hareketle kolon çapı belirlenir; 3. HETP tayini. Seçilen kütle transfer modeline göre HETP ve gerekli denge durumları sayısı (teorik tepsi sayısı, N_p) tayin edilir; 4. Kolon basınç düşmesi hesabı. Tasarımlanan optimum buhar yükü değerine bağlı olarak algoritmalarca basınç düşmesi parametresi hesaplanır. Dolgulu kolonların ayırma etkisi, teorik bir tepsi etkinliğine eşdeğer olan dolgu maddesi yüksekliği şeklinde ifade edilir ve umumiyetle, bu dolgu yüksekliği için "eşdeğer yükseklik" veya HETP terimi kullanılır. HETP'nin düşük olması istenir. Fakat bir metre dolgu maddesi yüksekliğine isabet eden teorik tepsi sayısı kolon boyunca değişim olabildiği gibi, işleme sokulan sistemin fiziksel özelliklerine ve buhar hızına da tabidir. Genellikle, bir dolgulu kolonun etkinliği üzerine tesir eden çok sayıda değişkenlerden tasarım uygulamaları için üç unsur önem kazanır: a) sistemin fiziksel özellikleri, b) dolgu maddesinin geometrisi ve boyutları, c) buhar hızı [25]. Bundan başka, Kister [2] kolon çapının ayırma etkinliğine katkısını hesaplamak için şu yaklaşımı önermektedir, $HETP_1 = HETP_2[1 + 0,7\log(d_{k1}/d_{k2})]$, burada d_{k1} ve d_{k2} kolon çaplarıdır. Dolgulu kolonun ayırma etkinliği ile bu değişkenler arasındaki ilişkiler oldukça karmaşık olmakla birlikte değişkenler matrisine ek olarak sıvı ve buhar fazları kütle iletim dirençleri ile algoritmalarca ihtiyaç duyulan bazı varsayımların da dahil edilmesi gereklidir [7]. Bu alanda atılacak en önemli adım ise, optimum çalışma şartlarını analitik yoldan tanımlayabilecek yaklaşımların geliştirilmesidir [6].

3.1. Sistemin Fiziksel Özellikleri (Physical Properties of the System)

Viskozite, difüzyon sabitleri, yoğunluk ve yüzey gerilim gibi sistem özelliklerinin etkileri boyutsuz sayılar şeklinde gösterilmeye çalışılmış ise de bunların sistematik analizi yapılmamıştır. Ancak viskozite ve difüzyon katsayıları damıtma esnasında çok az değişir [26]. Buna karşılık yüzey geriliminin özellikle tanecik teşekkülünde rolü büyüktür. Bu nedenle, Zuiderweg ve Harmens [27] ikili sistemleri pozitif, negatif ve nötral olarak yüzey gerilimlerine göre sınıflandırmıştır. Eğer kolay uçucu bileşen (k.u.) düşük yüzey gerilimli ise sistem pozitif; yüksek yüzey gerilimli ise

sistem negatif ve yüzey gerilim bileşime tabi değil ise sistem nötral olarak kabul edilmektedir. Bir kolonda etkinlik, pozitif sistemlerde daha büyüktür ve bu sistemlerin bileşenlerine ayrılmaları daha kolaydır. Zuiderweg ve Harmens [27], pozitif ve negatif sistem davranışlarını sıvı film akışında meydana gelen yüzey gerilim derecelenmesi ile açıklamaktadır. Farklı sıvı film akışlarına ilişkin yüzey gerilim derecelenmesi Şekil 2'de gösterilmiştir. Pozitif sistemlerde (Şekil 2), k.u. bileşenin buharlaşması sonucu kolon boyunca k.u. bileşen bakımından fakirleşen yüksek yüzey gerilimli ince sıvı film bölgeleri oluşmaktadır. Bu bölgelerin yüzey gerilimi, etraftaki kalın film tabakalarınınkine oranla daha büyük olacaktır. Bu derecelenmenin sonucu olarak sistemin toplam yüzey-enerji dengesizliğini indirgeyecek biçimde kalın film bölgesinden ince film bölgesine doğru doğal bir sıvı akışı gerçekleşecektir. Bu da film akışını kararlı kılar ve de geniş bir ıslak yüzey alanı sağlar. Negatif sistemlerde ise, sıvı film akışına karşı koyan ters yöndeki bir yüzey gerilim derecelenmesi etkili olmaktadır (Şekil 2).

Pozitif davranan bir ikili sistemin bileşenlerine ayrılması daha kolay olur. Buna karşılık sıvı tutunması yüksektir ve daha düşük sıvı akış hızlarında çalışılmaktadır. Bu davranışa örnek olarak Norman'ın [28] ıslak duvar tipi bir kolonda minimum azeotrop teşkil eden *n*-propanol/su sistemi ile alınan ıslanma derecesi sonuçları gösterilebilir. Ayırma süreçlerine ilişkin yüzey gerilim derecelenmesinin fiziksel etkileri kapsamlı olarak Berg [29] tarafından irdelenmiştir.

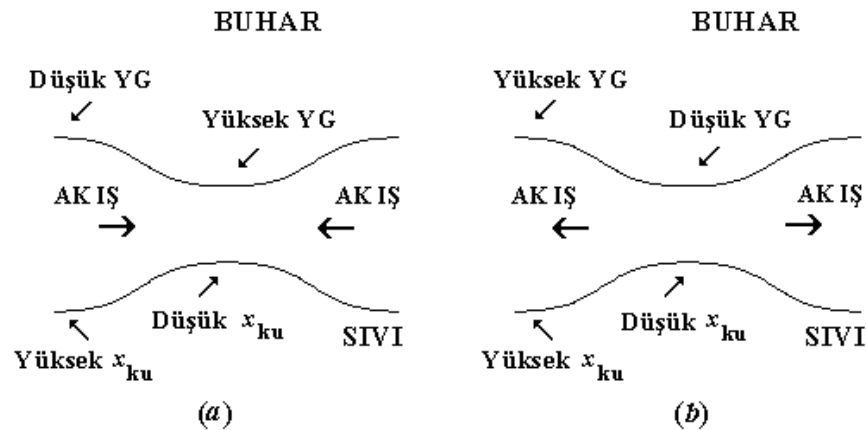
3.2. Dolgu Maddesinin Geometrik Özellikleri (Geometrical Characteristics of the Packing)

Dolgu maddesinin geometrisi HETP tayininde en büyük etkindir ve çapı belli bir kolonda aynı zamanda maksimum buhar yükünü de belirler. Ancak, geniş içerikli deneysel veri topluluğu çerçevesinde, farklı dolgu geometrileri, sistemleri ve kolon işletme koşullarına matematiksel olarak cevap verebilecek genel amaçlı tasarım algoritmasına literatürde

rastlanmamaktadır. Bunun nedeni ise, çok sayıda değişkenin bağımsız olarak analizini rasyonel bir algoritma içerisinde birleştirmenin matematiksel açıdan çok zor oluşudur [19]. Dolgulu bir kolonda kütle iletiminin en yüksek düzeyde gerçekleşebilmesi ve bunun yol açtığı basınç düşüşünün az olması için üç çeşit dolgu maddesi kullanılır: kırılmış dolgular, şekillendirilmiş dolgu malzemeleri ve ızgaralar. Ayrıca, kolona yerleştirme düzenine göre de gelişigüzel yerleştirilmiş ve düzgün istiflenmiş dolgu maddeleri olarak iki geniş sınıfa ayrılırlar. Genelde gelişigüzel yerleştirme düzenine ilişkin dolguların özgül yüzeyleri daha büyüktür. Ayırma etkinlikleri de yüksektir. Kafes veya örgü şeklinde istiflenmiş dolgu tipleri ise kolona bir bütün olarak yerleştirilir ve çoğunlukla daha düşük basınç düşüşü ve akışkanların daha büyük buhar debilerini daha pahalı bir tesisat aracılığıyla sağlayabilir. Seramik, dövme veya haddelenmiş metaller, cam, plastik vs. gibi malzemelerden üretilen dolgu maddelerinden genellikle dört özelliğin uygun olması istenir [26]: a) dolgu özgül yüzeyi a_p , b) boşluk kesri ε , c) sıvı tutunması h_L , d) malzeme ve maliyet. Normal bir işletmede bütün bu isteklerin hepsini karşılamak mümkün değildir. Bunların bağıl önemleri karşılaşılan münferit durumlara bağlı olarak algoritmalarca değerlendirilir [30]. İyi bir dolgu maddesi, düzgün olarak kolona doldurulabilen ve aşırı sıvı tutunması ve basınç düşüşü olmadan etkin buhar-sıvı teması ve yüksek buhar debilerini sağlamak üzere yüzey alanı ile serbest (boşluk) hacminin uyumlu olduğu dolgu maddesidir [30].

3.3. Dolgulu Kolonda Sıvı Tutunması (Liquid Hold-up in a Packed Column)

Dolgulu kolonlarda temas etkinliğini azaltan en önemli nedenlerden birisi kanallaşma olayıdır. Dolgu maddesinin büyüklük veya sıklığındaki değişiklikler fazların kanallar oluşturmasına bağlı olarak muhtemelen etkinlik kaybına neden olabilir. Buhar-sıvı sistemlerinde iki tür kanallaşma aynı anda meydana gelebilir, yerel ve kaba kanallaşma. Kanallaşma yerel olduğunda, aşağı akan sıvı bütün kesit



Şekil 2. Sıvı film akışında oluşan yüzey gerilim derecelenmesi a) pozitif sistem b) negatif sistem YG sıvı yüzey gerilimi x_{ku} k.u. bileşenin mol kesri

(The surface tension gradient occurring in the liquid film flow a) positive system b) negative system YG liquid phase surface tension x_{ku} mole fraction of more volatile component)

alanına dağıtılır fakat dolgu yüzeyinin bir kısmı ıslanmaz. Sıvı ve buhar akışları kolon boyunca farklı bölgelerde yoğunlaştığında kaba kanallaşma meydana gelir. Vidwans ve Sharma [31], halkalı dolgular üzerinde boyama yöntemi ile ölçülen ıslanma derecesinin kolon çeperlerinde daha fazla olduğunu göstermiştir. Bu bağlamda, gelişigüzel partikül dağılımına sahip bir sistemin toplam yüzeyinin minimum değerine, yani bir kürenin temsil ettiği şekle yönelme eğiliminde olduğundan, dolgu maddesi kolon çeperlerinin hemen yakınında kolon içerisine oranla daha uyumlu oturma özelliğini sergilemektedir. Yerçekimi etkisi ile aşağıya doğru akan sıvı doğal olarak en az dirençli yoldan geçme eğiliminde olduğu için duvarlara doğru yoğunlaşacaktır. Kanallaşma yalnız duvar boyunca değil, dolgu içerisinde de oluşabilecek düşük dirençli yollarda gerçekleşmektedir. Bu alanda yapılan araştırmalar, kaba kanallaşma eğiliminin kolon çapı ve dolgu yüksekliği ile orantılı arttığını ve istiflenmiş bir dolgulu yatakta gelişigüzel düzenine kıyasla daha fazla olduğunu göstermiştir [7]. Gunn [32], rastgele yerleştirilmiş dolgulu kolonlara ilişkin sıvı dağılımının dikey ve yatay eksenleri boyunca aynı düzen ve yoğunlukla geliştiği ve bunun yol açtığı sıvı faz hız derecelenmesinin izotropik (eşdeğer) nitelikte olduğunu ileri sürmektedir. Heriki eksenel simetrik dağılıma ilişkin sıvı faz hız derecelenmesi ise aşağıdaki kısmi diferansiyel Eş. 1 ile hesaplanmaktadır [32].

$$\frac{D_s}{r_k} \frac{\partial}{\partial r_k} \left(r_k \frac{\partial u_L}{\partial r_k} \right) = \frac{\partial u_L}{\partial z} \quad (1)$$

Burada, D_s sıvı yayılma faktörü, u_L dikey eksenli sıvı akış hızı, r_k kolon yarı çapıdır. Sonuç olarak, kolon cidar bölgesindeki dolguların diziliş düzeni itibarıyla daha düzgün olduğundan, sıvının o bölgeye doğru yönelmesi kolaylaşır. Nitekim Gunn ve Al-Saffar [33], deneysel olarak dikey ve yatay eksenli sıvı faz hız dağılımının anizotropik (eşdeğer olmayan) yapıda olduğunu bulmuş ve bu eksenel dağılımı modelleyen aşağıdaki diferansiyel denklemi (Eş. 2) geliştirmiştir.

$$K_{as} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + \frac{K_{rs}}{r_k} \frac{\partial}{\partial r_k} \left(r_k \frac{\partial P}{\partial r_k} \right) = 0 \quad (2)$$

Burada, K_{as} dikey sıvı yayılma faktörü, K_{rs} yatay sıvı yayılma faktörü, $u_{as} = -K_{as}(\partial P/\partial z)$ dikey eksenli sıvı akış hızı, $u_{rs} = -K_{rs}(\partial P/\partial r_k)$ yatay eksenli sıvı akış hızı, ∂P dağıtıcı levha ile operasyon noktası arasındaki sıvının potansiyel farkıdır. Bu yaklaşım, gelişigüzel yerleştirilmiş dolgu düzeneğindeki gerçek sıvı dağılımına daha yakın sonuçlar vermektedir. Kouri ve Sohlo [34], dolgulu bir kolona ait iki eksenli sıvı hız profillerinin dolgu yatağı boyunca farklı boyutta geliştiğini bulmuştur. Pizzo vd. [35] ise, gelişigüzel yerleştirilmiş dolgulu kolonlara ilişkin sıvı dağılımını kantitatif olarak tanımlayabilmek için “global etkinlik” ve “dispersiyon etkinliği” isimli iki dağılım faktörünü önermektedir. Bunlardan global etkinlik (Ef_G), kolon boyunca yükseklikle değişen sıvı dağılımının kantitatif

ölçüsüdür, dispersiyon etkinliği (Ef_D) ise yerel sıvı yayılma derecesini belirleyen etkidir (Eş. 3).

$$Ef_G = (1 - \alpha') \times 100\% ; Ef_D = (1 - \xi) \times 100\% \quad (3)$$

Burada, α' ve ξ sıvıya ait düzeltme parametreleri olup, sırasıyla, normalleştirme genliği katsayısı ve dispersiyon katsayısıdır.

Kanallaşmanın yaratacağı temas etkinliği kaybını karşılamak için dolgu yüksekliğinin kolon çapına (Z/d_k) oranının 7 ve daha büyük olması durumunda sıvı dağıtıcı plaka sisteminin kullanılması tavsiye edilir [36]. Çapı 1,2 m'den büyük olan kolonlar için ise her 5-8 kolon çapı yüksekliğindeki aralıklarla veya maksimum her 20 ft başına birer sıvı dağıtıcı plakanın konulması önerilmektedir [26]. Ayrıca büyük çaplı ($d_k \geq 4$ ft) kolonlarda herbir ft² kolon kesit alanı için en az 4 noktadan sıvı beslenmesinin gerektiği belirtilmektedir [7]. Shariat ve Kunesh'in [37] geliştirdiği yeni tüp şeklindeki sıvı dağıtıcı plaka sistemi (tubed drip pan, TBP) sayesinde, Pall halkası dolgu malzemesine tekabül eden ayırma etkinliği 1-2 kademe arttırılmıştır. Buna benzer etkinlik artışı sonuçları, TBP dağıtıcı plaka sisteminin kullanıldığı örgü tipi dolgulu kolonlarda da alınmıştır [38]. Dağıtıcı plaka kullanımına esas referans teşkil eden büyüklük ise kolon çapı/dolgu çapı (d_k/d_p) oranıdır [26]. Dolgu maddelerinin boyutları benzer, şekilleri simetrik ve kolon çapının dolgu çapına oranı 8/1 veya daha büyük olduğunda kanallaşmanın etkisi minimuma düşer. Çapların oranı 10/1 olması halinde dolgu maddesi kolon çeperlerine sıkıca uyar ve maksimum etkinlik sağlanır. Ancak bu oranın Raschig halkaları için (30/1)'i, eyerler için (19/1)'i ve içten akışlı yeni modern halkalar için de (15/1)'i aşmaması tavsiye edilir [26].

4. DOLGULU KOLON TASARIM MODELLERİ (PACKED COLUMN DESIGN MODELS)

4.1. Gelişigüzel Yerleştirilmiş Dolgulu Kolonlara İlişkin Kütle İletimi Tasarım Modelleri (Mass Transfer Design Models for Randomly Packed Columns)

Bu bölümde, gelişigüzel yerleştirilmiş ve düzgün istiflenmiş dolgu maddesi geometrileri için geliştirilen tasarım modelleri değerlendirilecektir. Model performansı büyük ölçüde tasarım algoritmasının başarı oranını belirler. Teorik dolgulu kolon tasarım modellerinin öngördüğü değerlerinin doğruluk mertebesi uygulanan münferit sistem ve işletme koşullarına tabidir. Dolayısıyla, model yapısına ilişkin açıklayıcı bilgilere ihtiyaç vardır. İki önemli tasarım büyüklüğü olarak kullanılan fazlararası etkin yüzey alanı (a_e) ve HETP (veya gaz fazı transfer birimi yüksekliği, H_{OG}) kavramları kütle iletim mekanizmasının temelini oluşturmaktadır. a_e 'nin boyutu m²/m³ olup, birim teçhizat hacmi başına gelişen etkin kütle iletim alanı olarak tasarımılanır. Penetrasyon ve yüzey yenilenme teorilerine dayanan çeşitli tasarım modelleri kütle iletim mekanizmasının daha gerçekçi fiziksel tarifini sağlayabilir

[2]. Fakat günümüzün mevcut gelişme düzeyinde bunlar iki film kütle iletim bağıntılarının geçerliliğini önemli ölçüde etkilememiştir. Bu değerlendirmenin pek geçerli olmadığı istisnai bir durum genel akı eşitliğindeki difüzyon katsayısı teriminin eksponent değeri ile ilgilidir. İki film teorisine göre, genel akı eşitliğindeki D 'nin eksponenti 1'dir. Buna mukabil, penetrasyon teorisi $1/2$ 'lik değeri öngörmektedir. Oysa uygulanabilen iki film kütle iletim katsayısı bağıntıları, özellikle, mevcut çalışmada kullanılan Onda ve Shulman [39] modelleri bu iki teorisin öngördüğü difüzyon sınırları arasında yer alan bir diffüvizite etkinliğine bağımlılık göstermektedir. Şöyle ki, gaz tarafı için D 'nin eksponenti $2/3$ dir; sıvı faz film direnci için de $1/2$ 'lik bir eksponent söz konusudur [7].

Burada, değerlendirme kapsamına giren iki film ve penetrasyon modelleri aracılığı ile bireysel kütle iletim katsayıları ve HETP'nin hesaplanması amaçlanmaktadır. Tasarım hesaplamalarında iki değişik işlem uygulanmaktadır. İlk uygulama tarzı, temeli hacimsel kütle iletim katsayısı, yani bireysel kütle iletim katsayıları (k_L ve k_G) ve fazlararası etkin yüzey alanı (a_e)'nin beraberce hesaplanmasına dayanır. Bu yöntem matematiksel açıdan uygun düştüğü için Cornell'in Monsanto modeli [6] yakın geçmişe kadar rağbette idi. Diğer bir yaklaşım ise, kütle iletim katsayılarının ve etkin yüzey alanının birbirinden bağımsız olarak analizine dayanır. Bu araştırmanın başlıca gayesi, model tasarım denklemlerinde yer alan sıvı faz bireysel iletim birimi yüksekliği (H_L), gaz fazı bireysel iletim birimi yüksekliği (H_G), gaz tarafı toplam iletim birimi yüksekliği (H_{OG}) ve denge-işletme hatları eğimler oranı (λ) büyüklüklerinin hesaplanması ile ilgili genel bir problemin çözümüne yarayabilecek uygun bir algoritmanın geliştirilmesidir. Başka bir ifade ile, H_L , H_G , H_{OG} ve λ büyüklüklerinin hesaplanması sistemin fizikokimyasal özellikleri cinsinden boyutsuz sayılar ile ifade edilen k_L , k_G , ve a_e niceliklerinin bulunmasına bağlıdır. Kolon boyunca gelişen yoğunluk ve sıcaklık derecelenmelerine karşılık fazlararası yüzey alanı da orantılı olarak değiştiğinden optimum a_e değerinin algoritmalarca belirlenmesi gerekmektedir. Genellikle tasarım hataları a_e niceliğinin deneysel olarak başarılı bir şekilde belirlenememesinden kaynaklanmaktadır. Kütle iletimi için elverişli olan fazlararası yüzey alanı işlem tipinden tipine önemli değer değişiklikleri göstermektedir. Bu hususta araştırmacıların görüş ayrılıkları önemli bir handicap teşkil ederek tasarım uygulamalarında başarısızlığa yol açmaktadır. Yatışkın haldeki bir sistemde artan temas alanı ile orantılı olarak kütle iletim hızları da artacağından, %100 etkinliğe tekabül eden ideal dengeye ulaşmanın olanağı da doğar. Penetrasyon ve film teorilerine bağlı olarak yapılan önceki araştırmalar dolgunun dış (a_p) veya ıslak (a_w) yüzey alanı ile fazlararası etkin yüzey alanı (a_e) niceliklerinin birbirinden farklı fiziksel büyüklükler olduğunu göstermiştir [24]. İlk önce, absorpsiyon sistemleri dikkate alınarak fazlararası kütle iletim alanı için islatılmış dolgu yüzey alanı a_w kavramı kullanılmıştır [39]. Bu esasa dayalı tasarım modelleri absorpsiyon sistemleri için iyi netice vermektedir. Ancak

damıtma sisteminde benzer uyarlamalar daima hatalara sebebiyet vermiştir [40]. Bravo ve Fair [24] ve Senol [41], incelenen denel sistem verileri ışığında a_e değerinin a_w 'den farklı olduğunu tespit etmişlerdir. Dolgulu damıtma kolonlarına ilişkin kütle aktarımının karmaşık fiziksel görünümü yüzünden kütle iletim dirençleri ile a_e 'nin deneysel ölçümü umumiyetle başarısız olmaktadır. Islatılmış dolgu yüzeyinin yanı sıra, sıvı film akışında meydana gelen ani sıvı dalgalanmaları ve sıçramaları, sıvıda çözünen gaz kabarcıkları, serbest düşen sıvı damlacıkları, gaz fazı tarafından sürüklenen sıvı partikülleri vs. gibi akış şartlarındaki düzensizliklerin yarattığı ek bir kütle iletim alanını da hesaba katmak gerekir [42]. Kolon boyunca gelişen kütle iletim hızları da kuramsal olarak kütle iletim katsayıları, etkin fazlararası yüzey alanı, sıvının yüzey gerilim derecelenmesi ve dinamik tutunması ile yayılım katsayılarından yararlanarak bulunabilir [9]. Ancak, a_e 'nin analitik sonucu veya deneysel ölçümü ile ilgili karşılaşılan zorluklar yüzünden literatürde yayınlanan tasarım sonuçları ekseriyetle k ve a_e niceliklerinin toplam etkisini veren hacimsel kütle iletim katsayısı ($k \times a_e$)'ya göre düzenlenmiştir [6]. Algoritmalarca optimal çözümü sağlayacak en uygun yaklaşım ise bireysel kütle iletim katsayılarının ve fazlararası etkin yüzey alanının birbirinden bağımsız olarak yorumlanmasıdır [24]. Nitekim Onda vd. [39] ve Yoshida ve Koyanagi [40], damıtma ile absorpsiyon sistemlerini ele aldıklarında benzer işletme koşulları (dolgu özgül yüzey alanı a_p , kolon çapı d_k , buhar yüklenme faktörü F v.s.) için a_e 'nin işlem tipine göre değiştiğini tespit etmişlerdir.

Özellikle, damıtmada a_e 'nin absorpsiyon sistemlerine oranla daha büyük olması önemli ölçüde sıvı faz yüzey geriliminden kaynaklandığı ileri sürülmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalardan Bravo ve Fair'ın [24] a_e modeli sınai ölçekteki damıtma kolonları ve dolgu tipleri için özel olarak geliştirilmiş olan orijinal bir yaklaşımdır. Ancak, bu model önemli bir tasarım problemini de beraberinde getirir. Şöyle ki, Bravo-Fair modelinde yalın olarak yer alan σ yüzey gerilim değişkeninin 0,50'lik eksponent artışı, Fi kapiler film sayısındaki total yüzey gerilim etkinliğine yaklaşık olarak eşdeğerdir. Ayrıca, teklif edilen model ancak yüklenme noktası civarı ve bunun altında kalan %20-%80 Fl (boğulma oranı) sahasını iyi tanımlamaktadır. Modelin boğulma bölgesini de tanımlayabilmesi bakımından yeni bir değişken veya boyutsuz sayının modele eklenmesiyle daha başarılı bir tasarım modelinin elde edileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda, bütün buhar hızı çalışma bölgesi için geçerli olan Senol'un [41] kütle iletim modeli aracılığıyla optimum çalışma sahasını analitik olarak tanımlamak mümkündür. Tasarım emniyetini sağlamak için model güvenilirliği ile ilişkili istatistik tasarım faktörleri de model değerleri ile birlikte kullanılmalıdır [42].

Taranan kaynaklarda, genellikle iki film ve penetrasyon teorilerine dayalı k_L , k_G , a_e ve HETP tasarım eşitlikleri yer almaktadır. Etkin bir model güvenilirlik analizi için yüzey yenilenme ve film-yüzey yenilenme teorilerinden türetilen bağıntılar bu değerlendirmenin kapsamına girmemektedir.

Kütle aktarım hızlarındaki göreceli değişimleri tanımlayabilen iki temel tasarım algoritması uygulanmaktadır:

1) k ve a_e niceliklerinin beraberce hesaplandığı hacimsel kütle iletim katsayısı $k \times a_e$ 'ya dayanır. 2) k ve a_e niceliklerinin birbirinden bağımsız olarak analizine dayanır.

Birinci hesap yönteminde yer alan kütle aktarım denklemleri basit ifadelerle indirgenebilir, fakat karşılıklı etkime yüzünden k ve a_e 'nin etkileri görünmeyebilir. Burada incelenen tasarım modelleri ikinci tür yaklaşıma bağlı modellerdir. Böylelikle, k ve a_e niceliklerinin birbirinden bağımsız olarak yorumlanabilmesi hasıl olmuştur. Optimal çözüme varabilmesi için de iki çeşit özel problemin çözülmesi gerekmektedir. Bunlar, işlem tipine göre en uygun bireysel kütle iletim katsayısı bağıntılarının seçilmesi ve fazlararası etkin yüzey alanı modelinin geliştirilmesi problemi ile damıtmada söz konusu denge hattının lineerleştirilmesi problemidir. Başka bir deyimle, kolonun toplam etkinlik (HETP) değerinin hesaplanması, k_G , k_L ve a_e niceliklerinin bulunmasına bağlıdır. Buna istinaden Senol [42], $a_e = f(\%Fl)$ ve $HETP = f(\%Fl)$ fonksiyonlarının türev açımlarından hareketle dolgu bir kolonun optimum çalışma sahasını analitik olarak tanımlayabilecek model denklemlerini geliştirmiştir. Dolgu özgül yüzey alanı a_p temeline kurulan hesap yöntemlerinin öngördüğü film dirençleri sağlıklı yakınsanmış değerler olmayıp önemli tasarım hatalarına yol açmaktadır. Burada, k ve a_e 'nin birbirinden bağımsız olarak yorumlanabilmesi için pratikçe tasarım kolaylığı sağlayabilen en geçerli tasarım eşitlikleri ele alınmıştır (Tablo 3).

Diğer önemli tasarım niceliği ise kolonda tutulan sıvı miktarıdır. Sıvı tutunması, herhangi bir zaman diliminde cihaza verilen sıvının bir kısmı dolguların üzerinde sığışmış halde hareketsiz kalan sıvı ve film akışını temin eden hareket halinde sıvı (dinamik hold up) olmak üzere kolon içinde tutulan (alınkonulan) toplam sıvı miktarıdır. Dinamik sıvı tutunması, cihazın optimum verimle çalışabilmesi için minimum bir madde birikimi sağlamaktadır. Dinamik sıvı tutunması h_L , kütle iletim katsayısı k ve fazlararası etkin yüzey alanı a_e nicelikleri ile ilgili olarak literatürde yer alan en başarılı teorik modeller Tablo 3'te verilmiştir. İki film teorisinde hem sıvı, hem de gaz tarafı film dirençlerinin baskın olduğu varsayımdan hareketle, transfer birimi yüksekliği $H_{OG} = H_G + \lambda H_L$ ve HETP nicelikleri için temel tasarım denklemi olarak Eş. 4 geliştirilmiştir [6].

$$HETP = \frac{\ln \lambda}{\lambda - 1} H_{OG} = \frac{\ln \lambda}{\lambda - 1} (H_G + \lambda H_L) \quad (4)$$

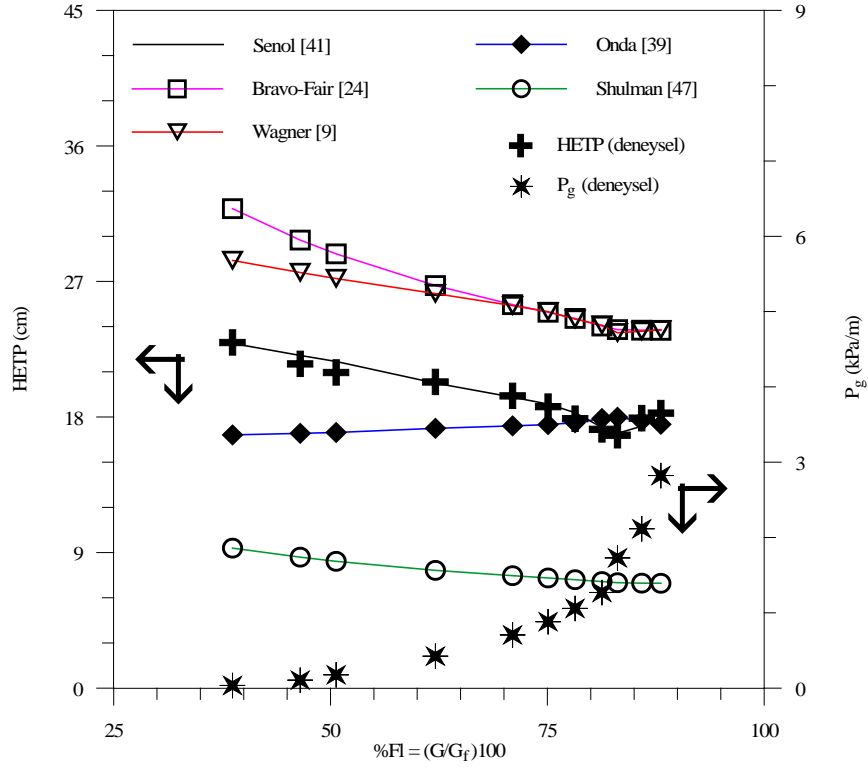
Burada, $\lambda = m/(L_m/G_m)$ denge-işletme hatları eğimler oranı, m denge eğrisi eğimi, L_m ve G_m (kmol/s) sıvı ve gaz molar akış hızları, $H_L = L/(k_L a_e \rho_L)$ ve $H_G = G/(k_G a_e P M_G)$ sıvı ve gaz tarafı bireysel iletim birimi yükseklikleri (m), P işletme basıncı (Pa), M_G gaz fazı mol ağırlığı, ρ_L sıvı yoğunluğu (kg/m³), L ve G sıvı ve gaz fazları kütlele akış debileri

(kg/m²-s), k_L ve k_G sıvı ve gaz tarafı bireysel kütle iletim katsayılarıdır (kmol/m²-s-atm). H_{OG} terimi ise, bir dolgu kontrol elemanındaki film dirençlerinin kütle iletimine karşı toplam etkilerini belirtir. Seçilen yöntemin optimal çözüme varabilmesi için de H_L , H_G ve λ tasarım büyüklükleri ile fonksiyonel ilişkisi olan k_G , k_L ve a_e niceliklerinin algoritmalarca boyutsuz sayılar aracılığıyla emniyetli bir şekilde hesaplanmasına dayanır [24]. Wagner vd. [9], iki film tasarım modellerinin yerine, yeni tip modern dolgular için geliştirilen Higbie'nın penetrasyon teorisine dayalı k_G , k_L , a_e ve HETP tasarım eşitliklerini önermektedir (Tablo 3). Senol [42] ise, temel tasarım büyüklüklerinin türevsel değişimlerini analiz edebilmek için optimum a_e , HETP, d_k ve buhar hızı çalışma sahasını analitik olarak tanımlayabilen fazlararası yüzey alanı (a_e) ve boğulma hızı (G_f) modellerini teklif etmiştir. Bu yeni tasarım yaklaşımı uyarınca, dolgu bir damıtma kolonunun optimum çalışma sahasına tekabül eden a_e , HETP, d_k ve buhar hızı büyüklüklerini istatistiksel olarak tanımlamak mümkündür. Wagner vd. [9] göre, a_e ve HETP'ye ilişkin modellerin yapısında, kolon hidrodinamiğine dayalı basınç düşmesi ve sıvı tutunması değişkenlerinin de yer alması gerekmektedir. Model güvenilirliği açısından, ikili sistemin fiziksel özelliklerine ve dolgu boyutuna bağlı olarak tasarım modelleri çok farklı ve şartıcı sonuçlar vermektedir [42]. Bu bağlamda, incelenen modellerden absorpsiyon sistemleri için Onda [39] yaklaşımları, damıtma sistemleri için Bravo-Fair [24], Senol [41] ve Billet [7] modelleri, modern dolgu maddesi yapıları için Wagner [9] modeli ve Hanley'in basınç düşüşü [43] ve kütle transferi [44] bağıntıları ve en gelişmiş yapıdaki dolguların kullanıldığı üç evreli buhar-sıvı-sıvı damıtma uygulamaları için de Chen [18] yaklaşımları en güvenilir sonuçlar vermektedir. Çalışmada değerlendirilen modellerden film teorisi kökenli tasarım yaklaşımlarının benzeri penetrasyon mensuplu olanlarına kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiği aşıkardır. Mutlak veya nispi hata temeline dayalı model güvenilirliği analizinde, modelin etkinlik kazandığı emniyet aralığının alt sınırı sıfır ya da negatif bir değer olarak kabullenir.

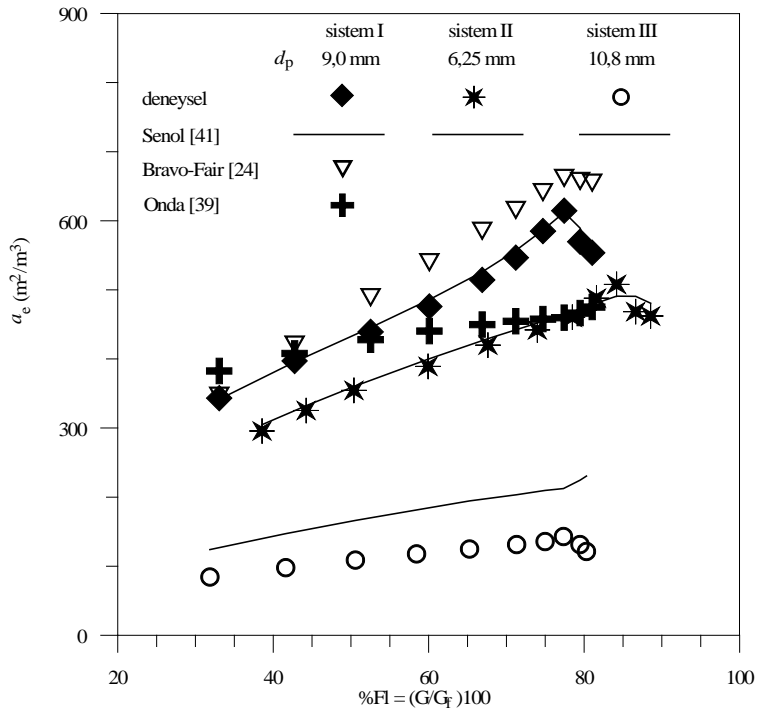
Diğer bir analiz yöntemi ise log oranı objektif fonksiyonu esasına dayalıdır [42]. Kararlı hal kütle iletim modellerinin hesapsal tahminleri Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 3'te $HETP = f(\%Fl)$ fonksiyonel değişimine bağlı olarak deneysel etkinlik verileri ile teorik model sonuçları karşılaştırılmıştır. Deney düzeneği [41] nolu kaynakta verilmiştir (dolgu maddesi çapı $d_p = 6,25$ mm, dolgu özgül yüzey alanı $a_p = 1037,3$ m²/m³, kolon iç çapı $d_k = 9$ cm, kolon boşluk kesri $\varepsilon = 0,545$ m³/m³, dolgu yatağı yüksekliği $Z = 1,89$ m, trikloretilen/*n*-heptan sistemi). % boğulma oranı (%*Fl*) kolondaki gerçek buhar hızı değerinin aynı çalışma koşullarında boğulma meydana getiren maksimum buhar hızına oranıdır. Şekil 3'teki kütle iletim modellerinin öngördüğü teorik HETP sonuçları karşılaştırıldığında, %25-%80 boğulma oranı bölgesi uyarınca Bravo-Fair ve Wagner modellerinin Onda ve Shulman [39] modellerine oranla algoritmalarca daha yakınsanmış tahminlerle hedefteki deneysel verileri temsil ettikleri görülür.

Tablo 3. Gelişigüzel yerleştirilmiş dolgulu kolonlara ilişkin etkinlik (HETP), fazlararası kütle iletim alanı (a_e) ve sıvı tutunması (h_L) tasarım modelleri
(The efficiency (HETP), interfacial mass transfer area (a_e) and hold-up (h_L) design models for randomly packed columns)

Model Adı ve Kaynak	Eşitlik
1. Ayırma etkinliği (HETP) tasarım eşitlikleri	
Film modeli [6]	$HETP = [\ln\lambda/(\lambda - 1)]H_{OG} = [\ln\lambda/(\lambda - 1)](H_G + \lambda H_L)$
Penetrasyon modeli [9]	$HETP = [\pi(\varepsilon - h_L)\mu_G/4D_G]^{0.5} \left\{ 1 + [h_L D_G M_L \rho_G G / ((\varepsilon - h_L) D_L M_G \rho_L L)]^{0.5} \right\} \chi^{0.5} / a_e$
2. Fazlararası etkin yüzey alanı (a_e) bağıntıları	
Yoshida-Koyanagi [40]	$4L/a_e \mu_L = 4W/\pi d \mu_L$
Onda vd. [39]	$a_w/a_p = 1 - \exp(-1,45 Re_L^{0.1} Fr_L^{-0.05} We_L^{0.2} (\sigma/\sigma_c)^{-0.75})$
Puranik-Vogelpohl [45]	$a_w/a_p = 1,045 Re_L^{0.041} We_L^{0.133} (\sigma/\sigma_c)^{-0.182}$
Bravo-Fair [24]	$a_e/a_p = 0,498(\sigma^{0.5}/Z^{0.4})(Ca_L Re_G')^{0.392}$
Wagner vd. [9]	$a_e/a_p = [(1 - \varepsilon + h_L)/(1 - \varepsilon)]^{2/3} - \alpha_d$
Hanley vd. [44] ^a	$a_e = (1 - f_{bk})a_p [1 - \exp(-\psi' We_L^2)]$
Brito vd. [46]	$a_e/a_p = 0,465 Re_L^{0.30}$
Senol [41]	$a_e/a_p = c_0 [(\sigma_1/\sigma_h)/(100 - \%FI)]^{c_1} (Fi_L)^{c_2} (Ca_L Re_G')^{c_3} (We_L/Re_L)^{c_4} (\sigma/\sigma_c)^{c_5}$
3A. Sıvı faz kütle iletim katsayısı (k_L) bağıntıları	
Shulman vd. [47]	$k_L = 25,1 D_L a_p / [6(1 - \varepsilon)] [6(1 - \varepsilon)\mu_L \rho_L / (a_p \mu_L)]^{0.45} [\mu_L / (D_L \rho_L)]^{0.5}$
Onda vd. [39]	$k_L = 0,0051(\mu_L g / \rho_L)^{1/3} [u_L \rho_L / (a_w \mu_L)]^{2/3} (Sc_L)^{-0.5} (a_p d_p)^{0.4}$
Zech-Mersmann [48]	$k_L = C(\rho_L g d_p^2 / \sigma)^{-0.15} (u_L g d_p / 3)^{1/6} (6D_L / (\pi d_p))^{0.5}$
Shi-Mersmann [49]	$k_L = 0,91 [6D_L / (\pi d_p)]^{0.5} [\mu_L^{0.19} g^{0.22} \varepsilon^{0.2} \rho_L^{0.18} \sigma^{0.05} (1 - 0,93 \cos \theta)^{1/3} / (a_p^{0.4} \mu_L^{0.23})]$
Schultes [50]	$k_L = C(\rho_L g / \mu_L)^{1/6} (a_p D_L / (4\varepsilon))^{0.5} (u_L / a_p)^{4/3}$
Billet [51]	$k_L = C(\rho_L g / \mu_L)^{1/3} (D_L / (4\varepsilon))^{0.5} \mu_L^{1/3}$
Hanley vd. [44] ^a	$k_L d_e / D_L = A_L Re_L^{1/2} Sc_L^{1/2}$
Wagner vd. [9]	$k_L = [4\phi_L D_L u_L / (\pi h_L \chi)]^{0.5}$
3B. Gaz fazı kütle iletim katsayısı (k_G) bağıntıları	
Shulman vd. [47]	$k_G \rho_{G,m} RT / D_L = 1,195 [d_p' G / (\mu_G (1 - \varepsilon))]^{-0.36} [\mu_G / (D_G \rho_G)]^{-2/3}$
Onda vd. [39]	$k_G = 5,23 (D_G a_p / (RT)) (G / (a_p \mu_G))^{0.7} (Sc_G)^{1/3} (a_p d_p)^{-2}$
Zech-Mersmann [48]	$k_G = C[(\varepsilon + 0,012)/\varepsilon] [(1 - \varepsilon) D_G^2 u_G^2 \rho_G / (\mu_G d_p)]^{1/3}$
Hughmark [52]	$k_G = u_G a_p (f_s/2)^{1/2} / [1/k_T^+ + 0,5 a_p (f_s/2)^{1/2}]$
	$k_T^+ = (0,097/Sc_G) \left\{ a_p \tan [34,6 \times (0,0094 Sc_G)^{1/2}] - a_p \tan [5,5 \times (0,0094 Sc_G)^{1/2}] \right\}^{-1}$
Billet [51]	$k_G = C [a_p / (4\varepsilon)]^{0.5} [D_G / (\varepsilon - h_L)]^{0.5} [\rho_G u_G / (a_p \mu_G)]^{0.75} (Sc_G)^{1/3}$
Hanley vd. [44] ^a	$RTk_G d_e / D_G = A_G Re_G^{0.8} Sc_G^{1/3}$
Wagner vd. [9]	$k_G = [4\phi_G D_G u_G / (\pi(\varepsilon - h_L)\chi)]^{0.5}$
4. Dinamik sıvı tutunması (h_L) modelleri	
Otake-Okada [53]	$h_L = 6,28 Fr_L^{0.44} Re_L^{-0.20} (10 < Re_L < 200); h_L = 8,10 Fr_L^{0.44} Re_L^{-0.37} (0,01 < Re_L < 10)$
Buchanan [54]	$h_L = 2,2 (Fi_L)^{1/3} + 1,8 (Fr_L)^{1/2}$
Bemer-Kalis [56]	$h_L = 0,34 a_p (\mu_L / \rho_L)^{2/3} Re_L^{2/3}$
Hanley vd. [44]	$h_L = f_{bk} + a_p (1 - f_{bk})^{2/3} [1 - \exp(-\psi' We_L^2)]^{2/3} [3\mu_L L d_e / (4\rho_L g \varepsilon)]^{1/3}$
Stichlmair vd. [30]	$h_L = \left\{ 0,555 [a_p \mu_L^2 / (g \varepsilon^{4.65})]^{1/3} \right\} \times \left\{ 1 + 20 [\Delta P / (Z \rho_L g)]^2 \right\}$



Şekil 3. Gelişigüzel yerleştirilmiş dolgulu damıtma kolonu için elde edilen deneysel HETP verilerinin model değerleri ile karşılaştırılması P_g deneysel kolon basınç düşmesidir [41] (Comparison of the experimental HETP data with the model estimates obtained for a randomly packed distillation column P_g is the experimental column pressure drop [41])



Şekil 4. Etkin yüzey alanı a_e 'nin boğulma oranı $\%FI$ ile değişimi - Trikloretilen/*n*-heptan I metilsikloheksan/tolüen II ve benzen/tolüen III sistemleri ve üç farklı boyuttaki dolgu maddeleri için teorik ve deneysel a_e sonuçlarının karşılaştırılması [41] (Variation of the effective interfacial area a_e with the flooding ratio $\%FI$ - Comparison of the observed a_e with estimates for the systems trichloroethylene/*n*-heptane I methylcyclohexane/toluene II and benzene/toluene III and three packings of different sizes [41])

Ayrıca, söz konusu %25-%80 Fl bölgesi için Bravo-Fair ve Wagner modellerine ilişkin HETP sonuçları damıtma sistemlerine özgün tipik bir değişim eğilimi izlemektedir. Fakat yükleme noktasının üzerine çıkıldığında bu dört modelin tahminleri damıtma etkinliği davranımından sapmaktadır. Senol modeli ise, bütün % Fl aralığı için oldukça başarılı tahminler sağlamaktadır. Kuvvetle ihtimal, Shulman kütle iletim modeli kuruluşu itibarıyla absorpsiyon verilerine dayalı olduğundan bu yaklaşımı damıtma sistemlerine uyarlayan tasarım algoritmaları umumiyetle başarısız olmaktadır. Keza, Onda modelinin öngördüğü HETP değerleri de absorpsiyon sistemlerine özgün bir değişim eğilimi sergilemekte olup, artan buhar hızına karşılık kolon ayırma etkiliği ters orantılı olarak azalmaktadır (HETP artmaktadır).

Önceki şekilde verilen aynı denel sistemi çerçevesinde [41], boğulma akış şartlarını da hesaba katmak suretiyle teorik fazlararası yüzey alanı değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4). Şekil 4'teki teorik yakınsama sonuçlarından da anlaşılacağı üzere, Senol modeli hariç diğer film modelleri yükleme noktasındaki maksimum a_e değerini veren bir fonksiyonel değişim eğilimi sergilememektedir. Şekil 3 ve 4'teki teorik sonuçlara istinaden Bravo-Fair ve Senol modelleri değişik yapıdaki dolgu maddelerini kapsayan fiziksel kule tasarımı uygulamalarında güvenilir bir şekilde kullanılabilir. Buna karşılık Onda'nın a_w modeli ise tasarım aracı olarak damıtma sistemleri için yetersiz kalmaktadır. Taranılan kaynaklarda, Şekil 3 ve Şekil 4'te verilen modellerin karşılaştırılabileceği pilot kolon menşeli başka deneysel veriler veya başka teorik model sonuçları bulunamamıştır. Bu bakımdan, incelenen modellerin tasarım güvenilirliklerine dönük kantitatif bilgi verebilecek Senol'un [42] istatistik yöntemi kullanılabilir. Bir dolgulu kolon tasarım uygulamasında sağlıklı yakınsanmış sonuçların elde edilebilmesi için fiziksel olayı modelleyen teorik yaklaşımdaki boyutsuz sayılar topluluğunun doğru seçilmiş olması gerekmektedir. Modeldeki bu sayıların kuvvet açılımları ise sınır şartlarını tanımlayabilecek mertebede olmalıdır. Teorik sonuçların modeldeki değişken yapısına ve de münferit sistem ve işletme koşullarına bağımlı olması ile MINLP [2] kökenli algoritmaların yakınsanmış sonuçlarından daha sağlıklı sonuçlar elde edilebilmesi film modelleri için de geçerlidir. Genellikle, kolonda film akışını temin eden hareket halindeki dinamik sıvı tutunması ile ilgili yaklaşımlara literatürde yer verilmektedir. Zira, dinamik sıvı tutunması cihazın optimum verimle çalışabilmesi için minimum bir madde birikimi sağlamaktadır. Burada, basınç derecelenmesi ($\Delta P/Z$) ve fazlararası yüzey alanı (a_e) nicelikleri ile yakından ilişkisi olduğu bilinen h_L büyüklüğünün teorik yoldan nasıl hesaplanabileceği araştırılmıştır. Bu amaçla, Bemer-Kalis ve Otake-Okada bağıntıları ile 1970 yılına dek yayınlanmış bütün h_L verilerini ortalama %15-%20 hata ile temsil ettiği iddia edilen Buchanan'ın eşdeğer hold up bağıntısı ile teorik hesaplamalar yapılmıştır (Tablo 4). Bazı araştırmacılar [57], statik sıvı tutunmasının sıvı akış hızından etkilenmediği yolundaki tezi ileri sürmektedir; buna karşılık, Bemer ve Kalis'in [56] modelinde sıvı debisinin artırılmasıyla sıvı

film tabakasındaki türbülanslığın arttığından statik hold up'ın gittikçe küçüldüğü ve belli bir sıvı akış hızında dinamik hold up'ın kolonda tutulan total sıvı miktarı ile eşitlendiği görüşü etkinlik kazanmaktadır. Düz kanal modeli üzerinde yapılan bir değerlendirme sonucunda laminer ve türbülanslı sıvı akış bölgeleri için hold up'ı modelleyen iki ayrı korelasyon türetilmiştir [53]. Ancak, Bemer-Kalis [56] basınç düşmesi modelinde yer alan türbülanslı rejim hold up bağıntısının tek seçenek olarak Leva'nın hava-su sistem verileri ile uyum içinde olduğu anlaşılmıştır. Tablo 4'teki verilere dayalı olarak sıvı tutunmasını modelleyen bağıntılardan Bemer-Kalis modeli en güvenilir sonuçlar vermektedir.

Genellikle, HETP, k , a_e ve h_L 'ye ilişkin modellerin performanslarını etkileyen deney düzeneği, dolgu geometrisi, sistem özellikleri ve kütle iletim mekanizmasının özgül olması nedeniyle, bu tip etkilerin karşılaşılan münferit durumlara bağlı olarak değerlendirilmesi en doğru ve etkili yol olarak görülmüştür. Ancak, geniş kapsamlı bir veri topluluğuna sahip genel maksatlı algoritmalara literatürde hiç rastlanmamaktadır. Bunun nedeni ise, çok sayıda değişkenin bağımsız olarak analizini rasyonel bir algoritma içerisinde birleştirmenin matematiksel açıdan çok zor oluşudur. Burada inceleme konusu olan istatistik değerlendirme ve teorik model hesaplama yöntemleri, lüzumlu görüldüğü takdirde ilgili model modifikasyonları yapılmak suretiyle, genel bir dolgulu kolon tasarım algoritmasının temel taşlarını oluşturabilecek niteliktedir.

4.2. Gelişigüzel Yerleştirilmiş Dolgulu Kolonlara İlişkin Basınç Düşmesi ve Boğulma Hızı Korelasyonları (Pressure Drop and Flooding Rate Correlations for Randomly Packed Columns)

Dolgulu kolonlarda en önemli çalışma kısıtlamalarından biri de kolondaki aşırı basınç düşmesidir. Tabanda buharlaşan maddeyi yukarıya doğru sürebilmek için buharın enerji potansiyeli dolgu maddesi yüzeyine olan sürtünmenin ve sıvı akışının getirdiği dirençleri yenecek kadar yeterli olmalıdır. Buharın enerji potansiyeli sıvınınkinden çok daha büyük olduğunda, yükselen buhar sıvının aşağı doğru normal akışını engellemeye başlar. Bu şartlarda fazla sıvı önce küçük birikintiler halinde toplanır, sonra yukarı doğru zorlanır ve kolon tamamen sıvı ile dolar, boğulur. Bu nedenle, bir kolonun kararlı çalışması için basınç düşüşünü kontrol altında tutmak gerekir. Dolgulu kolonlarda dolgu geometrisi ve boyutları, sıvı debisi ve buhar hızı basınç düşüşünü etkileyen başlıca büyüklüklerdir. Log değeri olarak buhar debisine karşı basınç düşüşü grafiklenirse, önceleri bu iki değişken doğrusal bir değişim gösterirken bir noktadan sonra eğri artan bir hızla yükselir. Doğrusallıktan sapmanın olduğu ilk noktaya "yükleme" noktası denir. Gaz akış debisinin artmasıyla bir noktada eğrinin eğimi düşülecektir. Bu durumun gözlemlendiği noktaya da "boğulma" veya "taşma" noktası denir [58]. Boğulma noktası, genellikle, $P_g = f(u_G)$ grafiğinde eğrinin keskince yukarı dönüp dik bir çizgiye yaklaştığı yer olarak tanımlanır. Silvey ve Keller [36] boğulma noktasını, kolon basınç düşmesi, HETP ve sıvı tutunmasının aşırı bir şekilde arttığı

Tablo 4. Pilot ölçekteki dolgulu damıtma kolonuna^a ilişkin hava-su teorik sıvı tutunması (h_L) sonuçlarının karşılaştırılması
(Comparison of the theoretical air-water liquid hold-up results for a pilot scale packed distillation column)

Su debisi, V_L (l/h)	% Sıvı tutunması, h_L (m^3 sıvı/ m^3 kolon)100 ^b			
	Bemer-Kalis [56] (%)	Buchanan [54] (%)	Otake-Okada [53] Laminer (%)	Türbülant (%)
2	0,68 (0,69) ^c	1,44	0,95	0,65
4	1,08 (1,11)	1,86	1,35	1,04
6	1,41 (1,52)	2,17	1,67	1,37
8	1,71 (1,79)	2,44	1,93	1,67
10	1,98 (2,05)	2,67	2,16	1,94
12	2,24 (2,36)	2,88	2,37	2,20
16	2,71 (2,87)	3,26	2,75	2,68
21	3,25 (3,38)	3,68	3,16	3,22
27	3,84 (3,96)	4,13	3,59	3,88
35	4,57 (4,61)	4,68	4,10	4,56
40	4,99 (5,25)	5,00	4,38	4,99
45	5,40 (5,69)	5,31	4,66	5,40

^a Dolgulu kolon özellikleri: dolgu maddesi çapı $d_p = 6,25$ mm, dolgu özgül yüzey alanı $a_p = 1037,3$ m^2/m^3 , kolon boşluk kesri $\varepsilon = 0,545$ m^3/m^3 , kolon iç çapı $d_k = 9$ cm, dolgu yatağı yüksekliği $Z = 1,89$ m [41], [42]. ^b Ortalama sapma değeri Bemer-Kalis modeli için %11,8, Buchanan modeli için %43,3, Otake-Okada modeli için de %12,1 dir.

^c Deneysel sıvı tutunması verileri parantez içinde gösterilmiştir.

ve dolgu yatağı tepesinde bir sıvı tabakasının oluştuğu gaz hızı olarak tarif eder. Sonuç olarak, yükleme noktasının yukarısında kolonda kararlı işlem ve uyumlu temasın sağlanamayacağı gibi kütle iletimi de gereğinden düşük olacaktır. Bu nedenle, optimum verim için operasyon bu noktaların altında gerçekleştirilir. Ancak, tasarım uygulamaları için boğulma noktası önemli bir referans büyüklüğüdür. Nitekim tasarım boğulma hızının %70-%80'i gibi belli bir orana göre yapılır [6]. Bu amaca yönelik olarak, tasarım aşamasında basınç düşmesi ve boğulma hızlarının teorik olarak hesaplanması beklenir. Rukovena ve Koshy [23] ise, tasarım uygulamalarına özgün optimum boğulma oranını %90 olarak göstermektedir. Senol [42], tasarım büyüklüklerinin diferansiyel hız değişimlerini analiz ederek optimum boğulma oranının analitik olarak tanımlanabileceğini bulmuştur. Böyle bir problemin analitik çözümünü kolaylaştıracak yeni model formülasyonları (Eş. 5) da aynı araştırmacı tarafından türetilmiştir [42].

$$\frac{d(a_e)}{d(\%Fl)} = 0, \frac{d^2(a_e)}{d(\%Fl)^2} < 0 \text{ ve}$$

$$\frac{d(\text{HETP}^{-1})}{d(\%Fl)} = 0, \frac{d^2(\text{HETP}^{-1})}{d(\%Fl)^2} < 0 \quad (5)$$

Hughmark [52], geliştirdiği kütle iletimi tasarım modelinde hava-su sistemine ait basınç düşmesi ve boğulma hızı niceliklerine de yer vermiştir. Benzer modeller ileride kullanılabilir düşüncesiyle söz konusu büyüklükleri modelleyen önemli teorik bağıntıları incelemekte fayda vardır. Basınç düşmesi ve boğulma hızı modelleri Tablo 5'te verilmiştir. Genellikle dolgulu kolonlarda kuru basınç düşüşü Ergun eşitliği [2] veya bunun değiştirilmiş şekilleri ile tanımlanmaktadır. Pilot ölçekteki bir dolgulu kolona

ilişkin kuru hava basınç düşüşü deney sonuçları [65], Ergun ve Leva tarafından verilen bağıntılar ile Bemer ve Kalis'in eşdeğer kuru basınç düşüşü bağıntısı yardımıyla hesaplanan teorik değerler ile karşılaştırılmıştır. Dolgu geometrisine ilişkin model düzeltme katsayılarının katılımıyla hesaplanan kuru basınç düşmesi sonuçlarına göre Bemer-Kalis modeli %10 hata ile Ergun modeli %13,5 hata ile ve Leva modeli de %21 hata ile deneysel verileri temsil etmektedir. Aynı deney düzeneği çerçevesinde [66], muhtelif su besleme debilerinde boğulma noktasına kadar kademeli arttırılan hava hızlarına karşılık basınç düşüşü ve boğulma hızı değerleri ölçülmüş olup su debisi-hava hızı-basınç düşmesi değişimlerine ilişkin teorik model sonuçları ile deneysel ölçümler karşılaştırılmıştır. Hava-su sisteminde elde edilen deney sonuçlarını teorik model hesaplamaları ile karşılaştırmak için literatürde verilen ıslak basınç düşmesi ve boğulma hızı bağıntılarından en geçerli üç model seçilerek bu sisteme uyarlanmıştır. Islak basınç düşmesi modellerinden Leva, Eckert, Bemer-Kalis ve Stichlmair yaklaşımları geniş veri tabanına dayanmaktadır. Eckert ve Hanley boğulma hızı bağıntıları ise, değişik sistemlere uygulanabilirliği açısından avantaj sağlamaktadır. Çalışma şartlarında en iyi performansı verebilecek modelin seçimi tasarımcıların önemli bir problemidir. Bir teorik modelin doğrudan işletilmesi prensibine dayalı tasarım yöntemleri genellikle olumsuz neticeler vermektedir. Zira sistem özellikleri veya çalışma şartları değiştikçe bir modelin performansı da geniş sınırlar arasında oynayabilmektedir. Genellikle, yüksek sayıda teorik değer ve denel ölçümlerinin değerlendirilmesi gerektiği durumlarda güvenilir ve geniş tabanlı bir sonuç için standart bir temele dayalı istatistik analiz yöntemleri uygulanır ve elde edilen istatistik ölçütleri karşılaştırılarak en uygun model seçilir. Boğulma hızı veya basınç düşüşü değişkeni cinsinden seçilen deneysel ve teorik sonuçlar log oranı objektif fonksiyonuna göre değerlendirilmiştir [42].

Tablo 5. Gelişigüzel yerleştirilmiş dolgulu kolonlara ilişkin kuru ve ıslak basınç düşmesi ($\Delta P_0/Z$, $\Delta P/Z$) ve boğulma hızı (G_f) modelleri (The dry and wet pressure drop ($\Delta P_0/Z$, $\Delta P/Z$) and flooding rate (G_f) models for randomly packed columns)

Model Adı ve Kaynak	Eşitlik
1. Kuru basınç düşüşü ($\Delta P_0/Z$) yaklaşımları	
Ergun [2]	$f_s = (\Delta P_0/Z) \left\{ d_p^2 \varepsilon^3 / [\mu_G u_G (1-\varepsilon)^2] \right\} = 150 + 1,75 Re_G / (1-\varepsilon)$
Wentz-Thodos [2]	$f_s = [0,396 Re_G / (1-\varepsilon)] / \left\{ [Re_G / (1-\varepsilon)]^{0,03} - 1,20 \right\}$
Handley-Heggs [2]	$f_s = 360 + 1,24 Re_G / (1-\varepsilon)$
Hicks [2]	$f_s = 6,8 [Re_G / (1-\varepsilon)]^{0,8}$
Leva [57]	$\Delta P_0/Z = C_1 G^2 / \rho_G = C_1 \rho_G U_{Gs}^2$
Bemer-Kalis [56]	$\Delta P_0/Z = 0,29 F_g^2 F_p \phi^2$
Stichlmair vd. [30]	$\Delta P_0/Z = 0,75 f_0 [(1-\varepsilon) \rho_G \mu_G^2 / (\varepsilon^{4,65} d_p)]$
2. Islak basınç düşüşü ($\Delta P/Z$) yaklaşımları	
Leva [57]	$P_g = \Delta P/Z = C_2 10^{C_3 L} (G^2 / \rho_G)$
Buchanan [55]	$P_g (d_p / \rho_G u_{gs}) = 7,8 (1 + 52 / Re_G) [1 - 2,0 (h_L - 0,01)]^{-5}$
Eckert [26]	$y = [G^2 F_p \Psi / (g \rho_G \rho_L)] (\mu_L / \mu_w)^{0,2} \propto f(P_g, x = (L/G) (\rho_G / \rho_L)^{0,5})$
Norton Co. [58]	$y = [G^2 F_p / (\rho_G (\rho_L - \rho_G))] (v_L / v_w)^{0,1} \propto f(P_g, x)$
Bemer-Kalis [56]	$\Delta P/Z = (\Delta P_0/Z) \left\{ 1 - [h_L / (2x_d^{5/3} \phi \varepsilon)] \right\}^{-5}$
Stichlmair vd. [30]	$\Delta P/\Delta P_0 = [(1-\varepsilon + h_L) / (1-\varepsilon)]^{(2+C)/3} [\varepsilon / (\varepsilon - h_L)]^{4,65}$
Hanley vd. [43] ^a	$(\Delta P/Z)_{i,f} / (\Delta P/Z)_{i,d} = (1 - C_L / C_L^*)^{-n}$
3. Boğulma hızı (G_f) yaklaşımları	
Sherwood vd. [59]	$y = G_f^2 a_p \mu_L^{0,2} / (g_c \varepsilon^3 \rho_G \rho_L) \propto f(x = F_{LG} = (L/G_f) (\rho_G / \rho_L)^{0,5})$
Lobo vd. [60]	$y = G_f^2 a_p \mu_L^{0,2} / (g_c \varepsilon^3 \rho_G \rho_L) \propto f(x = F_{LG} = (L/G_f) (\rho_G / \rho_L)^{0,5})$
Zenz [61]	$y = L a_p \mu_L^{0,2} / (3600^2 g_c \varepsilon^3 \rho_L^2) \propto f(x = (L/G_f) (\rho_G / \rho_L)^{0,5})$
Chen [62]	$y = L^2 a_p \mu_L^{0,2} / (g_c \varepsilon^3 \rho_L^2) \propto f(x = (L/G_f) (\rho_G / \rho_L)^{0,5})$
Eckert [26]	$y = [G^2 F_p \Psi / (g \rho_G \rho_L)] (\mu_L / \mu_w)^{0,2} \propto f(x = (L/G_f) (\rho_G / \rho_L)^{0,5})$
Hanley vd. [43] ^a	$G_f^2 a_p / (g \varepsilon^3 \rho_G \rho_L \sin^3 \theta) = 2\Omega^4 / \left\{ 1 + q [(L/G_f) (\rho_G / \rho_L)^{0,5}]^{1/2} \right\}^4$
Senol [41] ^b	$f(G_f) = \ln(AB^2) + 3,84445 - 0,9182 \ln(B/G_f) + 0,1282 (\ln(B/G_f))^2 = 0$
Modifiye Lobo modeli [63] ^c	$G_f = B \times \exp[-6,1524 + 3,1653(-1 - 1,1957 \ln(AB^2))^{0,5}]$
Modifiye Eckert modeli [64]	$y = G_f a_p \mu_L^{0,2} / (\varepsilon^3 (\rho_G / \rho_L)^{0,5}) = f(x = L(a_p \mu_L^{0,2} / \varepsilon^3)^{0,5})$

^a Gelişigüzel yerleştirilmiş ve düzgün istiflenmiş (örgü tipi) dolgular için geliştirilen ortak model; gelişigüzel yerleştirilmiş dolgu maddesi için $\sin^3 \theta = 1$ dir. ^b $B = L(\rho_G / \rho_L)^{0,5}$, $A = F_p \mu_L \Psi / (g \rho_G \rho_L)$, $\Psi = \rho_w / \rho_L$. ^c $B = L(\rho_G / \rho_L)^{0,5}$, $A = a_p \mu_L^{0,2} / (g \varepsilon^3 \rho_G \rho_L)$.

Log oranı, hiç şüphesiz model güvenilirliği analizi için en elverişli OF türüdür. Önce, sınırlı sayıda değişken ihtiva eden bir veri külüğü için OF'nin aritmetik ortalaması (X_{ort}) ve standart sapma (S) parametreleri hesaplanır. Tasarımlanan sistem büyüklüğünün fiziksel karakterine göre $\pm tS$ alt veya üst sınırlardan biri kritik sınır olarak belirlenir ve tekabül eden istatistik faktörler hesaplanır. Burada isabet olasılığı %95 olarak seçilmiştir. Diğer bir deyimle, her 20 tasarım uygulamasında 19 tasarım sonucunun olumlu netice vereceği kabul edilmektedir. Özetle, log oranı esasına göre hesaplanması gereken büyüklükler kronolojik sıra ile: log oranı objektif fonksiyonu $X_i = \ln(Y_i / Y_{mod})$, Y_i gözlemlenen değer, Y_{mod} model değeri, $X_{ort} = \sum X_i / n$ OF'nin ortalama

değeri, $S = [\sum (X_i - X_{ort})^2 / (n - 1)]^{0,5}$ standart sapma, n deneme sayısı, $n - 1$ sistem serbestlik derecesi, $F_m = \exp(X_{ort})$ model normalleştirme faktörü, $F_s = \exp(tS)$ emniyet faktörü, t Student sayısı, F_{od} toplam tasarım faktörüdür. Basınç düşüşü modelleri için $F_{od} = F_m \times F_s$, boğulma hızı modelleri için de $F_{od} = F_m / F_s$ dir [42]. Toplam tasarım faktörü (F_{od}), önceden seçilen bir olasılığa göre müspet bir tasarım sonucu elde etmek için modele uygulanması gereken toplam düzeltme faktörüdür. Tablo 6'da kantitatif ölçütler (S , F_m , F_s , F_{od}) cinsinden gösterilen istatistik analiz sonuçları, basınç düşmesi ve boğulma hızı modellerinin performansları hakkında daha gerçekçi ve net bilgiler vermektedir. F_{od} faktörü, genel anlamda tasarım büyüklüğündeki hata payının

net bir ölçüsüdür. Tablo 6'da toplu halde verilen kantitatif F_{od} faktörleri karşılaştırıldığında, üç basınç düşmesi modelinden Leva modeli deney sistemini en az hata ile tanımlamaktadır. 1,186 olarak belirlenen F_{od} değerinin anlamı, Leva modeli aracılığı ile %95 oranında başarılı bir tasarım sonucu elde etmek için bu modelin öngördüğü teorik basınç düşmesi değerinin yaklaşık %18,6 nispetinde daha büyük alınması gerekmektedir. Her ne kadar Bemer-Kalis modeline ilişkin ortalama tasarım hatası %24 civarında ise de, bu yararlı yaklaşım kuru ve ıslak basınç düşüşü, sıvı tutunması, dolgu geometrik özellikleri ile gaz akış hızının birbirine karşılıklı etkilerini yansıtmakta olup değişkenler topluluğu açısından tasarım uygulamaları için avantaj sağlamaktadır. Eckert basınç düşmesi modeli için öngörülen 4,01 F_{od} değeri çok yüksek mertebede olup, model performansını iyileştirmek için katsayı değişikliğine ihtiyaç vardır. Boğulma hızlarını modelleyen ampirik esaslı bağıntılardan Lobo ve Eckert modelleri hava-su sistem davranışlarını daha iyi tanımlayabilmektedir; Senol modeli ise trikloroetilen/n-heptan sisteminde iyi neticeler vermektedir. Senol modeli için geliştirilen çözüm yönteminin hem hesap süresinin uzunluğu ve hem de çözümlerin doğruluğu bakımından önemli avantajları vardır. Zira bu tip algoritmaların kuruluşları, grafiksel çözüme dayalı (Eckert, Lobo) hesap yöntemlerinin okuma hatalarının birikmesinden doğan kararlılık veya yakınsama zorluklarının ortaya çıkmasına imkan vermemektedir. Sonuç olarak, pratik amaca dönük uygun bir tasarım modeli seçilmelidir.

4.3. Düzgün İstiflenmiş Dolgu Maddelerine İlişkin Tasarım Modelleri (Design Models for the Structured Packings)

Düzgün istiflenmiş örgü/kafes tipi dolgulara ilişkin sınırlı sayıdaki tasarım yaklaşımlarından pratik geçerliliği olan Rocha vd.nin SRP-I (Separations Research Program I) hidrolük [67] ve kütle iletim [68] modelleri, Fair ve Bravo'nun [69] modifiye SRP modeli, Gualito vd.nin [19] SRP-II (Separations Research Program II) modeli, Billet ve Schultes [51], Li vd. [70], Lipnizki ve Field [71], Spiegel ve Meier [72] ve Cussler'in [74] ayırma etkinliği, kütle iletim katsayısı, fazlararası etkin yüzey alanı ve sıvı tutunması yaklaşımları ile Billet ve Shultes [51], Gualito vd. [19],

Stichlmair vd. [30], Li vd. [70], Spiegel ve Meier [73], Yang vd. [75] ve Robbins'in [76] geliştirdikleri basınç düşmesi ve boğulma hızı bağıntıları fiziksel kule tasarımı için en uygun gelen modellerdir.

Ayrıca, örgü tipi dolgu düzeneğine özgün basınç düşmesi, kütle iletim katsayısı ve fazlararası yüzey alanı niceliklerini birleştiren çeşitli yaklaşımlar da teklif edilmiştir [51]. Gelişim sürecindeki tasarım güvenilirliği itibarıyla, öncelikli olarak geliştirilmiş SRP algoritmasında yer alan tasarım eşitlikleri ve bunların değiştirilmiş halleri değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, çok özel yapıdaki kovuklu elyaf modüllü membran tipi dolgular için geliştirilen kütle iletimi tasarım modellerinin performansları da literatür verileri çerçevesinde irdelenmiştir [75].

Konunun geniş ve karmaşık olması nedeniyle sınırlı sayıda yaklaşımlar değerlendirmeye alınmıştır. Bu alanda en fazla rağbet gören SRP algoritmasındaki tasarım eşitlikleri, Li vd.nin [70] bağıntıları ve membran tipi dolgular için geliştirilen yaklaşımlar Tablo 7'de gösterilmiştir. Genellikle, düzgün istiflenmiş örgü tipi dolguların tasarımına dönük en önemli iki geometrik özellik kanal açısı ve kanal genişliğidir. Bu geometrik özelliklere istinaden endüstriyel ölçekli modern örgülü dolguları üreten Koch-Glitsch ve Sulzer-Chemtech firmalarının geliştirdikleri Tower Design (TD) isimli tasarım algoritmalarının temelleri kuruluş itibarıyla SRP kökenli bağıntılara dayanır. Algoritmaca en güvenilir sonuçlar, tasarım aracı olarak SRP-II algoritmasında yer alan kolon ayırma etkinliği, etkin fazlararası yüzey alanı, kütle iletim katsayısı, boğulma hızı ve sıvı tutunması yaklaşımları ile alınmıştır [19].

Nitekim 0,33 ile 20,4 bar arasında değişen işletme basıncı koşullarında Flexipac 2, Flexeramic, Mellapak 250Y, 350Y, Intalox 2T, Maxpak, Sulzer BX, Gempak 2A, 2AT ve Glitsch tipi düzgün istiflenmiş dolgulu kolonlarla elde edilen deneysel veriler ile SRP model sonuçları karşılaştırıldığında Gualito'nun SRP-II modeli [19] deneysel HETP ve basınç düşmesi verilerini ortalama %19 ve %25 hassasiyetle temsil etmektedir; buna karşılık SRP-I'in basınç düşmesi [67] ve kütle iletimi [68] yaklaşımları aynı sistem ve işletme koşulları için ortalama %30 hata vermektedir.

Tablo 6. Basınç düşmesi ($\Delta P/Z$) ve boğulma hızı (G_f) modellerine ilişkin istatistik faktörler
(Statistical factors for the pressure drop ($\Delta P/Z$) and flooding rate (G_f) models)

Kriter ^b	Basınç düşmesi modeli			Boğulma hızı modeli		
	Leva	Eckert	Bemer-Kalis	Lobo	Eckert	Senol
n^c	103	103	103	14	14	14
X_{ort}	-0,0282	1,1731	0,0127	-0,3210	-0,3505	-0,3020
S	0,1204	0,1301	0,1212	0,0327	0,1273	0,0542
F_s	1,2198	1,2395	1,2214	1,0554	1,2337	1,0936
F_m	0,9722	3,2319	1,0128	0,7254	0,7043	0,7393
F_{od}	1,1858	4,0060	1,2370	0,6873	0,5709	0,6761
t	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65

^a Dolgulu kolon özellikleri: dolgu maddesi çapı $d_p = 6,25$ mm, dolgu özgül yüzey alanı $a_p = 1037,3$ m²/m³, kolon iç çapı $d_k = 9$ cm, dolgu yatağı yüksekliği $Z = 1,89$ m, test karışımları hava/su ve trikloroetilen/n-heptan. ^b İstatistik faktörler %95 isabet olasılığı ($t = 1,65$) değeri için hesaplanmıştır. ^c n deneme sayısıdır.

Tablo 7. Düzgün istiflenmiş dolgulara ilişkin SRP tasarım modelleri (The SRP design models for the structured packings)

A. SRP-I kökenli hidrolik [67] ve kütle iletim [68] modelleri: HETP, k_G , k_L , a_e , $\Delta P_0/\Delta Z$, $\Delta P/\Delta Z$ ve h_L yaklaşımları ^a
$\text{HETP} = [\ln \lambda / (\lambda - 1)] (H_G + \lambda H_L) = [\ln \lambda / (\lambda - 1)] [U_{Gs} / (k_G a_e) + \lambda U_{Ls} / (k_L a_e)]$ $k_G = 0,054 (D_G / S) [(U_{Ge} + U_{Le}) \rho_G S / \mu_G]^{0,8} [\mu_G / (D_G \rho_G)]^{0,33}$ $k_L = 2 [D_L U_{Le} / (\pi S)]^{0,5}$ $U_{Ge} = U_{Gs} / [\varepsilon (1 - h_L) \sin \theta]; U_{Le} = [U_{Ls} / (\varepsilon h_L \sin \theta)]$ $a_e / a_p = F_{SE} [29,12 (We_L Fr_L)^{0,15} S^{0,359}] / [Re_L^{0,2} \varepsilon^{0,6} (1 - 0,93 \cos \gamma) (\sin \theta)^{0,3}] = F_{SE} F_t$ $\Delta P_0 / \Delta Z = 0,1775 \rho_G U_{Gs}^2 / [S \varepsilon^2 (\sin \theta)^2] + 88,774 \mu_G U_{Gs} / (S^2 \varepsilon \sin \theta)$ $\Delta P / \Delta Z = (\Delta P_0 / \Delta Z) / [1 - (0,614 + 71,35 S) h_L]^5$ $h_L = (4 F_t / S)^{2/3} \{3 \mu_L U_{Ls} / [\rho_L \varepsilon g (\sin \theta) (1 - \rho_G / \rho_L) (1 - (\Delta P / \Delta Z) / (\Delta P / \Delta Z)_f)]\}^{1/3}$ $F_t = [29,12 (We_L Fr_L)^{0,15} S^{0,359}] / [Re_L^{0,2} \varepsilon^{0,6} (1 - 0,93 \cos \gamma) (\sin \theta)^{0,3}]$ $(\Delta P / \Delta Z)_f = 1500 + 65000 U_{Ls}$
B. SRP-II modeli (Gualito vd. [19]): a_e , $\Delta P_0/\Delta Z$, $\Delta P/\Delta Z$ ve h_L yaklaşımları ^b
$a_e / a_p = \left\{ (We_L Fr_L)^{0,15} A_1 S^{A_2} F_{SE} / [Re_L^{0,2} \varepsilon^{0,6} (1 - 0,93 \cos \gamma) (\sin \theta)^{0,3}] \right\} \{1,2 / [1 + 0,2 \exp(30 U_{Ls} / 2 U_{Gs})]\}$ $\cos \gamma = 0,90 \quad (\sigma < \sigma_{ref} \text{ N/m}); \quad \cos \gamma = B_1 \times 10^{B_2 \sigma} \quad (\sigma) \sigma_{ref} \text{ N/m}$ $\Delta P_0 / \Delta Z = (\rho_G / \rho_{hava,1bar})^{0,4} \left\{ C_1 \rho_G U_{Gs}^2 / (S \varepsilon^2 (\sin \theta)^2) \right\} + [C_2 \mu_G U_{Gs} / (S^2 \varepsilon \sin \theta)]$ $\Delta P / \Delta Z = (\Delta P_0 / \Delta Z) / [1 - (D_1 + D_2 S) h_L]^5$ $h_L = (4 F_t / S)^{2/3} \{3 \mu_L U_{Ls} / [\rho_L \varepsilon g (\sin \theta) (1 - \rho_G / \rho_L) (1 - (\Delta P / \Delta Z) / (\Delta P / \Delta Z)_f)]\}^{1/3}$ $F_t = [(We_L Fr_L)^{0,15} A_1 S^{A_2}] / [Re_L^{0,2} \varepsilon^{0,6} (1 - 0,93 \cos \gamma) (\sin \theta)^{0,3}]$ $(\Delta P / \Delta Z)_f = 1500 + 65000 U_{Ls}$
C. Modifiye SRP yaklaşımları
$a_e / a_p = F_t = [(We_L Fr_L)^{0,15} 0,76 f] / [Re_L^{0,2} \varepsilon^{0,6} (1 - 0,93 \cos \gamma) (\sin \theta)^{0,3}] \quad (\text{Shi-Mersmann [48]})$ $a_e / a_p = 1 - 1,203 (U_{Ls}^2 / Sg)^{0,111} \quad (\text{Spiegel-Meier [72]})$ $a_e / a_p = 0,5 + 0,0058 \times \% Fl \quad (\text{Fair-Bravo [69]})$
D. Li vd. nin [70] $\Delta P/Z$, h_L , u_f ve K_G yaklaşımları ^c
$\Delta P / Z = 6795 F^4 - 12026 F^3 + 6982 F^2 - 1012 F + 62$ $h_L = \left\{ a_p^2 \mu_L u_L / [(g/3) \rho_L - (\omega/4) a_p / (h_L (\varepsilon - h_L)^2)] \mu_G^2 \rho_G \right\}^{2/3}$ $\log [(u_f^2 a_p \rho_G \mu_L^{0,2}) / (g \varepsilon^3 \rho_L)] = 0,368 - 1,75 (L/G)^{1/4} (\rho_G / \rho_L)^{1/8}$ $Sh_{G,ort} = K_G M_G d_e / (\rho_G D_G) = 0,0638 Re_G^{0,79} Sc_G^{1/3}$
E. Kovuklu elyaf tipi membranlı dolgulara ilişkin toplam (K_G , K_L) ve bireysel (k_G , k_L) kütle iletim katsayıları
$1/K_G = 1/k_G + Hd_d / (k_M d_o) + Hd_d / (k_L d_i) \quad (\text{Yang vd. [75]})$ $1/K_L = 1/(Hk_G) + 1/(Hk_M) + 1/k_L \quad (\text{Gussler [74]})$ $k_G = Sh \times D_G / d_h = (Sh_1^3 + Sh_2^3)^{1/3} D_G / d_h \quad (\text{Lipnizki-Field [71]})$ $k_G d_h / D_G = 1,25 [d_h^2 u_G / (Zv_G)]^{-0,93} (v_G / D_G)^{0,33} \quad (\text{Gussler [74]})$ $k_L d_i / D_L = 1,62 [d_i^2 u_L / (ZD_L)]^{1/3} \quad (\text{Gussler [74]})$

^a HETP dolgu ayırma etkinliği, k_G ve k_L gaz ve sıvı fazlarına ilişkin bireysel kütle iletim katsayıları, a_e fazlararası yüzey alanı, $\Delta P_0/\Delta Z$ ve $\Delta P/\Delta Z$ kuru ve yaş basınç düşmesi, h_L sıvı tutunmasıdır.

^b SRP-II modelinde yer alan HETP, k_G , k_L , U_{Ge} ve U_{Le} tasarım eşitlikleri, SRP-I modelindeki eşanlamlı bağıntılar ile benzerdir [19].

^c $\Delta P/Z$ ıslak basınç düşmesi, h_L sıvı tutunması, u_f boğulma hızı, K_G toplam kütle iletim katsayısıdır.

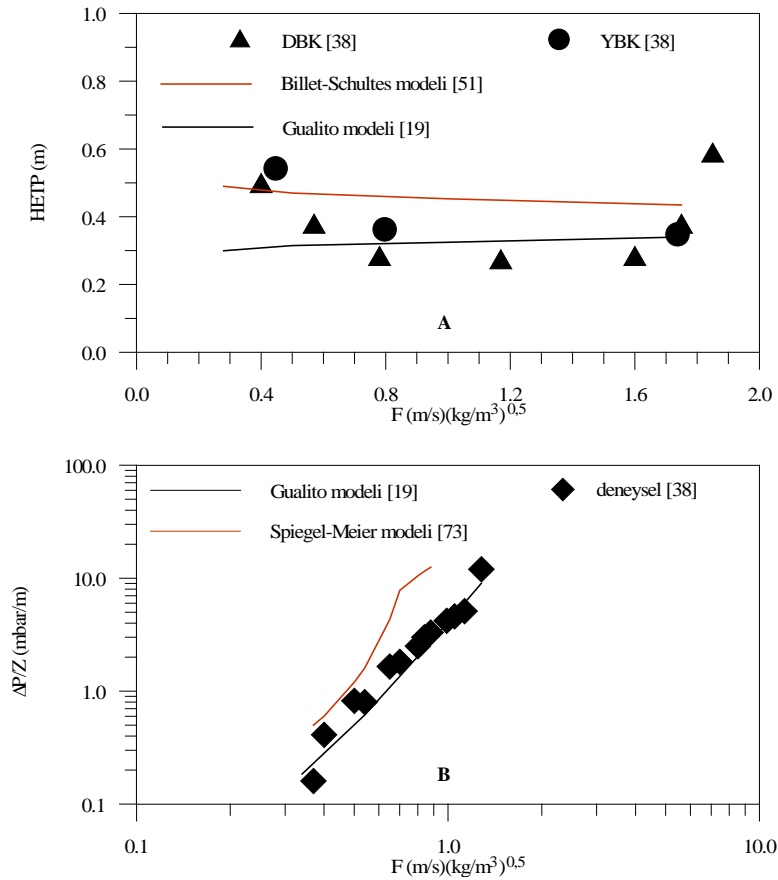
Literatürde verilen diğer modellere kıyasla SRP-II modelinin üstün tarafı hidrolik ve kütle iletimi dirençlerini tanımlayan değişkenlerin tasarım algoritması çatısı altında birleştirilmesidir. SRP-II modelinde yer alan A , B , C , D' , σ_{ref} ve F_{SE} düzeltme katsayılarının değerleri Tablo 8'de verilmiştir. SRP algoritmasında yer alan kütle iletim hızları ve kolon ayırma etkinliği yaklaşımları genel kapsamlı olduklarından hesap sonuçlarının deneysel sonuçlardan farklı olması olanağı varsa da elde edilen bilgiler bir dolgu kule tasarımını sağlamak için yeterlidirler. Fitz vd. [38], Mellapak 250Y düzgün istiflenmiş dolgu malzemesi ile doldurulmuş düşük ve yüksek basınçlı damıtma kolonlarına

ilişkin deneysel ve teorik ayırma etkinliği ve basınç düşmesi (Şekil 5) değerlerini karşılaştırmıştır. Şekil 5'te görüldüğü gibi, orta buhar yükü (F -faktörü) bölgesi için Billet-Schultes [51] modeline kıyasla Gualito'nun SRP-II modeli [19] HETP verilerini daha az hata ile temsil etmektedir. Ancak, heriki model de %80 boğulma oranına tekabül eden minimum HETP noktasını tanımlayamamaktadır. Şekil 5'te gösterilen basınç düşmesi modellerinden Gualito yaklaşımı Spiegel-Meier modeline oranla daha güvenilir yakınsama değerleri vermektedir. Sonuç olarak, gerek MINLP (Mixed-Integer Nonlinear Programming) [77] kökenli algoritmalar gerekse SRP algoritmaları aracılığıyla daha sağlıklı yakınsanmış

Tablo 8. SRP-II modelinde yer alan düzeltme katsayılarının değerleri [19] (Values of the coefficients used in the SPR-II model [19])

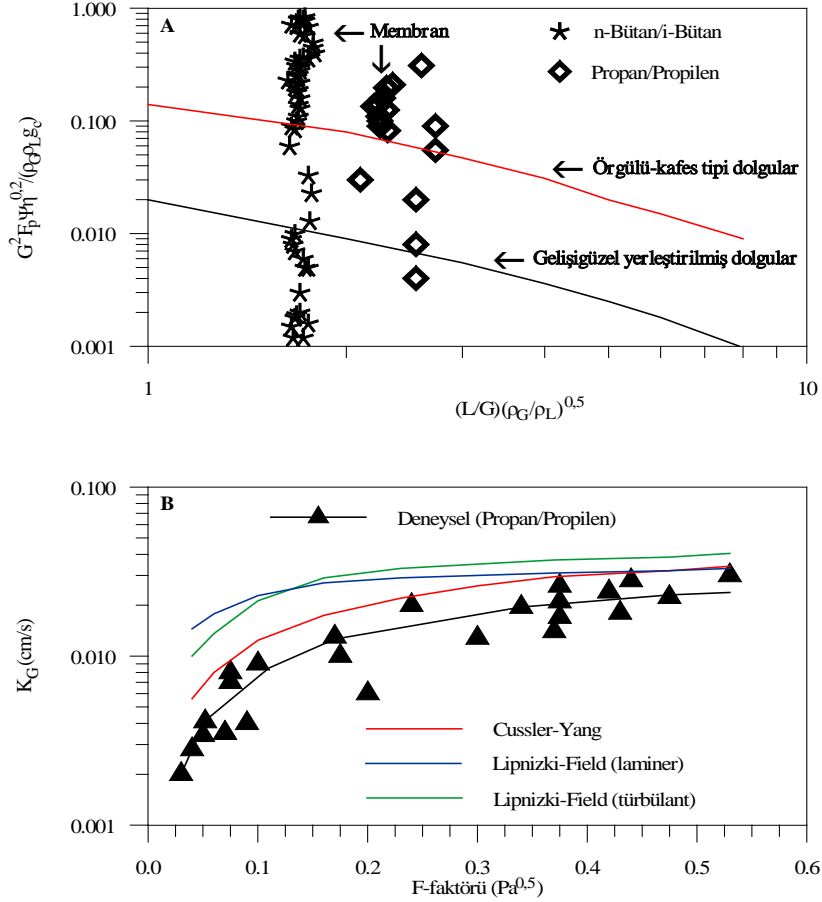
Malzeme ^a	A_1	A_2	B_1	B_2	σ_{ref}	C_1	C_2	D_1'	D_2'	F_{SE}
Metal	29,12	0,36	5,21	-16,83	0,045	0,177	88,77	0,614	71,35	0,35
Seramik	11,54	0,36	1,52	-3,51	0,065	0,244	0	0,532	92,22	0,46
Polipropilen	21,67	0,13	10,88	-30,92	0,035	0,134	44,06	0,633	130,90	0,46

^a Düzgün istiflenmiş örgü tipi dolgular.



Şekil 5. Mellapak 250Y örgülü dolgu malzemesine ilişkin deneysel ve teorik ayırma etkinliği (A) ve basınç düşmesi (B) değerlerinin karşılaştırılması i -bütan/ n -bütan sistemi, total reflüks DBK - düşük basınç kolonu YBK - yüksek basınç kolonu [38]

(Comparison of the experimental and theoretical separation efficiency (A) and pressure drop (B) values for the structured packing Mellapak 250Y i -butane/ n -butane system, total reflux DBK - low pressure column YBK - high pressure column [38])



Şekil 6. Kovuklu elyaf modüllü düzgün istiflenmiş dolgulara ilişkin deneysel ve teorik kolon kapasite parametresi (A) ve toplam kütle iletim katsayısı (B) değerlerinin karşılaştırılması [75]

(Comparison of the experimental and theoretical column capacity parameter (A) and overall mass transfer coefficient (B) values pertaining to the hollow fiber module structured packings [75])

sonuçları elde etmek mümkündür. Dolayısıyla, düzgün istiflenmiş damıtma kulesi tasarımı bu iki hesap yöntemi temeline oturabilir [78]. İçi boş elyaf modüllü nano/mikro gözenekli membranlar, damıtma işlemi için ideal bir yapılandırılmış dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır [74]. Bu tür temas sistemlerinde, buhar ve sıvı akışlarının kovuklu elyafın ayrı bölgelerinde yoğunlaştığından kolon boğulması ile ilgili hiçbir çalışma kısıtlaması yoktur. Yang vd. nin [75] deneysel sonuçlarına göre, membranlı bir damıtma kolonu, konvansiyonel düzgün istiflenmiş dolgulara kıyasla hem normal boğulma sınırlarının üzerinde hem de normal yükleme bölgesinin altında işletilebilir (Şekil 6). Ayrıca, elyaf duvarının kalınlığı birkaç mikrometre mertebesine küçüldükçe, zar tabakasının kütle iletimine karşı olan direnci büyük ölçüde en aza indirilir. Şekil 6'da görüldüğü gibi, yapılandırılmış içi boş elyaf modüllü membran tipi dolguların kapasite parametresi ($G^2 F_p \psi \eta L^{0.2} / (g_C \rho_G \rho_L)$) ekseriyetle boğulma noktasına tekabül eden eğrinin üstündedir [75]. Bunun nedeni ise, özel yapıdaki bu tip dolguların, çok dar bir yükleme faktörü ($(L/G)(\rho_G/\rho_L)^{0.5}$) aralığında buhar ve sıvının birbirinden farklı kanallardan akmasına izin vermesidir. Her ne kadar iki faz ters yönde hareket ediyor ise de fazların teması membran zarının içerisinde gerçekleşmektedir; dolayısıyla,

membranların bu fiziksel davranımı yüzünden konvansiyonel dolgulara oranla boğulma noktasının üzerinde olan akış debileri ile çalışma olanakları sağlanmaktadır (Şekil 6). Bu genişletilmiş buhar yükü çalışma aralığı sayesinde kovuklu elyaf modülleri, işletme potansiyeli açısından geleneksel düzgün istiflenmiş dolgulara kıyasla birim ekipman hacmi başına en az 10 kat daha verimli olabilmektedir [75]. Şekil 6'da propan/propilen sistemine ilişkin deneysel ve teorik toplam kütle iletimi katsayıları karşılaştırılmıştır [75]. Şekilde de görüldüğü gibi, değerlendirilmenin yapıldığı benzer ikili sistem ve membranlı dolgular için $K_G^{\text{teorik}} > K_G^{\text{deneysel}}$ olmasına karşın Cussler modeli [74] Lipnizki-Field yaklaşımlarına [71] oranla deneysel verilere daha yakın sonuçlar vermektedir. Ancak, bu değerlendirilmenin etkinlik kazandığı orta buhar yükleme faktörü ($F = u_G \rho_G^{0.5}$) aralığı için geçerlidir. Düşük ve yüksek buhar yükü bölgeleri için ise K_G^{teorik} ve K_G^{deneysel} değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülür. Bunun nedeni ise, hesaplanan Reynolds sayısı $Re < 1500$ olsa bile, kovuklu elyaf modülünde gelişen akışkan akımının türü genellikle türbülant ya da ara geçiş rejimidir [75]. Membranlı kolonların performansları ile ilgili olarak Yang vd. [75], Zhang ve Gussler [79] tarafından yapılan incelemelerin neticesinde, membranın morfolojik ve şişebilirlik özellikleri,

membranın yapıldığı seramik veya polimer malzemesi ve birim membran alanındaki gözenek sayısı damıtma işlemi için en belirleyici etkenler olarak görülmüştür.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Dolgu maddesinin seçimi kulinin verimini, ekonomisini ve ömrünü doğrudan etkiler. Son derece etkin olan yeni tür rastgele veya yapılandırılmış dolgular, tepsilere tercih edilmekte olup aşağıdaki işletme gereksinimleri karşılayabilmektedir: (i) maksimum buhar ve sıvı arafaz yüzey alanı, (ii) dolgu yüzey alanının düzenli yayılımı, (iii) sıvının serbestçe drenajı, (iv) kolon boyunca düzgün buhar-sıvı dağılımı, (v) kolay buhar-sıvı ayırma işlemi. Ancak karmaşık fiziksel görünümü yüzünden bu büyüklüklerin deneysel ölçümü çoğu kez başarısız olmaktadır. Bu nedenle, çeşitli tasarım modellerinin güvenilirliği hakkında kantitatif bilgi verebilecek istatistik kriterlere ihtiyaç vardır.

Muhtelif dolgu geometrilerinden ileri gelen etkilerin algoritmalarca değerlendirilmesi, bu çalışmanın ilgi alanını teşkil etmektedir. Zira geometrik ve boyutsal değişimlerin etkileri ile birlikte sistem özellikleri ve kütle aktarım mekanizmasını da dikkate alan çalışmalar genellikle çok sayıda tasarım büyüklüğünü ilgilendiren matematiksel model geliştirme sahasında etkinlik kazanmaktadır. Bu sebeplerden dolayı, değişik dolgu maddesi geometrilerine ilişkin basınç düşmesi, kolon kapasitesi, dolgu ayırma etkinliği ve optimum buhar hızı çalışma sahası gibi dolgulu bir kolonun boyutlandırılmasında yer alan temel niceliklerin deneysel ve teorik analizleri metodik bir sıra ile gerçekleştirilmiştir. Geometrik yapı açısından Raschig halkasına benzeyen yeni halkalı dolgu maddesini kullanmak suretiyle, hava-su ve trikloretilen-*n*-heptan denel sistemleri çerçevesinde dolgulu kolona ilişkin ayırma etkinliği, boğulma hızı, sıvı tutunması ve fazlararası yüzey alanı tasarım modellerinin performans ve istatistik analizi yapılmıştır. Buna paralel olarak genel bir dolgulu kolon tasarım algoritmasında kullanılmak üzere, düzgün istiflenmiş dolgulara ve de membranlı dolgu malzemesine ilişkin en başarılı teorik modellerin öngördüğü değerleri, literatürde yer alan veri tabanı çerçevesinde irdelenmiştir. Burada konulan ana hedef ise, literatür verilere dayalı olarak geliştirilmiş tasarım modellerinin güvenilirlik seviyelerinin belirlenmesidir. Bunun yanında, söz konusu geliştirilmiş kütle iletimi, sıvı tutunması, boğulma hızı ve basınç düşmesi modellerinin değerlendirme kapsamına girmeyen diğer dolgu maddesi profilleri için de iyi neticeler verebileceği düşünülmektedir. Böylece, literatür çalışmalarından farklı olarak makalede damıtma konusuna modellerin tasarım güvenilirliğini de kapsayacak şekilde yeni bir bakış açısı getirilmiştir. Bu bağlamda, söz konusu etkilerin sonuçlarını değerlendirecek, aynı zamanda çok sayıda dolgu geometrileri, sistemleri ve de temel tasarım büyüklüklerini içeren genel amaçlı bir algoritmanın geliştirilmesi hasıl olur. Bu bakımdan, değerlendirmeye alınan bütün modeller tasarım kolaylığı sağlayabilecek niteliktedir.

6. SİMGELER (SYMBOLS)

A	Katsayı
A_0	Akma setinin kesit alanı (m^2)
A_k	Kolon kesit alanı (m^2)
$A_L; A_G$	Düzeltilme katsayıları
a_e	Etkin fazlararası yüzey alanı (m^2/m^3)
a_p	Kuru dolgu maddesinin özgül yüzey alanı (m^2/m^3)
a_w	Islak yüzey alanı (m^2/m^3)
B	Katsayı
$C; C'$	Katsayı
c_i	Katsayı
$c_G; c_L$	Fazlararası yüzeyindeki buhar ve sıvının molce derişimi (mol/cm^3)
C_L	Hacimsel sıvı akış hızı ($m^3/m^2 \cdot s$)
C_L^*	Boğulma noktasındaki hacimsel sıvı akış hızı ($m^3/m^2 \cdot s$)
C_{pk}	Dolgu maddesine ilişkin boyutsuz katsayı
Ca_L	Sıvı faz kapiler sayısı, $\mu_L L / (\rho_L \sigma g_c)$
D	Difüzyon katsayısı (m^2/s)
$D_1'; D_2'$	Katsayılar
D_s	Sıvı yayılma faktörü
D_{out}	Destilat miktarı (kg/s)
∂	Diferansiyel simgesi
$d_d; d_i; d_o$	Membran dış, iç ve ortalama çapları (m)
d_e	Eşdeğer çap (m)
d_h	Hidrolik çap (m)
$d_{ho}; d_{kam}$	Delik veya kampana çapı (mm)
d_k	Kolon iç çapı (m)
d_p	Dolgu maddesi çapı (m)
d_p'	Dolgu maddesi yüzeyine eşdeğer olan bir kürenin çapı (m)
E_0	Etkinlik faktörü
E_c	Ekonomi faktörü
E_M	Murphree tepsi etkinliği
$E_{fG}; E_{fD}$	Sıvı dağılımına ilişkin global etkinlik ve dispersiyon etkinliği
F	Buhar yükleme faktörü, $u_G \rho_G^{0.5} [m/s(kg/m^3)^{1/2}]$
F_{LG}	Sıvı-buhar akış parametresi, $(L/G)(\rho_G/\rho_L)^{0.5}$
F_m	Normalleştirme faktörü
F_{od}	Toplam tasarım faktörü
F_p	Dolgu faktörü, $a_p/\varepsilon^3 (m^{-1})$
F_s	Emniyet faktörü
F_{SE}	Etkin yüzey alanı için düzeltme katsayısı
F_t	Toplam sıvı tutunması için düzeltme katsayısı
Fi_L	Sıvı faz film sayısı, $Fr_L/Re_L = a_p^2 \mu_L / (g \rho_L^2)$
% Fl	% Boğulma oranı, $100G/G_f (%)$
Fr_L	Sıvı faz Froude sayısı, $a_p L^2 / (g \rho_L^2)$
f	Fonksiyon simgesi
f'	Dolgu maddesine ilişkin Shi-Mersmann düzeltme faktörü
f_0	Korelasyon katsayısı, $C_1/Re_G + C_2/Re_G^{0.5} + C_3$
f_{bk}	Sıvının işgal ettiği kolon boşluk kesri
f_s	Sürtünme katsayısı, $f_s = 2\varepsilon(\Delta P/Z)/(a_p u_G^2)$
G	Kütleli gaz akış hızı ($kg/m^2 \cdot s$)
G_f	Boğulma hızı ($kg/m^2 \cdot s$)

g	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
g_c	Kuvvet/kütle dönüştürme faktörü
H	Dağılıma katsayısı, $m(c_G/c_L)$
$H_G; H_L$	Gaz ve sıvı fazları bireysel iletim birimi yükseklikleri (m)
H_{OG}	Gaz fazı toplam iletim birimi yüksekliği (m)
$HETP$	Teorik bir tepsiye eşdeğer yükseklik (m)
$h; h_L$	Sıvı tutunması (m^3/m^3)
$K_{as}; K_{rs}$	Dikey ve yatay sıvı yayılma faktörleri
k_G	Gaz fazı bireysel kütle iletim katsayısı ($kmol/m^2 \cdot s \cdot Pa$)
k_L	Sıvı faz bireysel kütle iletim katsayısı (m/s)
k_M	Membran kesit alanı boyunca bireysel kütle iletim katsayısı (m/s)
K_G	Gaz fazı toplam kütle iletim katsayısı (m/s)
K_L	Sıvı faz toplam kütle iletim katsayısı (m/s)
k_T^+	Turbüent akış bölgesi için kütle iletim katsayısı
L	Kütleli sıvı akış debisi ($kg/m^2 \cdot s$)
M	Bileşenin molekül ağırlığı ($kg/kmol$)
m	Buhar-sıvı denge eğrisi eğimi
N_p	Teorik tepsi sayısı
n	Deneme sayısı
$n_{ho}; n_{kam}$	Tepsidaki delik veya kampana sayısı
P	Çalışma basıncı (Pa) veya potansiyel niceliği
P_g	Basınç derecelenmesi (Pa/m)
ΔP	Islak (yaş) kolon basınç düşüşü (Pa)
ΔP_0	Kuru kolon basınç düşüşü (Pa)
$(\Delta P/\Delta Z)_f$	Boğulma noktasındaki basınç düşmesi (Pa/m)
$(\Delta P/Z)_{i,d}$	Sıvı drenajı yapılan ıslak dolgu yatağındaki basınç derecelenmesi (Pa/m)
$(\Delta P/Z)_{i,f}$	Buhar-sıvı iki fazlı akış rejimine ilişkin kolon basınç derecelenmesi (Pa/m)
q	Düzeltilme katsayısı
R	Gaz sabiti
Re_G	Gaz fazı modifiye Reynolds sayısı, $6G/(a_p \mu_G)$
Re_L	Sıvı faz Reynolds sayısı, $L/(a_p \mu_L)$
r	Reflüks oranı
S	Dolgudaki eğik kanalın (oluğun) genişliği (m), veya standart sapma
Sc	Schmidt sayısı, $\mu/(\rho D)$
Sh	Sherwood sayısı, kd_e/D
$Sh_{G,ort}$	Gaz fazı ortalama Sherwood sayısı
T	Sıcaklık (K)
T_s	Tepsiler arasındaki mesafe (mm)
t	Student t sayısı
t_{ho}	Delikler arasındaki mesafe (mm)
$U_{gf}; u_f$	Boğulma hızı (m/s)
U_{Ge}	Gaz fazı etkin akış hızı (m/s)
U_{Le}	Sıvı faz etkin akış hızı (m/s)
$u_G; u_{Gs}$	Yüzeysel gaz akış hızı, G/ρ_G , (m/s)
$u_L; u_{Ls}$	Yüzeysel sıvı akış hızı, L/ρ_L , (m/s)
$u_{L,d}$	Akma setindeki sıvının akış hızı (m/s)
$u_{V,ho}; u_{V,k}$	Deliklerdeki veya kolon içindeki buhar hızı (m/s)
V_L	Su debisi (l/h)
V_m	Tepsili kolona ilişkin buharın minimum kütleli akış hızı (kg/s)
W	Sıvı faz kütleli akış hızı (kg/s)
We_L	Sıvı faz Weber sayısı, $L^2/(a_p \sigma \rho_L)$

X_i	Log oranı objektif fonksiyonu
X_{ort}	Objektif fonksiyonunun aritmetik ortalaması
$x; x^*$	Sıvı faz bileşenin işletme ve denge koşullarındaki mol kesirleri
x_d	Daralma faktörü
$y; y^*$	Buhar fazı bileşenin işletme ve denge koşullarındaki mol kesirleri
Z	Toplam dolgu yatağı yüksekliği (m)
ΔZ	Birim dolgu yatağı yüksekliği (m)

Yunan Harfleri (Greek Letters)

$\alpha; \alpha'$	Bağıl uçuculuk veya normalleştirme genliği katsayısı
α_d	Kuru yüzey alanı için düzeltme katsayısı
ε	Boşluk hacim (m^3/m^3)
χ	Bağıl uzunluk, $C_{pk} Z^2$ (m)
ϕ	Boşluk hacmine ilişkin düzeltme katsayısı
$\phi_L; \phi_G$	Türbülanslı şartlar için sıvı ve gaz fazlarına ilişkin düzeltme katsayıları
γ	Sıvı-katı ortak temas yüzeyinin açısı (deg)
η	Düzeltilme katsayısı veya viskozite
θ	Dolguda eğimli açılan kanalın yatay eksenine göre açısı (deg)
λ	Denge-işletme hatları eğimler oranı, mG_m/L_m
μ	Dinamik viskozite (Pa·s)
ν	Kinematik viskozite (m^2/s)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
$\rho_{G,m}$	Gaz fazı molar yoğunluğu ($kmol/m^3$)
σ	Sıvı faz yüzey gerilimi (N/m)
σ_c	Dolgu maddesinin kritik yüzey gerilimi (N/m)
$\sigma_i; \sigma_h$	Kolay ve zor uçucu bileşenlerin yüzey gerilimleri (N/m)
ω	Sıvı film akışı direncine ilişkin düzeltme katsayısı
ξ	Dispersiyon katsayısı
Ψ	Yoğunluk terimi (ρ_w/ρ_L)
Ψ'	Islanabilirlik katsayısı
$\Psi_{ho}; \Psi_i$	Deliklerin veya tepsinin toplam açıklık oranı
Ω	Düzeltilme katsayısı

Alt İndisler (Subscripts)

F, f	boğulma
G, g	gaz
L	sıvı
m	molar
OG	toplam gaz
OL	toplam sıvı
S	yüzeysel
V	buhar
W	su

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. King C.J., Separation Processes, 2nd edition, McGraw-Hill, New York, USA, 1980.

2. Kister H.Z., *Distillation Design*, McGraw-Hill, New York, USA, 1992.
3. Treybal R., *Mass Transfer Operations*, McGraw-Hill, New York, USA, 1980.
4. Seader J.D., Henley E.J., *Separation Process Principles*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1998.
5. Clay H.A., Clark J.W., Munro B.L., Which packing for which job?, *Chem. Eng. Prog.*, 62 (1), 51-58, 1966.
6. Bolles W.L., Fair J.R., Improved mass-transfer model enhances packed-column design, *Chem. Eng.*, 89 (14), 109-116, 1982.
7. Billet R., *Packed Towers in Processing and Environmental Technology*, VCH, Germany, 1995.
8. Mell R.T., Spekuljak Z., Optimum design of packed distillation towers, *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, 22 (2), 230-236, 1983.
9. Wagner I., Stichlmair J., Fair J.R., Mass-transfer in beds of modern, high-efficiency random packings, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36 (1), 227-237, 1997.
10. Eckert J.S., Foote E.H., Walter L.F., What affects packings performance?, *Chem. Eng. Prog.*, 62 (1), 59-67, 1966.
11. Chopey N.P., *Handbook of Chemical Engineering Calculations*, 3rd edition, McGraw-Hill, New York, USA, 2004.
12. Xu Z.P., Afacan A., Chuang K.T., Efficiency of dualflow trays in distillation, *Can. J. Chem. Eng.*, 72 (4), 607-613, 1994.
13. Garcia J.A., Fair J.R., A fundamental model for the prediction of distillation sieve tray efficiency. 1. Database development and 2. Model development and validation, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39 (6), 1809-1825, 2000.
14. Prado M., Fair J.R., Fundamental model for the prediction of sieve tray efficiency, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 29 (6), 1031-1042, 1990.
15. Domingues T.L., Secchi A.R., Mendes T.F., Overall efficiency evaluation of commercial distillation columns with valve and dualflow trays, *AIChE J.*, 56 (9), 2323-2330, 2010.
16. Noriler D., Barros A.A.C., Maciel M.R.W., Meier, H.F., Simultaneous momentum, mass, and energy transfer analysis of a distillation sieve tray using CFD techniques: prediction of efficiencies, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49 (14), 6599-6611, 2010.
17. Taylor R., Distillation modeling after all these years: a review of the state of art, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 46 (13), 4349-4357, 2007.
18. Chen L., Repke J.U., Wozny G., Wang S., Exploring the essence of three-phase packed distillation: substantial mass transfer computation, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49 (2), 822-837, 2010.
19. Gualito J.J., Cerino F.J., Cardenas J.C., Rocha J.A., Design method for distillation columns filled with metallic, ceramic, or plastic structured packings, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36 (5), 1747-1757, 1997.
20. Nguyen N., Demirel Y., Retrofit of distillation columns in biodiesel production plants, *Energy*, 35 (4), 1625-1632, 2010.
21. Bravo J.L., Rocha J.A., Fair J.R., A comprehensive model in the performance of columns containing structured packings: distillation and absorption, *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser.*, London, 128, A507, 1992.
22. Fair J.R., Bravo J.L., Prediction of mass transfer efficiencies and pressure drop for structured tower packings in vapor/liquid service, *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser.*, London, 104, A183, 1987.
23. Rukovena F., Koshy D.T., Packed distillation tower hydraulic design method and mechanical considerations, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 32 (10), 2400-2407, 1993.
24. Bravo J.L., Fair J.R., Generalized correlation for mass transfer in packed distillation columns, *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, 21 (1), 162-170, 1982.
25. Bravo J.L., Rocha J.A., Fair J.R., Mass transfer in gauze packings, *Hydrocarbon Proc.*, 64 (1), 91-98, 1985.
26. Eckert J.S., Trays and packings: selecting the proper distillation column packing, *Chem. Eng. Prog.*, 66 (3), 39-44, 1970.
27. Zuiderweg F.J., Harmens A., Influence of surface phenomena on the performance of distillation columns, *Chem. Eng. Sci.*, 9 (2-3), 89-103, 1958.
28. Norman W.S., *Absorption, Distillation and Cooling Towers*, Longmans, London, England, 1961.
29. Berg J.C., *Interfacial Phenomena in Fluid Phase Separation Processes. Recent Developments in Separation Science*, 2nd edition, CRC Press, Cleveland, USA, 1972.
30. Stichlmair J., Bravo, J.L., Fair, J.R., General model for prediction of pressure drop and capacity of countercurrent gas/liquid packed columns, *Gas Sep. Purif.*, 3 (1), 19-28, 1989.
31. Vidwans A.D., Sharma M.M., Gas-side mass transfer coefficient in packed columns, *Chem. Eng. Sci.*, 22 (4), 673-684, 1967.
32. Gunn D.J., Liquid distribution in packed columns, *Chem. Eng. Sci.*, 47 (8), 2095-2097, 1992.
33. Gunn D.J., Al-Saffar, H.B.S.A., Liquid distribution in packed columns, *Chem. Eng. Sci.*, 48 (22), 3845-3854, 1993.
34. Kouri R.J., Sohlo J., Liquid and gas flow patterns in random packings, *Chem. Eng. J.*, 61 (2), 95-105, 1996.
35. Pizzo S.M., Moraes D., Fernandes F.A.N., Kobayasi M.S., Pazini, R.J., Analysis of liquid distribution in a packed column on a pilot scale, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 37 (7), 2844-2849, 1998.
36. Silvey F.C., Keller G.J., Testing on a commercial scale, *Chem. Eng. Prog.*, 62 (1), 68-74, 1966.
37. Shariat A., Kunesh J.G., Packing efficiency testing on a commercial scale with good (and not so good) reflux distribution, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 34 (4), 1273-1279, 1995.

38. Fitz C.W., Kunesh J.G., Shariat A., Performance of structured packing in a commercial-scale column at pressures of 0.002-27.6 bar, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 38 (2), 512-518, 1999.
39. Onda K., Takeuchi H., Okumoto Y., Gas absorption with chemical reaction in packed columns, *J. Chem. Eng. Jpn.*, 1 (1), 56-62, 1968.
40. Yoshida F., Koyanagi T., Mass transfer and effective interfacial areas in packed columns, *AIChE J.*, 8 (3), 309-316, 1962.
41. Senol A., Mass transfer efficiency of randomly-packed column: modeling considerations, *Chem. Eng. Process.*, 40 (1), 41-48, 2001.
42. Senol A., Optimum mass transfer area in a pilot plant packed distillation column, *J. Chem. Eng. Jpn.*, 39 (12), 1265-1275, 2006.
43. Hanley B., Dunbobbin B., Bennett D., A unified model for countercurrent vapor/ liquid packed columns: 1. Pressure drop, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 33 (5), 1208-1221, 1994.
44. Hanley B., Dunbobbin B., Bennett D., A unified model for countercurrent vapor/ liquid packed columns: 2. Equations for the mass-transfer coefficients, mass-transfer area, the HETP, and the dynamic liquid holdup, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 33 (5), 1222-1230, 1994b.
45. Puranik S.S., Vogelpohl A., Effective interfacial area in packed columns, *Chem. Eng. Sci.*, 29 (2), 501-507, 1974.
46. Brito M.H., von Stockar U., Bangerter M.A., Bomio P., Laso M., Effective mass-transfer area in a pilot plant column equipped with structured packings and with ceramic rings, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 33 (3), 647-656, 1994.
47. Shulman H.L., Ulrich C.F., Proulx A.Z., Zimmermann, J.O., Performance of packed columns: II. Wetted and effective interfacial areas, gas- and liquid-phase mass transfer rates, *AIChE J.*, 1 (2), 253-258, 1955.
48. Zech J.B., Mersmann A.B., Liquid flow and liquid phase mass transfer in irrigated packed columns, *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser.*, London, 56, 25/39, 1979.
49. Shi M., Mersmann G., Effective interfacial areas in packed columns, *Ger. Chem. Eng.*, 8, 87-96, 1985.
50. Schultes M., Influence of Effective Interfacial Area on Mass Transfer in Random Packed Columns, Ph.D. Thesis, Universität Bochum, Germany, 1990.
51. Billet R., Schultes M., Prediction of mass transfer in columns with dumped and arranged packings: Updated summary of the calculation method of Billet and Schultes, *Chem. Eng. Res. Des.*, 77 (6), 498-504, 1999.
52. Hughmark G.A., Packed column efficiency fundamentals, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 25 (3), 405-409, 1986.
53. Otake T., Okada K., Liquid hold-up in packed towers: operating hold-up without gas flow, *Kagaku Kogaku*, 17 (5), 176-184, 1953.
54. Buchanan J.E., Holdup in irrigated ring-packed towers below the loading point, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 6 (3), 400-407, 1967.
55. Buchanan J.E., Pressure gradient and holdup in irrigated packed towers, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 8 (3), 502-511, 1969.
56. Bemer G.G., Kalis G.A.J., A new method to predict hold-up and pressure drop in packed columns, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 56, 200-204, 1978.
57. Leva M., *Tower Packing and Packed Tower Design*, 2nd edition., U.S. Stoneware Co., Akron, Ohio, USA, 1953.
58. Norton Company, *Design Information for Packed Towers*, Bulletin DC-11, Akron, Ohio, USA, 1976.
59. Sherwood T.K., Shipley G.H., Holloway F.A.L., Flooding velocities in packed columns, *Ind. Eng. Chem.*, 30 (7), 765-769, 1938.
60. Lobo W.E., Friend L., Hashmall, F., Zenz, F.A., Limiting capacity of dumped tower packings, *Trans. Am. Inst. Chem Engrs.*, 41 (6), 693-710, 1945.
61. Zenz Z.A., What every engineer should know about packed tower operations, *Chem. Eng.*, 60 (8), 176-184, 1953.
62. Chen N.H., Equation for flooding rate in packed towers, *Ind. Eng. Chem.*, 53 (1), 6, 1961.
63. Nguyen H.X., Computer program expedites packed tower design, *Chem. Eng.*, 85 (26), 181-184, 1978.
64. Kessler D., Wankat P., Correlations for column parameters, *Chem. Eng.*, 95 (13), 72-74, 1988.
65. Şenol A., Dolgulu Bir Kolonda Buhar Hızına Bağlı Olarak Performans Analizi, Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1991.
66. Şenol A., Dolgulu bir kolonun performans analizi: orifizmetre kalibrasyonu, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9 (1), 115-123, 2003.
67. Rocha J.A., Bravo J.L., Fair, J.R., Distillation columns containing structured packings. A comprehensive model for their performance: 1. Hydraulic models, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 32 (4), 641-651, 1993.
68. Rocha J.A., Bravo J.L., Fair J.R., Distillation columns containing structured packings. A comprehensive model for their performance: 2. Mass-transfer model, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 35 (5), 1660-1667, 1996.
69. Fair J.R., Bravo J.L., Distillation columns containing structured packings, *Chem. Eng. Prog.*, 86 (1), 19-29, 1990.
70. Li H.L., Ju Y.L., Li L.J., Xu, D.G., Separation of isotope ¹³C using high-performance structured packing, *Chem. Eng. Process.*, 49 (3), 255-261, 2010.
71. Lipnizki F., Fied R.W., Mass transfer performance for hollow fiber modules with shell-side axial feed flow: using an engineering approach to develop a framework, *J. Membr. Sci.*, 193 (2), 195-208, 2001.
72. Spiegel L., Meier W., Correlations of the performance characteristics of the various Mellapak types: capacity, pressure drop, efficiency, *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser.*, London, 104, A203, 1987.
73. Spiegel L., Meier W., A generalized pressure drop model for structured packings, *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser.*, London, 128, B85, 1992.
74. Cussler E.L., Non-selective membranes for separations, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 78 (2-3), 98-102, 2003.

75. Yang D., Martinez R., Fayyaz-Najafi B., Wright R., Light hydrocarbon distillation using hollow fibers as structured packings, *J. Membr. Sci.*, 362 (1), 86–96, 2010.
76. Robbins L.A., Improve pressure drop prediction with a new correlation, *Chem. Eng. Prog.*, 87 (5), 87-90, 1991.
77. Farkas T., Czuczai B., Rev E., Lelkes Z., New MINLP model and modified outer approximation algorithm for distillation column synthesis, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47 (9), 3088-3103, 2008.
78. Spiegel L., Meier W., Distillation columns with structured packings in the next decade, *Chem. Eng. Res. Des.*, 81 (1), 39–47, 2003.
79. Zhang G. Gussle E.L., Distillation in hollow fibers, *AICHE J.*, 49 (9), 2344-2351, 2003.