

KAYNAKLAR

A.Bahloul, L.Kalla, r. Bennacer, H. Beji, P. Vasseur,2004.Natural convection in a vertical porous slot heated from below and with horizontal concentration gradients. International Journal of Thermal Sciences

Balaji,C.,& Venkateshan,S.p.1994. Correlations for free convection and surface radiation in a square cavity. International Journal of Heat and Fluid Flow, 15(3),249-251

Bejan, A., 1984. Convective Heat Transfer, New York:Wiley

Ben Amara,S., Laguerre,O.,& Flick,D. 2004. Experimental study of convective heat transfer during cooling with low air Velocity in a Stack of Objects. International Journal of Thermal Sciences,43,1213-1221.

Ben Amara,S., Laguerre,o.,& Flick,D. 2005 Experimental study of heat transfer by natural convection in a close cavity: application in a domestic refrigerator.journal of Food Engineering,70, 523-537.

Catton,I. 1978. Natural convection in enclosures. In Proceedings of 6th International Heat Transfer Conference ,6,13-31. Toronto,Canada.

Chen, L.,Wu,C.,& Sun,F. 1996. Heat transfer effect on the specific cooling load of refrigerators. Applied Thermal Engineering,16(12),989-997

Hagen,K.D., 1999,Heat Transfer with Applications , 349-356, New Jersey: Prentice Hall,

James, S.J., & Evans,J. 1992. The temperature performance of domestic refrigerators. International Journal of Refrigeration, 15(5),313-319.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında her türlü desteği esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. Suna Kargıcı hanımefendiye minnet ve şükranlarımı sunarım.

Deney setimin hazırlanmasında bilgilerinden ve tecrübelerinden faydalandığım Prof.Dr.Kemal Altınışik beye yardımlarından dolayı teşekkür ederim

Ayrıca, bu çalışmalarım süresince büyük bir sabırla bana destek olan, eşim S.Orkun Demirpolat'a ve sabırla çalışmalarımın bitmesini bekleyen kızıma sonsuz teşekkür ederim.

SİMGELELER

g : yerçekim ivmesi	(9.81 m/s ²)
K : poroz ortamın geçirgenliği	(m ²)
Ra : Rayleigh sayısı	
Ra_p : poroz ortam için Rayleigh sayısı	
Ra_c : kritik Rayleigh sayısı	
Ra_y : Darcy düzeltilmeli Rayleigh sayısı	
T : sıcaklık	(°C veya K)
T_c : soğuk yüzey sıcaklığı	(°C veya K)
T_h : sıcak yüzey sıcaklığı	(°C veya K)
T_{amb} : Ortam sıcaklığı	(°C veya K)
T^* : boyutsuz sıcaklık parametresi	
ΔT : fark sıcaklık	(°C veya K)
k : geçirgenlik	(m ²)
U_p : ortalama por hızı	(m/s)
U_D : Darcy hızı	(m/s)
A_o : yüzey alanı	(m ²)
V_s : katı cisim	
A_{fs} : akışkan ile katı arasındaki kesişen yüzey alanı	(m ²)
k_k : kozeny katsayısı	
C_f : boyutsuz biçim-çekiş sabiti	
Re : Reynolds sayısı	
Pe : Peck sayısı	
Nu : Nusselt sayısı	
\mathcal{E} : porozite	
ν : kinematik viskozite	m ² /s
μ : dinamik viskozite	kg/ms
α : ısı difüzyon katsayısı	kW/mK
β : $1/T_f$	1/°K

1. GİRİŞ

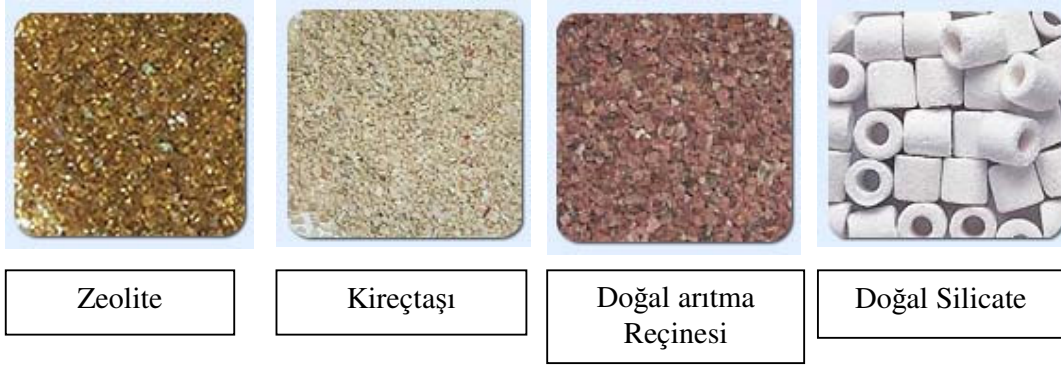
Kimyasal katalitik reaktörlerde, petrol ve jeotermal endüstrilerde, bina ısı izolasyonu, yağ çıkarma teknikleri, kimya endüstrisindeki birçok mamulün üretimi, yüksek güç yoğunluğunda elektrik makinelerinin kanatlı yapıları, lifli ve taneli yalıtkanlar insan yapısı gibi gözenekli ortamlardaki doğal taşınım ile ısı transferi ve zon bölgeleri çok önemlidir. Bu amaçla soğutma olayında poroz ortamda ısı transferini incelemek üzere deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

1.1 Poroz Ortam

Genel anlamda, gözenekli madde, içinde delikler bulunan katıdır. Ancak içi boş kabuklara poroz malzeme denilemez. Bu nedenle gözenekli madde tanımlamasının iyi yapılması gerekmektedir. Poroz ortam içinde düzgün bir dağılım gösteren delikleri ve boşlukları olan bu boşluklara por denir, katı matris içeren bir malzemedir. Katı matris sert ya da küçük çapta deformasyona uğramış olabilir. Boşlukların birbiriyle bağlantılı olması bir ya da daha fazla akışkanın malzemenin içine akışını sağlar. İki fazlı akışta ise bir sıvı bir gaz boşluğu paylaşır.

Doğal poroz ortamlarda porların dağılımı düzensizdir. Kum, kumtaşı, kireçtaşı, tahta, sünger, insan akciğeri, çavdar ekmeği, balık yumurtası doğal poroz ortam örnekleridir.(Şekil 1.1)

Poroz malzemeler çoğunlukla mühendislikte kullanılır. Termik izolasyonda, otomotiv katalitik dönüştürücülerde, kimyasal katalizörlerde, nükleer reaktör yakıt çubuklarında, ısı değiştiricilerde arıtma kurutma proseslerinde kullanılırlar. Örneğin bir reaktördeki katalizörlerin soğutulması ve ısıtılmasının hesaplanması için bu malzemelerin etkin ısı iletkenlik bilgilerine ihtiyaç vardır. Yeraltı ısı kaynaklarının ısı dağılımı hesaplamaları toprağın ısı iletkenliğine bağlıdır. Dökümün katılaşma süresi ve oranı kalıp kumlarının ısı geçirgenliğine bağlıdır. Bu yüzden bu tür malzemelerin etkin ısı iletkenliği üzerine yaygın teorik ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır.



Şekil 1.1 Doğal poroz malzeme örnekleri

Doğal ve oluşturulmuş poroz ortamlardaki aktarım, reaksiyon ve faz değişimini incelemek, öteki düzeysel ortamlarda çalışırken edinilen bilgilere dayanır ve (Sert ve sabit olduğunu varsayılan) geçirgen katı cismin varlığı bu durumu belirgin bir biçimde etkiler. Uygulamadaki sınırlamalar sonucu, genel bir yaklaşımla durumları porun düzlemsel boyutunun ya da katı parçacıkların düzlemsel boyutunun daha büyük olan (parçacık bazlı poroz bir ortam için) küçük bir uzunluk ölçüsünde betimlemeyi yeğlemekteyiz. Konu, kısmi hacim ortalama teorilerinin kullanımını öngörmektir. Yine geçerliğe dayanarak, sınırlı mekanik, ısıl ve kimyasal denge ya da dengesizlik akışkana (sıvı ve/veya gaz) ve/veya katı fazlar arasında yüklenebilir.

Katalitik dönüştürücü, nükleer reaktörlerde, ısı değiştiricilerde, petrol yataklarında ve jeotermal kaynaklarda doğal olarak kullanılan poroz malzemelerin ısıl özelliklerinin tespiti son derece önemlidir. Değişen enerji politikaları, ülkemizin de bu konuda bilimsel ve uygulamaya yönelik pek çok çalışmaya imza attığı alternatif enerji kaynaklarını ve temiz bir enerji kaynağı olan hidrojeni gündeme getirmiştir. Kullanımı ve ithalatı gittikçe artan doğalgaz ise bireysel kullanımda evlerimizde ve endüstriyel kullanımda imalattaki yerini almıştır. Yapılan son çalışmalar bireysel olarak doğalgaz kullanılarak hidrojen ayrıştırma metoduyla elektrik enerjisini elde edilmesi ve açığa çıkan tek atık madde olan saf suyun da kullanıma sunulması yönündedir. Bu son derece temiz bir proses olup reaksiyon sonucunda sadece atık madde olarak saf su çevreye bırakılmaktadır. Hidrojen ayrıştırması sırasında kullanılan membran poroz malzeme olup reaksiyon

için gerekli olan ısı değerlere maruz kalacaktır. Kritik sıcaklıklara maruz kalan malzemelerin ısı özelliklerinin ve ısı transferi rejimlerinin çok iyi belirlenmesi gerekir. Nitekim hala deneysel olarak ispatlanan ve prototip imalatı yapılan bu sistemlerin henüz kullanıma sunulamamasının nedeni yüksek sıcaklıklara maruz kalan malzemelerin termal etkilere dirençlerinden dolayıdır. Maliyet ve imalat kolaylığı nedeniyle farklı malzemeler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar önümüzdeki günlerde yeni enerji kaynaklarını kullanılabilir kılacaktır.

Poroz malzemelerin filtre sistemlerinde ve ısı depolama sistemlerinde yaygın kullanımı da yapılan bilimsel çalışmaların önemini artırmaktadır. Dünyamızın biyolojik dengesi ve çevresel faktörler arıtma teknolojilerini ve dolayısıyla filtrelerin önemini artırmaktadır. Çevre ve enerji kavramlarının birlikte önemle üzerinde durduğu bir diğer konu olan ısı izolasyon malzemeleri pek çok deneysel doğal taşınım ve iletim deneyine konu olmuştur. Gıda, hububat ve tanecikli yapısından dolayı tohum depoları birer poroz ortam olup doğal taşınım ile ısı transferi konusunda üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

1.2 Poroz Ortamın Uygulama Alanları

Geniş bir uygulama alanında ısı transferi analizleri kullanılmaktadır. Poroz ortam doğal olarak oluşturulmuş ya da işlenmiş olabilir. Uygulamalar kimyasal, jeolojik, çevresel, mekanik, sağlık olarak çok geniş bir alanda karşımıza çıkmaktadır.

Kimyasal olarak: Gazlı ya da su esaslı katalitik ve aletli dolu yatak reaktörleri) , filtreleme, kuruma, küçük yatak reaktörleri, dolu yatak kromatografisi, yanan ürünlerin havaya olan zararlarının azaltılması için katalitik dönüştürme işlemleri, yüzeylerde toplanma, çıkma, zarlardan kütle transferi, biyoreaktörlerde, toz ve tablet sentezlerinde, farmakolojik ürün biçimleri, yakıt hücreleri

Çevresel olarak: Yeraltı suyu akışı, yeraltı suyunda kirlenmenin taşınması, toprağa plaster eklenmesi, yapı maddelerinden hava su buharı ve su

akışı, radyoaktif atıklar, sulama, buhar püskürtmesiyle toprak temizliği, karda su süzülmesi, yakma.

Jeolojik: Su ve mineral taşınması, jeotermal enerji işletimi, taşların termal dönüşü.

Mekanik Olarak: Tek fazlı ve iki fazlı soğutma, izolasyon, baca, yakma ve matrislerin ateşle ilgili piroluzisi, asal matrisler, kuruma yeterliliği, jeotermal enerji toplanması, yüzeyde çalışmayla artırılmış ısı transferi, triboloji, yağlama, radyoaktif parçacıklardan akan soğutucuların kullanıldığı nükleer reaktörler, ikili karışımların erimesi/katılaşması, rutubet giderme, yayılan poroz yakıcılar, poroz ön ısıtıcılar ve alev dengeleyiciler, pasif güneş enerjisi sistemleri, otomotiv sektöründe yakıt sistemlerinin katalitik dönüştürücülerinde ve is tuzakları, poroz inşa malzemeleri, güvenlik sistem elemanlarında, küf ve maça kumu oluşumu, ısı dağılımı yoluyla parçacık kaplaması, hepa filtre, sağlık gereçleri, osmotik geçiş mebranları, osmos sistemleri, doğal ısı depoları

Petrol: Depolarda yağ ve gaz çıkışı, artırılmış yağ üretimi, In-stu yanması dahil şisten elde edilen petrolün toplanması, doğalgaz üretimi.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Poroz ortamlarda ilk çalışmalar Darcy tarafından yapılmıştır. Darcy kum yataklarından su akışı üzerine temellenen çalışmasının (su filtreleme uygulaması) yer aldığı kitabı 1856'da yayınlanmıştır. Darcy yalnızca ölçüme dayalı gözlemler yapmış ve bu gözlemler sonucunda alana göre ortalanmış gözenekli malzeme kolonu boyunca akışkan hızının doğrudan basınç gradyanı ile orantılı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu basit bir model olup geçerlilik aralığı içinde iyi bir şekilde uygulanmıştır. O zamana kadar borulardan tek faz akış, Navier'den Stokes'dan, Poisson'dan, ve de Saint Venant'tan daha gelişmiş akışkan mekaniğini kullanan Hagen ve Poiseuille tarafından çözümlenmişti. Böylece poroz ortamda transferden anladıklarımız için yapılan katkılar, doğrudan Darcy, Carman, Leveretteve dolaylı olarak Hagen, Knudsen, Taylor'a bağlıdır.(Laguerre,2004)

Darcy modelinin geçerli olmadığı durumlarda, Darcy Kanunu esas alınarak matematik formülasyon ile ilgili birçok analitik çalışma yapılmıştır. Örn: sıkıştırılmış yatak katalitik reaktörlerde gözenekli ortam sınırlanmıştır, akışkan hızı yüksektir ve porozite değişkendir. Bundan dolayı bu tür ortamlarda sınır, atalet ve değişken porozite etkilerini incelemek önemli olmuştur. Sabit poroziteye sahip ortam için konvektif akış ve ısı geçişi üzerindeki sınır ve atalet etkileri, Vafai, Alkire ve Tien tarafından araştırılmış ve birkaç ana parametreyle ifade edilmiştir.(El- Amin, 2004)

Caltagirone konsantre silindirik yapıda poroz malzeme üzerinde deneysel ve nümerik çalışmalar yapmıştır. Radius oranı $R= 2$ olan numuneler üzerinde Christiansen etkilerini incelemiş deneysel Nusselt sayısına bağlı olarak sıcaklık ölçümlerini poroz ortamda gözlemiştir. Rayleigh sayısının 65 ± 5 olduğu durumlarda sürekli iki boyutlu akış rejimi ile beraber iki simetrik birbirine bağlı hücreyi gözlemiştir. Yüksek Rayleigh sayılarında üç boyutlu akışı inceleyip modellemiştir.

Porozite değişiminden dolayı homojen olmayan geçirgenlik, kısmen sıkıştırılmış küresel yataklarda bulunmaktadır. Benanti ve Brisilow'un yaptığı ölçümler sıkıştırılmış yataklarda katı cidara yakın yüksek poroziteli bir bölge ile farklı bir porozite değişimi göstermektedir. Geçirgen olmayan cidardaki değişken porozite, cidara yakın maksimum bir hızın bulunmasına sebep olur. Bu cidar yönlendirmesi olayı Schwartz ve Smith, Chanrasekhara ve Vortmeyer gibi araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Cidar yakınındaki akışa bağlı ısı geçişi üzerindeki ünifom olmayan porozite etkisi ilk olarak Cheng ve Minkowyez tarafından analiz edilmiştir. Atalet etkisinin hâkim olduğu durumda asıl dispersiyon etkisinin önemli hale gelmesi Plumb tarafından ileri sürülmüştür.(Laguerre,2004)

Poroz ortamda ısı iletkenliğin belirlenmesi mühendisler arasında büyük ilgi görmüştür. Uzay çalışmalarında, uzay araçlarında, iki fazlı ısı kontrol sistemlerinde son yıllardaki araştırmalar birçok ampirik ve teorik modellerin mevcut olduğunu göstermiştir. Gözenekli ortamda her ne kadar katı parçacıklar arasında radyasyon sıvı parçacıklar arasında taşınım önemli rol oynasa da, temel olarak parçanın sıcaklığına ve gözeneklere bağlı olarak iletim metodu ile oluşur. Pitchumani ve Yaou gözenekli ortamlarda ısı iletkenliği heterojen malzemelerde aynı sürekli-rejim karakteristiğini gösteren, eşıt homojen ortamın ısı iletkenliği olarak tanımlamışlardır. Nozed hacimsel ortalama yöntemine bağlı olup ortalama akışı, ortalama sıcaklık gradyanları ve ısı iletkenlik cinsinden açıklamıştır.

İki boyutlu heterojen yapılarda ısı iletkenliğin belirlenmesinde kullanmak üzere Sierpinski halı metodu ve yerel periyodik gözenekli yapı modeli isimleri verilen yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin gerek iki boyutlu gerekse üç boyutlu malzemelerde uygulamaları ile ilgili çalışmalar Ramos tarafından yapılmıştır.(Tian, 2000)

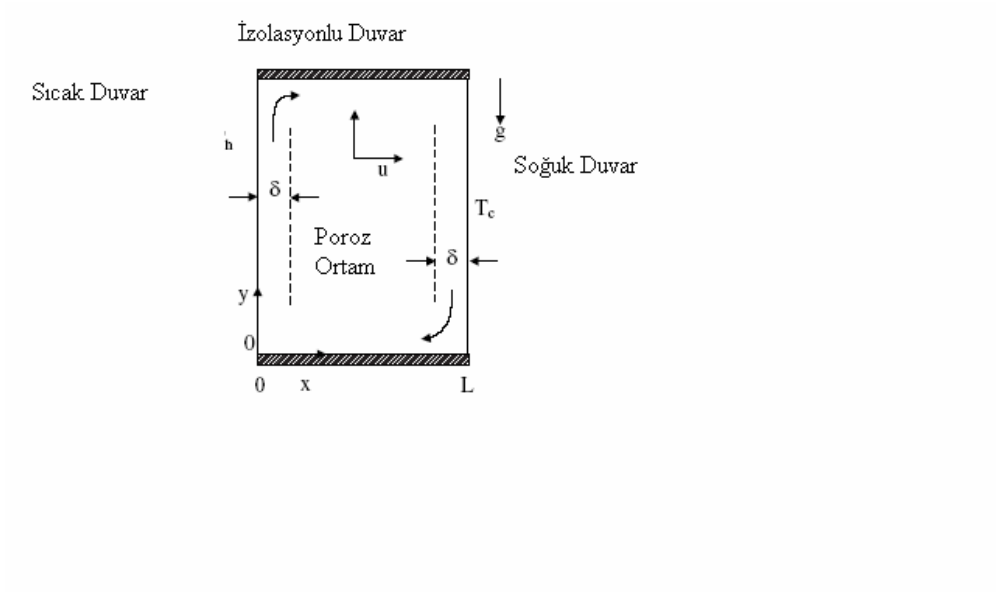
Poroz ortamda taşınım her zaman görülür. Yerel ısı özellikler ve ortamın fiziksel özellikleri bu tip gerçek konfigürasyonlarda ısı geçişinde büyük öneme sahiptir. Poroz ortamlarda taşınım problemlerine açıklık getirmek amacıyla Chvalier ve arkadaşları (1997) tarafından dik ısı gradyana maruz kalmış ve

geçirgen olmayan bir ortamla sınırlandırılmış gözenekli bir cisimde meydana gelen bağımsız taşınımı nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Yaptıkları bu çalışma birçok jeolojik çalışma için referans olarak kabul edilmiştir.

M.Kaviany ve Singh gözenekli malzemelerde ışınlama ısı geçişi problemlerinin nasıl modelleneceği hakkında bazı öneriler sunmuşlardır. Bu önerilerden en önemli ve en çok kullanılan iki yöntem; direkt simülasyon ve sürekli işlem metodudur. Katı halin ısı iletkenliğinin ısı ışıma özelliklerini etkilediğini açıklamışlar ve bu etkiyi göstermek için, bir küre içindeki sıcaklık dağılımının çözümüne Monte Carlo ismini verdikleri bir teknik kullanmışlardır. Yoo (2003) düşey yarıklı poroz malzemede düşük Rayleigh değerli akışlarda uzamsal sürekli limit sıcaklıklarda taşınım problemlerini deneysel ve nümerik olarak çözmüştür.(Chen L, 1999)

J.Sheridon ve A.Williams poroz ortamda doğal taşınım sonucu ısı ve kütle geçişini deneysel metotla incelemişlerdir. Yapılan deney sonucunda iki farklı model geliştirmişlerdir. Nu sayısına, Ra sayısına ve Darcy sayısına bağlı bir model ve ısı ve kütle transferindeki benzerlikten oluşturulan benzeşim modelidir. Yaptıkları deney sonucunda parametrik modelin akış ve akışın bağıntıları hakkında benzeşim modeline nazaran daha iyi fikir verdiğini görmüşlerdir. (Laguerre,2004)

Buharlaştırma ve yoğuşmanın meydana geldiği nemli poroz ortamda ısı ve kütle geçişini A.Bouddor, J.L.Auriault, M.M.Hamdi-Alaoui deneysel metotla incelemişlerdir. Homojen sistemler için deneysel yöntemlerin aksine matematiksel modellemenin daha kesin çözümler getirdiğini gözlemlemişlerdir. Gıda ve hububat depoları için de önemli bir örnek teşkil eden poroz ortam deneyi soğutma prosesi için O.Laguerre, S.Ben Amara ve D.Flick yapmışlardır (2004).



Şekil 2.1 İki boyutlu akış için poroz ortamda farklı sıcaklıktaki yüzeylerde sınır tabaka değişimi modellenmesi (Bejan ,1984)

3. POROZ ORTAMLAR VE ÖZELLİKLERİ

3.1 Yapı ve Sınıflandırma

En genel anlamda, gözenekli madde, içinde delikler bulunan katıdır. Boşlukların katı içindeki dağılımı ve boyutları önemli bir parametredir. Hem gözenekli ortamların incelenmesini kolaylaştırmak için hem de maddenin dış etkenlere etkisinin daha iyi ortaya konması için yapısal bir sınıflandırmaya ihtiyaç duyulmuştur.

1. Gözeneklerin birbiriyle ilişkili olup olmamalarına göre sınıflandırma yapılabilir. Bu sınıflandırmada akışkan rejimi önemlidir. Şayet akışkan akmak için kendine madde içinde bir yol bulabiliyorsa boşluklar birbiriyle ilişkilidir ve etkin gözenek boşluğu ismini alır. Akışkanın akması için boşluklar arasında bir bağlantı yoksa gözenekler birbiriyle ilişkili değildir ve etkin olmayan gözenek boşluğu olarak isimlendirilir. Bu tür ortamlardaki bütün gözenek boşluklarına toplam boşluk denir.

2. Gözenekli madde içindeki boşluklar büyüklüklerine göre de sınıflandırılabilir. Akışkanın boşluk içinde yer almasına dayanan üç temel sınıflandırma yapılmıştır. En küçük boşluklarda madde ile akışkan arasında moleküler kuvvet önemlidir ve boşluklara moleküler (ultramikropor) boşluk denir. Çok büyük boşluklarda akışkan hareketi boşluk iç yüzeyinden kısmen etkilenir; bu en geniş boşluklara mağaralar denir. Bu iki büyüklük arasındaki boşluklar ise genel anlamda gözenek olarak değerlendirilir.

3. Madensel yapı, kalker ve dolomitlerde , gözeneklerin bazen daha ileri bir sınıflandırması yapılır. Küçük boyuttaki çözelti boşluklarına açılımlar, bunların meydana getirdiği boşluğa da açılımlı gözenek boşluğu adı verilir.

4. Ek bir sınıflandırma da gözenekli maddelerin düzenli ve düzensiz olma durumlarına göre yapılır.

3.2 Yapı ve Özellikler

Poroz malzemeler genellikle düzensiz bir boşluk yapısı sergilerler. Bu nedenle gerçek yapı genelde istatistiksel olarak ele alınır. Gözenekli maddelerin makroskopik özelliklerini, mikroskobik yapılarının istatistiksel özelliklerine bağlamak amacıyla pek çok teori ortaya atılmıştır.

3.3 Por Yapısı

İstiflenmiş malzemede ısı aktarım mekanizması iç dokudaki düzensizlikten dolayı karmaşıktır. Poroz malzemede ısının yayılımı üç süreçte gerçekleşir; katı fazda ısı iletimi, gözenekler (porlar) arasında ısı ışıınımı ve gözenekler içinde ısı yayılımı. Küçük boyuttaki boşluklar içinde ısı ışıınımı ihmal edilebilir.(Laguerre,2004)

Gözenekli bir maddenin porozitesi boşlukların hacimlerinin toplam hacme oranıdır. Bu parametre için , “ε”

$$\varepsilon = \frac{V}{VB} = \frac{\text{gözenek hacmi}}{\text{toplam hacim}} \quad (3.1)$$

olup boyutsuz bir büyüklüktür.

Mutlak ve etkin olmak üzere iki tip porozite tanımlanabilir. Mutlak porozite gözenek ilişkileri düşünülmezsizin kaba hacme göre oransal boşluk hacmidir. Etkin porozite ise kaba hacimde birbiriyle ilişkili boşlukların meydana getirdiği orandır. Lavlar ve magnetik kayalar gibi birçok doğal kayaların yüksek mutlak porozitelere karşın yok denecek kadar az etkin poroziteleri vardır.

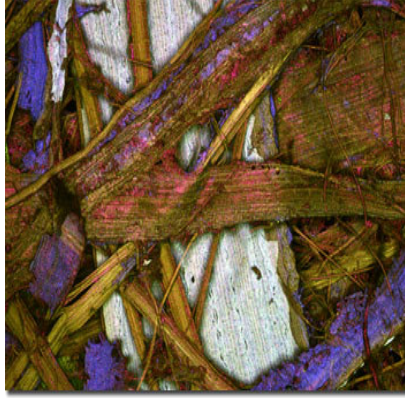
Por yapısının koordinat yapısı ve mikroskobik yapısını tanımlamak için matris yapısını 3 kriter baz alınarak sınıflandırmak mümkündür.

Düz silindirler: İki boyutlu yapılarıdır. Porozite çok küçük ya da çok geniş olabilir ve parçacık boyutları da çeşitli boyutlarda olabilir. Düzlem silindirin eksenine göre paralel ya da dik alınabilir.

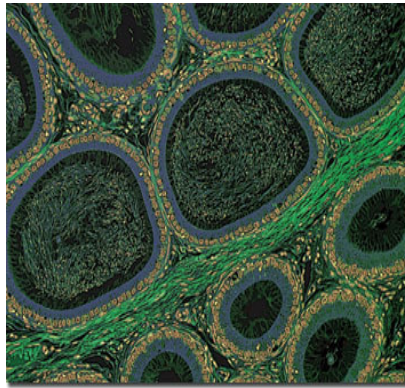
Küreler: Üç boyutlu yapılarıdır. İzentropik por yapısı bazı durumlarda hemen analiz edilebilir.

Kısa ve uzun lifler: Belirli düzenlere sahip yapılar için analiz mümkündür. Ancak liflerin çok çeşitli çap ve uzunlukta olması analizi güçleştirmektedir.

Kayalar, biyolojik organizmalar, silikon, jeller, kömür, tahta, çimento, tekstil, gıda ve tahıl ürünleri, farmakolojik ürünler, deri, kâğıt karmaşık matris yapıları nedeniyle analizleri zor olan yapılarıdır.



(a)



(b)

Şekil 3.1 Kâğıt ve doku por yapısı (a) Kâğıt Mikrofilmi (b) İnsan Dokusu Mikrofilmi

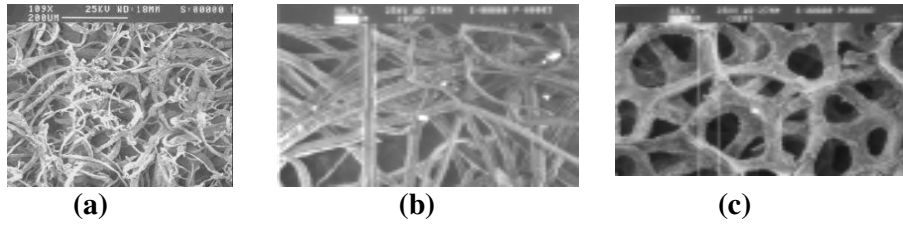
Genelde, boşluklar kendi boyutlarında ve matrislerdeki dağılımlarında düzensizdir. Boşluk boyunun düzensizliği ve matris yığınınındaki dağılım genelde istatistikî olarak ortalaması alınmış sınırlı hacimlerin dağılımıyla sunulur. Bu istatistikî ortalamalar, por hacminden daha büyük, ama bütün katı matrisin hacminden daha küçük hacimlerden alınır. Bu ara hacme; “örnekleyici başlangıç hacmi “denir. Porozite, doyum ve kılcal basıncı gibi, istatistikî olarak anlamlı, sınırlı ortalama özellikleriyle sonuçlanan en küçük ayırıcı hacimdir.

Çevreye yakın düzensizlikler çevredeki transfer yüzeyini etkilediğinden ayrıca ele alınmalıdır. Çevre sınırı katı bir yüzeyse, bu yüzeye bitişik daha büyük poroziteler akışa olan direncin azaltılmasıyla ve böylece bu alandaki sınırlı hızın artırılmasıyla sonuçlanır. Buna kanallama denir ve yüzeyden çeşitli parçacık çaplarına eşit bir uzaklıkta oluşur. Genelde kanallama, örnekleyici başlangıç hacmi için öngörülenleri tümüyle reddetmeyerek ortalama sınırlı porozitenin dağılımını kullanarak tahmin edilebilir. Çoğu zaman çevreye bitişik bölgede akışkan dinamği ve noktaların çözümü metodu kullanılır.

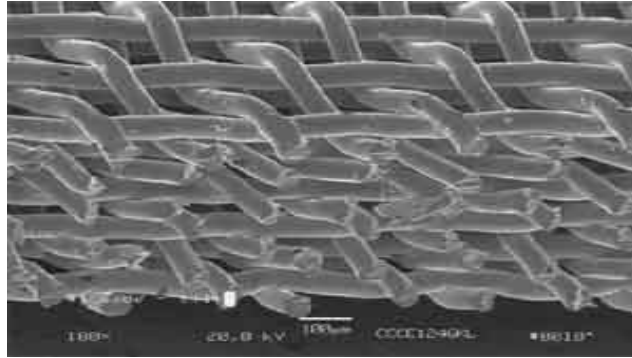
Bu konuyla ilgili olarak Scheidegger ortalama yığın porozite uygulamaları gerçekleştirmiştir. Gerçek porozite ve etkili porozite kullanılarak farklı materyallerin porozite değerleri tablolar halinde düzenlenmiştir. Değişik çaplı küreler birleştirildiğinde çeşitli por yapıları ve boyları kurulabilir. İçi kürelerle dolu bir kaptan düzgün sıralanışı elde etmek olanaksızdır. “ Köprüleşme” denilen olay meydana gelmekte ve çok yüksek poroziteler elde edilebilmektedir, üniform tane büyüklüğü olan bölümler düzğüne yaklaşan bir sıralanış göstermekte, bu bölgeler ise köprüleşmenin olduğu düzgün olmayan sıralanış bölgeleriyle ayrılmaktadır. Köprüleşen kısımlarda porozite, en gevşek düzgün sıralanışa karşı gelen değerden daima daha büyük olmaktadır.

Teorik olarak üniform kürelerin sıralanışının porozitesi kürelerin büyüklüğünden bağımsız olarak kabul edilse de doğal maddelerde durum böyle olmamaktadır. Gerçek ölçüler, tane büyüklüğü küçüldükçe porozitenin arttığını göstermektedir.

Üniform tane büyüklüğüne sahip herhangi bir katılaşmamış doğal maddede taneler ne kadar küçük olursa porozitenin o kadar artacağı genel bir kural olarak söylenebilir. Düzgün olmayan tane büyüklüğü katılaşmamış doğal maddelerde porozite tane büyüklüğünün dağılımına bağlıdır. Tane büyüklüğünün çeşitli oluşu büyük tanelerin meydana getirdiği gözeneklerin küçük tanelerle doldurulmasına ve porozitenin azalmasına sebep olur. Genellikle iyi ayıklanmamış malzeme daha ince taneli fakat iyi ayıklanmış malzemedan daha düşük poroziteye sahiptir.



Şekil 3.2 (a)Paslanmaz çelik,(b) poliüretan ,(c)kompozit malzeme mikrografı



Şekil 3.3 Bakır Mikrografı

Doğal ortamlar için porozite 0.6 yı aşmaz. Benzer çapta katı kürelerden oluşan tabakalar için porozite 0.260 (yüze merkezli istifleme), 0.476 (basit kübik istifleme)sınırları arasında değişir. Tane boyutundaki düzensizlik, birbirine eş tanelerin porozitelerinden daha küçük poroziteler oluşturma eğilimindedir. Çünkü küçük taneler büyük tanelerin oluşturduğu gözenekleri doldurmaktadır. [Scheidegger]

Çizelge 3.1 Bazı Maddelerin Poroziteleri

SAF MADDE	POROZİTE (ϵ)
POLİÜRETAN KÖPÜK	0.98
FİBERGLAS	0.88-0.93
SİLİS	0.65
TEL	0.68-0.76
DERİ	0.56-0.59
SİLİS TOZU	0.37-0.50
KUM	0.37-0.49
BARUT TOZU	0.57-0.66
TANELİ KATALİZÖR	0.45
TANELİ TAŞ	0.45
CONTA	0.36-0.45
SİGARA FİLTRESİ	0.17-0.49
TUĞLA	0.12-0.34
BAKIR TOZU	0.09-0.34
PETROLLÜ KUM	0.08-0.38
KİREÇ TAŞI	0.04-0.10
KÖMÜR	0.02-0.12
BETON	0.02-0.07
TOPRAK	0.43-0.54

3.3.1 Katılma ve Sıkışmanın Poroziteye Etkisi

Sıkışma dışardan uygulanan bir basınçla hacimdeki azalmadır. Katılma ise katı matrisin, çimentolama maddesiyle, elemanlarının birbirine birleşmesini gösterir. Kil, kumaş, selüloz gibi lifli maddeleri içeren bazı doğal gözenekli maddelerde sıkışma porozitede önemli değişmelere sebep olabilir. Silis kumu gibi oldukça sert malzemeler ise yüksek sıkışma basınçlarında bile porozitelerinde çok az değişim gösterirler. Çok yüksek sıkışma oranlarında, bütün maddeler, porozite değişikliği gösterir.

Kayaçların porozitelerinin saptanmasında en önemli faktör çimentolamadır. Katılmış kayaçlara, jeolojik devirde çimentolamaya uğramış başlangıçta katılmamış kayaçlar olarak bakılabilir. Esas olarak orijinal tane temaslarında bulunan bu çimentolama , tane malzemesinden kimyevi bileşimi le ayrılır. Gözenek boşluğu çimentolama malzemesiyle doldurulduca da porozitede büyük azalma görülür.

Bütün doğal maddeler içinde, en büyük porozite değişimini killer gösterir. Kil taneleri plaka şeklindedir. Bu maddeler genelde higroskopiktir, bazı türleri kendi hacimlerinin birkaç misli su alabilir. Killer çok küçük plaka şekline benzer tanelerden meydana geldikleri için, sıkışmaya çok uygun oldukları düşünülebilir. Dolayısıyla yeryüzünden artan derinlikte killerin poroziteleri azalmaktadır. Athy, derinlikle kil porozitesi arasındaki ilişkiyi

$$\mathcal{E}(z) = \mathcal{E}_0 \times e^{-bz} \quad (3.2)$$

Şeklinde ifade etmiştir. Burada;

\mathcal{E}_0 : yüzey killerinin ortalama porozitesini ,

b: porozitenin azalma sabiti

z: de yeryüzünden olan derinliği göstermektedir.

Çimentolama ve sıkışma doğal kayalarda poroziteyi azaltmakla beraber, diğer ikinci derecedeki faktörler poroziteyi arttırlar. Yeraltı suyu akışı sonucu meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ve fiziksel erozyon, gözenekleri genişletici bir etki yaparlar.

3.3.2 Porozitenin Ölçülmesi

Bir maddenin porozitesinin belirlenmesinde temel ölçütler **1**-toplam hacim, **2**-gözenekli kısmın hacmi ve **3**-katı hacmidir.

Direkt Yöntem: Direkt yöntem, kaba hacmi ölçüp, örneği kırıp gözenekleri ortadan kaldırarak elde edilen katı hacmi ölçmektir. Bu teknik tuğla ve seramiklerde çok sık kullanılır. Direkt yöntem sayesinde mutlak gözeneklilik ölçüsü bulunabilir.

Gaz Genleşmesi Yöntemi: Etkin porozitenin ölçülmesinde kullanılan yöntemlerden belki de en yaygın olanı gaz genleşmesine dayanır. Bilinen kaba hacimdeki örnek parça belirli hava veya gaz basıncındaki bir kap içersine konur ve Boyle Mariotte Kanunu kullanılarak izlenen basınç değişiminden, gözenek hacmi hesaplanır. Buna göre;

$$\text{Gözenek Hacmi} = V_B - V_A - V_b \frac{p_2}{p_2 - p_1} \quad (3.3)$$

yazabiliriz. Burada;

V_B : Örneğin toplam hacmi

V_A : Deney kabının hacmi

V_b : Deney kabının ikinci hacmi

p_1 : İlk basınç

p_2 : Son basınç tır.

Bu temel prensip kullanılarak pek çok ölçü aleti geliştirilmiştir.

Civa Enjeksiyon Yöntemi: Etkin porozitenin ölçülmesinde kullanılan civa enjeksiyonu yöntemi, civa içersine batırılan gözenekli örneğin içine, civanın

gerilme ve ıslatma özelliklerinden dolayı atmosfer basıncında cıva girmemesi prensibine dayanır. Böylece bilinen hacimdeki kaptan taşan cıva ile örneğin kaba hacmi belirlenir. Eğer örnek kabı kapatılır ve kaptaki hidrostatik cıva basıncı arttırılacak olursa cıva havayı sıkıştırarak gözeneklerin içine dolar. Dolayısıyla enjekte edilen cıva hacmi gözenek hacmine eşit olur. Bu yöntemin yararı, kaba ve gözenek hacimlerinin doğrudan saptanmasıdır. Ancak bu yöntem, sıkıştırılmış hava ölçülmediği için çok hassas değildir.

Yoğunluk Yöntemleri: Gözenekli maddelerin kütlesi tamamen tanelerde veya matraste olduğundan;

$$M = \rho_s V_s = \rho_B V_B \quad (3.4)$$

Yazılabilir. Burada; M, örneğin kütlesi, ρ_s , tane malzemesinin yoğunluğu, ρ_B , örneğin kaba yoğunluğunu göstermektedir.

$$\varepsilon = 1 - \rho_B / \rho_s \quad (3.5)$$

Porozite ifadesi elde edilir. (Bejan,1994)

Kaba yoğunluk, örneği tartarak ve volümetrik öteleme yöntemiyle kaba hacmi bularak elde edilir. Cıva içine batırmak kullanılabilirse de örneği önce su sızdırmayan ince bir zarla kaplayıp su içine batırma yöntemi daha iyi uygulanabilir. Katı maddenin yoğunluğu, örneği kırarak tartmak ve sonrada öteleme yöntemi ile parça hacimlerini ölçmek suretiyle belirlenebilir. Bu yöntemle toplam porozite elde edilir.

Emme Yöntemi: Etkin gözenek hacmini dolayısıyla etkin poroziteyi direkt olarak veren bu yöntem petrol endüstrisinde kullanılan gelişmiş bir yöntemdir. Temiz taşların çoğu su ıslatmalı oldukları için suyu kolayca emebilirler. Dolayısıyla örnek vakum altında yaklaşık olarak bir hafta su içine batırılırsa gözenek boşlukları tamamen su ile dolar. Böylece su ile doymuş bir örneğin kütlesi;

$$M = \rho_w V_p \quad (3.6)$$

olur.

Burada ;

ρ_w : Suyun yoğunluğu

M: Kuru örnek kütleleridir

V_p : Örnek Hacmi

Tamamen suyla doyurulmuş örneğe uygulanan hacimsel öteleme yöntemi, herhangi bir örneği kaplama işlemi gerektirmeden VB yi verir ve porozite hesaplanabilir. Bu yöntem tam doyması için uzun süre beklemenin dışında diğer yöntemlerden çok daha üstün bir yöntemdir.

İstatiksel Yöntem: Doğal olarak bulunan gözenekli maddelerde gözenek yapısı üç boyutta dağınık olduğundan, herhangi bir kesitin düzlem porozitesi hacimsel porozite ile aynı olmalıdır. Düzlem porozitesi düzlem kesitteki boşlukların alana göre oranı olarak tariflenir. Böyle bir kesitte herhangi bir noktanın gözenek üzerinde bulunma olasılığı porozitedir. Bu yöntemi ilk olarak Chalkeyye kullanmıştır. Burada gözenekli madde kesitinin fotomikrograph ile genişletilmiş bir şekli üzerine birçok defa bir toplu iğne gelişigüzel bırakılır. Limit olarak gösterilebilir ki iğneyi bırakma sayısı arttırılırsa düşme noktasının gözenek içinde olma sayısının toplam bırakış sayısına oranı porozite değerine yaklaşır. Görüleceği gibi birbiriyle ilişkili olan ve olmayan gözenekler bırakış alanı içinde kalmadığından, bu yöntem toplam poroziteyi verir.

3.4 Özgül Yüzey

Gözenekli bir maddenin su özgül yüzeyi, birim kaba hacimdeki gözeneklerin iç yüzey alanı olarak ifade edilir. İnce yapıllı maddelerin, kaba olanlardan çok daha büyük özgül yüzey gösterecekleri doğaldır.

Özgül yüzey, filtre, reaktör ve iyon alışverişi kolonların planlanmasında büyük öneme sahiptir. Özgül yüzey, alanın hacme oranı olduğundan boyutu L-1 dir. Herhangi doğal bir gözenekli maddenin iç yüzeyi son derece karışık

olduğundan su özgül yüzey alanı sadece istatistiksel veya dolaylı yollardan hesaplanabilir.

3.5. Geçirgenlik (Permabilite)

Geçirgenlik, uygulanan bir basınç gradyanı ile akışkanın gözenekli ortamdaki akış kolaylığını karakterize eden, gözenekli maddenin bir özelliğidir. Gözenekli maddenin akışkan geçirgenliğini karakterize eden parametrenin anlamlı bir şekilde tariflenebileceği ilk defa Darcy tarafından gösterilmiştir. Geçirgenliği ölçülebilir büyüklüklerle ifade eden kanun Darcy kanunu olarak bilinir. Darcy kanununa göre, geçirgenlik K matrisinin, yani $-\mu D/(\partial p/\partial x)$ 'in akış iletkenliği ölçüsüdür. L uzunluğunda A kesit alanı olan gözenekli bir örnekte sıkıştırılmaz akışkanın doğrusal yatay akışı meydana getirilirse, ortamın k geçirgenliği, (Bejan,1994)

$$K = \frac{Q\mu}{A(\Delta P/L)} \quad (3.7)$$

olur.

Burada;

Q : Birim zamanda hacimsel akış debisi

μ : Akışkanın dinamik viskozitesi

ΔP : Örnek uzunluğu boyunca basınç farkını göstermektedir.

Yığın (matris) iletkenliği, Darcy kanunu geçerli olduğunda, akışın tüm yığmsal hidrodinamik tipini tanımlar. Yığmsal hidrodinamik tip, öncelikli ilkelerin (kütle ve moment) por düzeyinde (por yüzeyi dâhil) koyu akışkanın akışına uygulanmasından elde edilebilir. Yine de, böyle bir uygulama karmaşık geometriler için ciddi bir sorundur. Bunun nedeni akışkan boru geometrisinin üç boyutlu ve karmaşık olmasıdır. Karmaşık geometriler için, Navier-Stokes eşitliği uygulanır.

Geçirgenliğin öteki yayılmalı taşıma etkili özelliklerle arasındaki ilişki Torquato ve Kim tarafından tartışılmıştır.

K geçirgenlik değeri gözenekli maddenin yapısı yardımıyla saptanır. K değeri denklemden de görüleceği üzere permabilite uzunluğun karesi boyutundadır. K gözenek çapı ortalama karesinin kaba bir ölçüsüdür. Permabilite için en fazla kullanılan birim Darcy (d) dir.

$$1 \text{ Darcy} = \frac{1(\text{cm}^3).1(\text{Pa/cm})}{1(\text{cm}^3).1(\text{Pa/cm})} \text{ elde edilir. Çok sıkı maddeler için milidarcy (md)}$$

$$\text{kullanılır} = 0,001d$$

3.5.1 Geçirgenliğin Yapısal Değerlendirmesi

Darcy kanunu ile tanımlanan gözenekli maddenin geçirgenliği makroskopik bir özelliktir. Dolayısıyla birçok gözenekleri olan oldukça büyük örneklerde anlamlıdır. Geçirgenliğin yaklaşık olarak gözenek yapısı yardımıyla bulunması yöntemi pek çok araştırmaya konu olmuştur. Koseny Teorisi gözenekli ortamı eşit boylu kılcal tüpler olarak ele alır. Bu tüpler aynı dairesel kesitte olmayabilirler. Böyle bir sistemdeki yavaş kararlı akış için klasik hidrodinamik denklemlerin çözümünü düşünerek, Koseny sistem geçirgenliğinin,

$$K = \frac{C\varepsilon^2}{Sv^2} \quad (3.8)$$

olması gerektiğini ispatlamıştır. Burada:

Sv: Özgül yüzey alanı

C: Boyutsuz geometrik şekil faktörü

Koseny sabiti olarak bilinen C, daire için $C = 0,50$, kare için $C = 0,5619$, eşkenar üçgen için $C = 0,5974$ değerini alır. Koseny denkleminde gözenekli ortamdaki akış tüpleri doğru olmadığından akışkanın aktığı uzunluğun örnekteki uzunluktan daha uzun olduğunun göz önüne alınması ortaya atılır. Bu sayede Koseny ifadesi şu şekli alır:

$$K = \frac{C\varepsilon^2}{T Sv^2} \quad (3.9)$$

Burada T, akış yolu uzunluğunun örnekteki uzunluğa oranıdır.

3.5.2 Kılcal Borulu Modeller

Bu modeller Navier-Stokes eşitliğinin küçük çaplı borulardaki akışlara uygulanmasını içerir. Akışın çok gelişmiş (Reynolds sayısı hidrodinamik giriş etkilerinin değersiz olacağı kadar küçük) ve durağan olduğu düşünülür. Geçirgenliğin gözenek büyüklüğü dağılımından hesaplanmasıdır. Burada gözenekli madde yarıçap dağılımı farklı fakat dairesel kesitte ve eşit boydaki kılcal tüpler olarak ele alınır.

Bir borudaki ortalama hıza por hızı denir. Başlangıç hacmi birçok boru içerir ve böylece por hızının anlamlı olması için tüm sınırlı hızların bir istatistiki ortalaması alınmalıdır. Böylece filtre hızı u_D , por hızı u_p ile $u_p = u_D / \varepsilon$ olarak hesaplanır. Buna Dupuit-Forchheimer ilişkisi denir.

Bu modeller dolu kürelerden ya da liflerden yapılmış matrisler ve bazı durumlara kayalar gibi bazı basit yapılar için, geçirgenlik ve matris özellikleri arasındaki ilişkileri elde etmek için önerilmiştir.

Porozite ε ve geçirgenlik katsayısı K arasındaki ilişkiyi tespit etmek için çeşitli modeller kurulmuştur. Bunlardan paralel ve seri bağlı boru modeline göre elde edilen sonuç şöyle ifade edilebilir:

Birim alan başına n tüplerinin kesitteki dağılımıyla çap d 'nin düz tüplerinden akış için porozite $\varepsilon = n\pi d^2$ dir. Tümüyle gelişmiş bir akış düşünüldüğünde basınç aşağıdaki Hagen-Poiseuille eşitliğiyle sonuçlanan tek boyutlu Navier-Stokes eşitliğinin tamamlanmasıyla bulunur.

$$\text{Ortalama por hızı: } u_p = \frac{d^2}{32\mu} \quad (3.10)$$

$$\text{Darcy hızı: } u_D = u_p \cdot \varepsilon = -\frac{n\pi d^2}{128\mu} \quad (3.11)$$

Matrisler uygulamada düz tüp modeline uymadığından, geçirgenlikle porozite arasındaki ilişki deney sonuçlarıyla örtüşmemektedir. Scheidegger por boyutunda dağıtım $f(d)^2$ nin eklenmesinin K ve ε arasındaki ilişkiyi

değiştirmediğini göstermiştir. Böylece paralel bağlı boru modeli, dolu yatakların aralıklarından geçen akışı tarif edemez.

Düz olamayan tüplere doğru genişleme hemen gerçekleştirilir. Öteki genişlemeler bunu kesimli alandaki çeşitlemelere izin vermesi için yapılmıştır ve ilkede düz olmayan borulara uygulanabilir. Ortalama bir tüp çapı d , matrisin ortalama ε porozitesinin tanımıyla ve basınç düşüşüne yaklaşımla uyumlu olanla kullanılmalıdır. Ortalama tüp çapı tanımlanmışsa, önceden verilmiş geçirgenlik tanımı paralel boruları izler.

Dullien, çeşitli kesimlerin kısımlarını içeren kılcallığı içine alan por yapısı için bir model geliştirmiştir. Deneylerle belirlenen, değişen por boyutu çapı değişik kılcallık sıraları için değer biçmek amacıyla kullanılmalıdır. Kılcallıkların kübik bir şebekesi kurulmaktadır. Değişik kübik şebekelerin bağımsız olduğu düşünülür. Modeli kılcal boruların paralel ve seri düzenlenmesinin bileşkesidir. Üç boyutlu modelin geçirgenliğinin aşağıdaki gibi olduğunu elde etmiştir. Koseny sabitinin bir başka ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$K = \frac{\varepsilon}{96} \frac{S_i (\sum_j V_{ij} / d_j^2)^2}{\sum_j V_{ij} ((\sum_j V_{ij} / d_j^6))} \quad (3.12)$$

S_i : Bileşke modeli i ile temsil edilen ortamın por hacmi

V_{ij} : d_j nin kısım ve j ve l_{ij} 'nin çapı olduğu yerde, i yönündeki kılcallık kısmının uzunluğudur.

Darcy kanunundan sapmaların görüldüğü yüksek hızda akımlar için basınç düşmesinin belirlenmesinde atalet gücün eklenmesi, bu sapmayı tahmin etmek için gereklidir. [Dullien, F. A. L.]

Çizelge 3.2. Bazı matrislerin geçirgenlikleri

MATRİS YAPISI	GEÇİRGENLİK	MATRİS YAPISI	GEÇİRGENLİK
Kum Taşı	5.0×10^{-16} - 3.0×10^{-12}	Toprak	2.9×10^{-13} - 1.4×10^{-11}
Tuğla	4.8×10^{-15} - 2.2×10^{-13}	Asfalt	1.0×10^{-13} - 2.3×10^{-11}
Kireç taşı	2.0×10^{-15} - 4.5×10^{-14}	Fiberglas	2.4×10^{-11} - 5.1×10^{-11}
Deri	9.5×10^{-14} - 1.2×10^{-13}	Gevşek Kum	2.0×10^{-11} - 1.8×10^{-10}
Kara Barut Tozu	4.9×10^{-14} - 1.2×10^{-13}	Kıl	8.3×10^{-10} - 1.2×10^{-9}
Hint Tutkalı	2.0×10^{-14} - 4.4×10^{-13}	Mantar Plaka	3.3×10^{-10} - 1.5×10^{-8}
Silis Tozu	1.3×10^{-14} - 5.1×10^{-14}	Tel Kıvrımları	3.8×10^{-9} - 1.0×10^{-8}

3.5.3 Hidrolik Yarıçap Modeli

Carman - Koseny teorisine dayalı bir modeldir. Hidrolik çap tanımı

$$d_h = \frac{4 \times \text{por hacmi}}{\text{yüzey alanı}} = \frac{4\varepsilon}{A(1-\varepsilon)} \quad (3.13)$$

şeklinde yapılmaktadır.

A₀: Katı cismin yüzey alanı

$$(1-\varepsilon): \text{Katı hacim bölümü } A_0 = \frac{Af_s}{V_s} \quad (2.14)$$

Af_s: Akışkanla katı arasındaki kesişen yüzey alanı

V_s: Katı hacmi

Carman – Koseny yaptıkları çalışmalar sonucu K eşitliğini aşağıdaki şekle dönüştürmüşlerdir.

$$K = \frac{\varepsilon d h^2}{16 k_k} = \frac{\varepsilon^3}{k_k (1 - \varepsilon)^3 A_0} \quad (3.15)$$

k_k : Koseny katsayısı

Hidrolik yarıçap değeri

$$d = \frac{A_o}{6} \quad (3.16)$$

eşitliği ile elde edilir.

Çizelge 3-3. Porozite ile Kozeny katsayısı arasındaki ilişki

ε	k_k Silindir	k_k Küre
0.99	46.25	71.63
0.90	9,79	11,34
0.80	6,72	7,22
0.70	5,60	5,79
0.60	5,07	5,11
0.50	4,97	4,74
0.40	4,66	4,54

3.6 Gözenekli Ortamda Geçirgenliği Etkileyen Faktörler

Sıkışma : Sıkışma poroziteyi azalttığı gibi gözenekli maddelerde geçirgenliği de azaltır. Kağıt, izolasyon maddeleri ve tahta gibi lifli maddeler sıkışma ile geçirgenliklerinde büyük değerler kaybederler. Sert taneli pudra ve silis kumu gibi katılaşmamış maddelerde ise geçirgenlikte belirli bir azalmanın meydana gelmesi için oldukça büyük sıkışma basınçlarına ihtiyaç vardır.

Kil şişmesi: Bazı tip killer çok fazla miktarda tatlı su absorbe ettikleri için doğal kum taşlarının geçirgenlikleri tatlı su emmiş olmaları halinde büyük miktarda azalmış olarak ölçülür.

Çözülme: Kalsiyum karbonat suda biraz çözüldüğünde, gözenekli bir kalkerin gözeneklerinden geçen su, gözenek cidarlarına çözücü bir etki yapar ve geçirgenlik artar.

Yapının mekanik değişimi: Katılaşmamış gözenekli maddeler viskoz sıvıların akışı ile taneler üzerine etki eden mekanik kuvvetlerden dolayı yapısal değişim gösterirler. Bu gibi etkiler geçirgenlik özelliklerini etkiler.

4. POROZ ORTAMDA ISI TRANSFERİ

4.1 Taşınım (Konveksiyon)

Isı iletimi ile akışkan hareketinin birleşik etkisi sonucu gerçekleşen ısı transferi taşınım olarak tanımlanmıştır. Eğer akışkan hareketi bir dış etki, örneğin bir fan yada pompa yardımıyla gerçekleşiyorsa proses zorlanmış taşınım olarak isimlendirilir. Herhangi bir kütleesel kuvvet, örneğin yüzeydeki yoğunluk gradyanı sonucunda gerçekleşiyorsa doğal taşınım olarak isimlendirilir. Özel bir durum olarak eğer akışkan her yerde durgun ise bu proses katı cisimlerde olduğu gibi iletimdir.

Taşınım katsayısı akış şartlarının, viskozitenin, akışkanın ısı iletim katsayısı, özgül ısı, yoğunluk gibi ısı özellikleri, sınır şartlarının ve yüzeyin geometrisi ve boyutlarının bir hayli karmaşık fonksiyonudur. Sayısal değeri ise genellikle yüzey boyunca değişkendir.

Deneysel bulgular, yüzeye temas halindeki akışkan parçacıklarının hareketinin yüzey ile aynı olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla katı bir yüzeyden akışkana ısı transferinin fiziksel mekanizması, akışkan ister durgun isterse hareketli olsun iletim ve ışıdır. Birçok durumda ve özellikle normal sıcaklıklarda ışı ile transfer edilen enerji iletimin yanında ihmal edilir.

Taşınım ısı transferinin amacı katı bir yüzey ile bir akışkan arasında gerçekleşen ısı akısını ve akışkan içerisindeki sıcaklık dağılımını belirlemektir. Bu tür bir hesaplamının her türlü yüzey için, her türlü sınır, başlangıç ve giriş şartı için yapılabilmesi esastır.

Makroskobik değişkenler içeren kanunları türetmenin yolu akışkanın uyum sağladığı standart denklemlerle başlayıp çok gözenekli alanlar ya da hacimlerin ortalamasını alarak makroskobik denklemler elde etmektir. Ortalama almanın iki yolu vardır; uzaysal ya da istatistiksel. Uzaysal yaklaşımda, bir makroskobik değişken yeterince geniş bir elemanter hacmi üzerinde uygun bir

araç olarak tanımlanır; bu işlem temsili elemanter hacmin merkez noktasındaki değişkenin değerine yer açar. Buna göre sonucun temsili elemanter hacimden bağımsız olduğu varsayılır.

İstatiksel yaklaşımda, makroskopik olarak eşdeğer olan olası gözenek yapılarının oluşturduğu bir bütün üzerinden ortalama alınır. Bu bütün hakkındaki istatiksel bilgi, alınan tek bir numuneye dayanmalıdır ve bu ancak istatiksel homojenlik olduğu varsayıldığında olanaklıdır (Bear,Bachmat 1990).

4.1.1 Süreklilik Denklemi

Bir poroz ortam için temsili elemanter hacim kavramına dayalı bir sürekli ortam oluşturulmuştur. Bir kartezyen referans sistemini sunarak, elde edilmesi gereken güvenilir hacim ortalamaları için gözenek hacimleriyle karşılaştırıldığında yeterince geniş olan hacim elemanları ele alınmıştır. Kütle korunumu süreklilik denklemiyle ifade edilir;

$$\varepsilon \frac{\partial \rho f}{\partial t} + D (\rho f v) = 0 \quad (4.1)$$

ρ : Akışkan yoğunluğu

Gözenekli ortamdan alınan diferansiyel eleman iki boyutlu akış modelini sağlamaktadır. Z doğrultusundaki değişimler bu sayede ihmal edilmektedir. Akış yerel basınç gradyanı altında malzeme boyuca yer değiştirir ve enerji taşır. Akışkana doymuş gözenekli malzemelerin taşınım özellikleri petrol ve jeotermal endüstrilerde çok önemlidir. Yüksek güç altında elektrik makinelerinin kanatlı yapıları, nükleer reaktör kalpleri, lifli ve taneli yalıtkanlar gibi örneklerde gözenekli ortamda taşınım örnekleri bulunmaktadır. D_x , D_y kontrol hacmi z düzleminde farklıdır. Bu nedenle akış daima üç boyutludur. Türbülanslı akışta olduğu gibi zamana göre ortalanan akış iki boyutlu olabilir. İki boyutlu akışkan kontrol yüzeyi şekilden yararlanılarak türetilebilir (Bejan 1987).

Kütle korunumu ifadesi;

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \rho \nabla V = 0 \quad (4.2)$$

4.1.2 Darcy Akış Modeli

Yalnızca ölçüme dayanan gözlemler ilk kez Darcy tarafından ileri atılmıştır. Alana göre ortalanmış gözenekli malzeme kolonu boyunca akışkan hızının doğrudan basınç gradyanı ile orantılı olduğunu Darcy ortaya çıkarmıştır. Akışkan hızının malzeme boyunca sızan akışkanın viskozitesi ile de ters orantılı olduğunu keşfetmiştir. Dijon çeşmelerinin hidrojisi üstüne yaptığı araştırmalar ve eşit dağılımlı bir ortamdaki sabit durumlu tek yönlü akış üstüne yaptığı deneyler akış oranı ve uygulamalı basınç farkı arasında bir orantı ortaya çıkarmıştır.

$$u = K / \mu \left(-dp/ dx \right) \quad (4.3)$$

K: Ampirik sabit ,tek fazlı akış durumunda geçirgenlik

μ : Akışkanın dinamik viskozitesi

dp/ dx : Akış yönündeki basınç eğimi

üç boyutlu akış için denklem şu hali alır;

$$v = - \mu^{-1} K \cdot \nabla P \quad (4.4)$$

Doğal malzemeler için K'nin değeri geniş ölçüde değişir. Toprak için tipik değerler m^2 olarak ;temiz çakıl $10^{-7} - 10^{-9}$,kil $10^{-16} - 10^{-20}$. Genellikle geçirgenlik birimi olarak $0.987 \cdot 10^{-12}$ m^2 ye eşit olan Darcy kullanılır.

Çapları dar bir aralığa düşen küre şeklindeki parçacıklardan oluşan model için Darcy kanunu esas alınarak Carman- Kozeny:

$$K = D^2 \rho^2 \varepsilon^3 / 180 (1-\phi)^2 \quad (4.5)$$

Denklemini elde etmişlerdir. Ancak parçacık boyutu küresel yapıdan ayrılırsa Carman-Kozeny denklemi doğruluğunu yitirmektedir.

$$D\rho^2 = \int_0^{\infty} D^3\rho h(2 D\rho) d D\rho / \int_0^{\infty} D^2\rho h(D\rho) d D\rho \quad (4.6)$$

$D\rho$: Parçacık çapı

$hD\rho$: Çapların dağılımı için yoğunluk işlevi

Darcy yasalarını kullanarak Ene ve Polişevski (1987) tarafından ortaya konulan bir diğer kuram ortamın periyodik bir yapısı varsa homojenleştirme yöntemi, matematiksel olarak kesin sonuçlar elde etmek için kullanılır.

Darcy denklemi sızıntı hızında doğrusaldır. Hız yeterince küçük olduğunda geçerlidir. Re sayısı birden ona kadar olan aralıkta artarken ani geçişler meydana getirmez. Hız artarken doğrusal olmayan çekiş geçiş yumuşaktır. Burada açık olan küçük gözenek aralıklarında laminlerden türbülans akışa geçiş olmadığıdır. Böyle küçük reynolds sayılarında akış laminlerdir (Joseph, Nield, Papanicolaou 1982).

$$\nabla P = -\mu / K v - c_f K^{-1/2} \rho_f |v| v \quad (4.7)$$

c_f : Boyutsuz birim çekiş sabiti

c_f 'nin önceleri 0.55 değerinde genel bir sabit olduğu bazı deneysel çalışmalarla ortaya konulmuşsa da daha sonra poroz ortamda yapılan çalışmaların yaygınlaşması sonucu bu değer in porozitenin bu sabit üzerinde hayli etkin olduğu ispatlandı ve bazı maden liflerinde bu değer in 0.1 e kadar düşebileceği deneylerde gözlemlendi (Ward1964).

$$c_f = 0.55 \{ 1-5.5 d/D_e \} \quad (4.8)$$

d : Küre çapı

D_e : Yatak eşit çapı

Olarak c_f boyutsuz sayının eşitliği yeniden yukarıdaki şekliyle düzenlenmiştir (Sparrow, Rodenz 1973).

$$D_e = 2bh / (b+h) \quad (4.9)$$

b: Yatak genişliği

h: Yatak yüksekliği

K ile porozite ε arasındaki ilişkiyi bir küreler toplama için elde eden Brinkman ise Darcy denklemini şu şekilde yeniden düzenlemiştir.

$$\nabla P = - \mu / K v + \tilde{\mu} \nabla^2 v \quad (4.10)$$

Brinkman iki viskozite değerini birbirine eşit olarak saptamıştır ancak genellikle bu iki viskozite değeri μ ve $\tilde{\mu}$ birbirine yaklaşık olarak eşittir.

Brinkman denklemleri uygun sınır şartlarında çözüldüğü takdirde kürenin yüzeyinde $v = 0$ ve küreden büyük uzaklıklarda $v = v_0$, küre üstündeki çekişi mD_s olarak saptadı, burada $D_s = 6\pi \mu v_0 a$ bir yarıçap a ve $m = 1 + \lambda a + \lambda 2a^2/3$ küresi üzerindeki Stokes çekişidir ve $\lambda = \mu / K \tilde{\mu}$. Daha sonra v_0 , tek yönlü ortalama süzülme hızıyla bir tuttu ve bir kolonda bulunan küreler üzerindeki toplam gücü, bu kolon üzerindeki Darcy çekişine eşitledi. Böylece $K = K_0 / m$ olduğunu gösterdi, burada K_0 sınırdaki K 'nin $\varepsilon \rightarrow 1$ olarak değeridir ve m çarpım etkeni aşağıdaki gibidir,

$$m^{-1} = 1 + \frac{3}{4} (1 - \varepsilon) \left(1 - \left(\frac{8}{(1 - \varepsilon) - 3}\right)^{1/2}\right) \quad (4.11)$$

m: Çarpım etkeni

m değerinin pozitif olması için $\varepsilon > 0.6$ olmalıdır. Bu gereklilik çok kısıtlayıcıdır çünkü daha önce belirttiğimiz gibi, doğal olarak ortaya çıkan birçok poroz ortamlar 0.6 'dan daha az porozitelere sahiptirler.

Bazı araştırmalarda Brinkman denklemi kullanılmaktadır. Bu gibi bir durum poroz ortam içindeki akışlar berrak akışkanlar içindekilerle karşılaştırılmak istenildiğinde ortaya çıkmaktadır. Brinkman denklemi öyle bir K geçirgenlik değerine

sahiptir ki denklem Navier – Stokes denklemi biçimine $K \rightarrow 0$ olarak dönüşür. Başka bir durum da, bir poroz ortam içindeki çözeltiler komşu bir viskoz akışkan içindekilere eşlenmek istendiğinde ortaya çıkandır.

Hagen- Poiseuille akışında ortalama hız formülü;

$$u = \frac{r_o}{8} \mu \left(\frac{-dp}{dx} \right) \quad (4.12)$$

Gerçekte bilinen geometride kanallardan oluşmuş belli bir küçük ölçekte devre tasarlayıp her bir kanalda Hagen- Poiseuille akışı kabul ederek denklemi türetmek mümkün olur. Burada K devrenin geometrisinin bir fonksiyonu olarak ortaya çıkar.

$$K = \frac{\mu U}{(-dp/dx)} = L^2 \quad (4.13)$$

Uzunluk boyutunda olarak $K^{1/2}$ kullanılarak Re sayısı tanımlanır.

$$Re = \frac{u \cdot K^{1/2}}{\nu} \quad (4.14)$$

$$f = \frac{(-dP/dx) K^{1/2}}{\rho u^2} \quad (4.15)$$

Bu durumda ; $f_{\text{darcy}} = 1/ Re$

f : Sürtünme faktörü

DeneySEL ölçmeler göstermiştir ki denklem $Re < 10$ olduğu sürece geçerlidir. Eğer $K^{1/2}$ ye dayanan Re sayısı merteye olarak 1' i seçerse atalet etkileri $f (Re)$ eğrisini düzleştirir. Daha genel sürtünme faktörü ifadesi Darcy kanununun Forscheimer in düzeltilmesi ile ilgilidir.

$$dP/dx = \mu U/K + b \rho u^2 \quad (4.16)$$

ve b ampirik sabiti ;

$$b = 1.75 (1 - \Phi)(\Phi^3 \cdot d) \quad (4.17)$$

olarak verilmektedir. Yapılan bu modellemeler Darcy akış modeline dayanmaktadır. Atalet etkisindeki gözenekli ortamın çalışılması benzer şekilde yapılabilir. Birim hacim başına gövde kuvveti (ρg_x) varken Darcy kanunu aşağıdaki şekli almaktadır.

$$u = K / \mu (-dP/dx + \rho g_x) \quad (4.18)$$

Dışardan kontrollü basınç gradyanı dP/dx hidrostatik gradyan ρg_x ile aynı mertebede olduğunda gözenekli ortamda akış durur. Daha genel anlamda üç boyutlu hız ifadesi şu şekilde yazılır.

$$v = K / \mu (\nabla P + \rho g) \quad (4.19)$$

bu ifadeye $\rho \mu = \text{sabit}$ kabul edilmektedir.

$$\Phi = P + \rho g_y \quad (4.20)$$

aynı şartlar altında kütle korunumu ;

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (4.21)$$

elde edilir.

Laplace tipi bir denklemde sızıntı akışlarının yöneltildiği görülür. Darcy modelinin uygulanmadığı alanlar aşağıda belirtildiği şekildedir.

- Yerel hız ve gözenek çapı kullanılan Reynolds sayısının $Re > 1$ olduğu akışkanlarda ,
- Isı geçiş problemlerinde ısının sık sık katı cidar yoluyla gözenekli matrisi dolduran akışkana transfer edilmesi durumunda ,
- Porozite değişiminin olduğu durumlarda

4.1.3 Gözenekli Ortamlar İçin Termodinamiğin Birinci Yasası

Gözenekli ortam için enerji denkleminin ana bileşenlerini türetmenin en kolay yolu tek boyutlu ısı ve akışkan akış modelini dikkate almaktır.

Kılcal boru demeti ve çatlaklar gibi modellerde yapı blokları şekilde belirtildiği gibi ele alınabilir. Gözenekli ortamın gözenek oranı :

$$\Phi = A_p \Delta_x / A \cdot \Delta_x \quad (4.22)$$

Homojen ortam olarak dikkate alınan poroz ortam için enerji denklemini türetmek için katı ve akışkan kısım kısım enerji denklemleri yazılarak her iki terimin $A_p \Delta_x$ elemanter hacmi üzerinden ortalaması alınarak hesaplanabilir.

$$\rho_s C_s \frac{\partial T}{\partial t} = k_s \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q''_s \quad (4.23)$$

ρ_s, C_s, k_s katı matrisin özellikleri

q''_s : Katı matriste birim hacimde üretilen ısı

Yukarıdaki denklem katı hacim üzerinden entegre edilirse;

$$\Delta_x \cdot (A - A_p) \rho_s \cdot C_s \partial T / \partial t = \Delta_x \cdot (A - A_p) \cdot k_s \cdot \partial^2 T / \partial x^2 \Delta_x \cdot (A - A_p) \cdot q''_s \quad (4.24)$$

Akışkanın işgal ettiği hacimde herhangi bir noktada enerji korunum kanunu denklemleri;

$$P_f c_{pf} (\partial T / \partial t + u_p \partial T / \partial x) = k_f \partial^2 T / \partial x^2 + \mu \Phi \quad (4.25)$$

$A_p \Delta_x$: Gözenek hacmi

$\mu \Phi$: Mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüşen kısmı

Denklem (3.25) de gözenekli ortam sıcaklıkları yani akışkan sıcaklığı yerel ısı dengede kabul edilir. Bu kabul jeotermal rezervler ve lifli yalıtım malzemeleri

gibi küçük gözenekli ortam için yeterli olmasına karşın nükleer reaktör kalpleri gibi sıcaklığın çok önemli bir güvenlik parametresi olduğu çalışmalarda yeterli olmayabilir. Daha detaylı sıcaklık değişimi veren kabuller gerekmektedir.

Denklem (3.25) gözenek hacmi üzerinden integre edilirse;

$$A_p \Delta x \cdot P_f c_{pf} \frac{\partial T}{\partial t} + A_p \Delta x \cdot P_f c_{pf} u_p \frac{\partial T}{\partial x} = \Delta x A_p \cdot k_f \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \Delta x \cdot \mu \iint_{A_p} \Phi dA_p \quad (4.26)$$

$\Delta x \cdot \mu \iint_{A_p} \Phi dA_p$: Viskoz yayınımla entropi üretimi ile içi enerji kaybı ;

$$\Delta x \cdot \mu \iint_{A_p} \Phi dA_p = A u (-dP/dx + \rho_f g_x) \Delta x \quad (4.27)$$

Gözenekli ortamın ısı iletkenliği iki bileşenin iletkenliklerinin bir kombinasyonu olarak ortaya çıkar ;

$$k = \Phi k_f + (1 - \Phi) k_s \quad (4.28)$$

Poroz ortamın ısı iletkenliği görüldüğü gibi boşluk kısmı ve katı kısım iletkenlerine bağlı bir değer olarak bulunmuştur.

Poroz malzemelerin k değerleri deneysel metotla ölçülebilir değerlerdir. Ortamın ısı iletkenliği katı ve sıvının iletkenliğine dayanır. Bu karmaşık kapasite oranı, σ ile ifade edilir.

$$\sigma = \Phi P_f c_{pf} + (1 - \Phi) \rho_s C_s / P_f c_{pf} \quad (4.29)$$

$$P_f c_{pf} (\sigma \frac{\partial T}{\partial t} + v \text{lap}.T) = k \text{lap}^2 T + q''s + (\mu/k) v^2 \quad (4.30)$$

v: Ortamın hız vektörü (u,v,w için)

$$\sigma \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4.31)$$

$\alpha = k / P_f c_f$ homojen gözenekli ortamın ısı difüzyon hızı;

Yukarıdaki denklemler türetilirken yapılan kabuller:

- 1- Ortam homojen
- 2- Ortam izotropik
- 3- Gözenekli ortamın herhangi bir noktasında katı matris içinde gözenekleri dolduran akışkanla ısı dengededir.
- 4- Re sayısı ortalama hız ve $K^{1/2}$ ye bağlıdır. Reynolds sayısının mertebesi bir'i aşmadığından Darcy eşitlikleri kullanılabilir.

Anizotropik ortam için Darcy kanunu;

$$\begin{aligned} u &= K_x / \mu (-dP/dx + \rho_f g_x) \\ v &= K_y / \mu (-dP/dx + \rho_f g_x) \\ w &= K_z / \mu (-dP/dx + \rho_f g_x) \end{aligned} \quad (4.32)$$

Anizotropik ortam için enerji denklemi;

$$\begin{aligned} \sigma \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} &= \alpha_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \alpha_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \alpha_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \\ \alpha_x &= k_x / P_f c_f, \alpha_y = k_y / P_f c_f, \alpha_z = k_z / P_f c_f \end{aligned} \quad (4.33)$$

4.1.4 Gözenekli Ortamlar İçin Termodinamiğin ikinci Yasası

Akışkana doymuş gözenekli ortam boyunca taşınım işlemi tersinmezdir. Bu tersinmezlik kısmen sonlu sıcaklık farkında ısı geçişi olduğu için kısmen de gözeneklerden viskoz akışkanın akışından kaynaklanır. İkinci yasa tek boyutlu akış modeline uygulanabilir. Homojen gözenekli ortamın birim hacminde entropi üretimi;

$$S''_{gen} = k/T^2(\partial T / \partial x)^2 + \mu u^2/KT \gg 0 \quad (4.34)$$

şeklindedir.

$q'' = 0$ kabul edilmiştir.

Yerel entropi üretim oranı;

$$S''_{gen} = k/T^2 (LApT)^2 + \mu / KT (v)^2 \geq 0 \quad (4.35)$$

4.2 Doğal Taşınım

4.2.1 Dikey Duvarda Sınır Tabaka Denklemleri

Sınır tabaka akışlarına benzer gözenekli ortamlara kısaca bakalım. Isıtılmış dik bir duvarla akışkana doymuş yarı sonsuz gözenekli ortam arasında ısı transferi, en basit gözenekli ortamda doğal konveksiyon için sınır tabaka modeli olarak ilk kez Cheng ve Minkowycz tarafından çalışılmıştır. Yer çekimi ivmesi $-y$ yönünde alınarak Darcy akışı yazılır;

$$u = -K/\mu(\partial P / \partial x); \quad v = -K/\mu(\partial P / \partial y + \rho g) \quad (4.36)$$

Basınç elimine edilerek;

$$\partial u / \partial y - \partial v / \partial x = Kg / \mu(\partial P / \partial x) \quad (4.37)$$

Akım fonksiyonu ψ ;

$$u = \partial \psi / \partial y, \quad v = -\partial \psi / \partial x \quad (4.38)$$

şeklinde tanımlanarak ve kütle kanununu sağlayarak Darcy kanunu şu şekli alır.

$$\partial^2 \psi / \partial x^2 + \partial^2 \psi / \partial y^2 = Kg / \mu (\partial P / \partial x) \quad (4.39)$$

Eğer sınır tabaka ince ise kuvvet ve enerji dengesi aşağıdaki şekle indirgenir.

$$\partial \psi / \partial y (\partial T / \partial x) - \partial \psi / \partial x (\partial T / \partial y) = \alpha (\partial^2 T / \partial x^2) \quad (4.40)$$

Denklem (3.38) yazılırken Boussinesq yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşım

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta (T - T_0)] \quad (4.41)$$

olarak verilir.

4.2.2 Sabit Duvar Sıcaklığı

Dik duvar, T_0 sabit sıcaklığında;

$$T = T_0; \quad \psi = 0, \quad X = 0 \text{ 'da}$$

$$T \rightarrow T_\infty, \quad \partial \psi / \partial x \rightarrow 0, \quad x \rightarrow \infty \quad (4.42)$$

Denklem (3.39) 'den ölçek analizi ile yarı sonsuz ortam ve duvar arasında ısı geçişine ilişkin büyüklüklerin mertebeleri elde edilebilir.

$$\delta_T / y \sim Ra_y^{-1/2}, \quad \psi \sim \alpha Ra_y^{1/2} \quad (4.43)$$

$$Nu_y = h(y/k) \sim (y / \delta_T) \sim Ra_y^{1/2} \quad (3.44)$$

Burada ısı transferi katsayısı Darcy ile düzeltilmiş Rayleigh sayısıdır.

$$Ray = \frac{Kg \beta y \Delta T}{\alpha \nu} \quad (4.45)$$

Gözenekli ortamda doğal sınır tabakalar tek bir δ_T uzunluk ölçeğine sahiptir. Bu özellik gözenekli ortamları iki uzunluk ölçeği ile karakterize edilen akışkanlardan ayıran kısımdır. İzotermal duvar probleminin benzerlik (similarity) formülasyonu denklem (3.42)' den yararlanılarak tanımlanmasıyla başlar. Benzerlik değişkeninin;

$$\eta = x/y Ra_y^{1/2} \quad (4.46)$$

profilleri tanımlanarak h duvar yüksekliği üzerinden ortalanmış olarak

$$Nu_{0-H} = h_{0-H} H/k = 0,888 Ra_h^{1/2} \quad (4.47)$$

bulunur.

4.2.3 Sabit Duvar Isı Akısı

Düşey duvar üniform ısı akısı q'' ile karakterize edilirse yerel sıcaklık farkı $T_0(y) - T_\infty$ olur ve sınır tabaka kalınlığı δ_T

$$q'' \sim k(T_0(y) - T_\infty) / \delta_T = s b t \quad (4.48)$$

ifadesi önceki sonuçlarla birleştirilirse;

$\delta_T/y \sim Ra_{*y}^{-1/3}$ elde edilir ki buradaki Ra_{*y} sayısı Darcy düzeltmeli Ra sayısıdır.

Benzerliğin sayısal çözümü bu sonuçlarla birleştirilirse soğutma için;

$$Nu_y = q'' / [T_0(y) - T_\infty] y/k = 0.772 Ra_{*y}^{1/3} \quad (4.49)$$

$$Nu_{0-H} = q'' / (T_0 - T_\infty) H/k = 1.03 Ra_{*y}^{1/3} \quad (4.50)$$

4.2.4 Duvar Eğiminin Etkisi

Dik doğrultuya göre eğimli duvar olması halini de kapsayacak daha genel durum için, buraya kadar sunulan sonuçlar hafifçe düzeltilir. Böyle bir durumda yerçekiminin ivmesi hem x hem de y yönlerindedir;

$$u = K/\mu(\partial P / \partial x - \rho g_x); v = -K/\mu(\partial P / \partial y - \rho g_y) \quad (4.51)$$

Sınır tabaka rejiminde, $x \sim \delta_T$ ve $y \gg \delta_T$ elde edilir, dolayısıyla sınır tabaka yaklaşımı

$$\partial^2 \psi / \partial x^2 + Kgy\beta / \nu = \partial T / \partial x \quad (4.52)$$

şeklini alır.

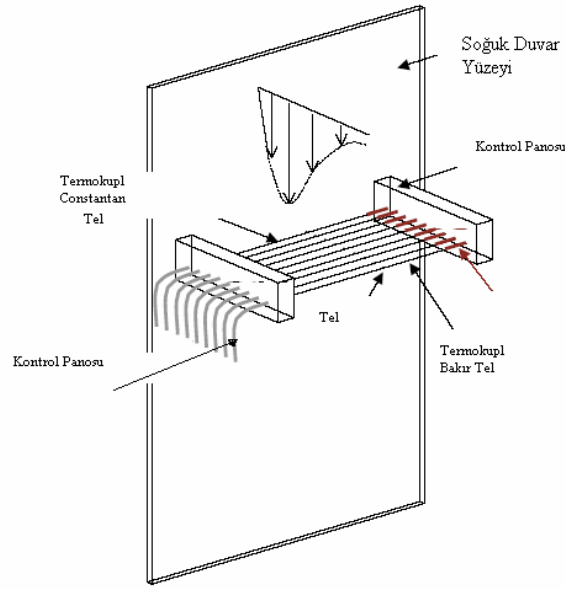
Bu yaklaşım g_x 'in merteye olarak g_y kadar olmadığı sürece geçerlidir. Yukarıdaki denklem daha önce kullanılan denklemlerle aynıdır. Sonuç olarak eğer geçirgen olmayan duvar düşey doğrultuda γ açısı yaparsa, dik duvarlar için geliştirilen sonuçlar, Ra sayısı hesabında g yerine $g \cos \gamma$ yazılmak üzere, uygulanabilir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Doğal taşınım soğuk oda çalışmalarında, gıda depolama ve sevkiyatında, ambar ve silolarda, tohum ve hububat ambalaj ve depolamada kendiliğinden ortaya çıkan bir fenomendir. Soğutucu içinde uzun süre kalan gıda, ilaç ve kimyasalların değişen ısıl rejimlere ve meydana gelen ısı transferi olaylarına karşı nasıl bir rejim izlediklerini incelemek üzere küçük soğutucu içinde poroz ortam oluşturacak şekilde malzeme istiflenerek, poroz ortamda doğal taşınım ile ısı transferini incelemek üzere küçük buzdolabı uygulaması yapılmıştır. Şekil 5.2

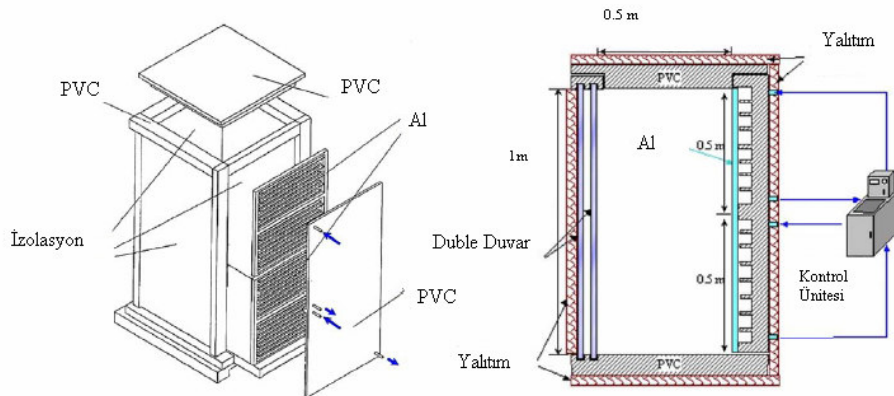
İki tip soğutucu mevcuttur; fanlı ve statik. Genellikle Avrupa ve Amerika’da statik tip soğutucular tercih edilmektedir. Statik tip soğutucuların soğutma prensibi havanın yoğunluk değişiminden dolayı meydana gelen doğal taşınımdır. Bu yoğunluk farkı sıcaklık ve nem gradyanından dolayı meydana gelmektedir. Soğutucu içinde meydana gelen sıcaklık gradyanının gözlenmesi için farklı noktalara termokupl yerleştirilmiş küçük bir buzdolabı kullanılmıştır. 50x50x100 ölçülerindeki küçük buzdolabının içine farklı modülasyonlarda yerleştirilen termokupllar sayesinde anlık olarak ölçümü alınan noktanın mV ve °C cinsinden sıcaklık değerleri alınmak suretiyle kaydedilmiştir. Termokupl malzemesi olarak demir-constantan kullanılmıştır. Bu termoeleman çifti -40°C 300 °C sıcaklık aralığında ölçüm yapabildiği için tercih edilmiştir. Termoeleman çiftinin her iki ucu birleştirilerek bakır teller yardımıyla “data logger”e montajı gerçekleştirilmiştir. Her bir termokupla numara verilerek “data logger” dan değer okunmuştur. “Data logger” da 15 adet çift için yer olduğundan sıcaklık ölçme noktaları bu sayıyla sınırlı kalmıştır.

Her deney için kalibrasyon gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon için bir buz banyosu dizayn edilmiştir. İyi yalıtılmış bir kap içine buz, hassas okuma yapılabilen termometre ve deneyde kullanılan termokupl yerleştirilmiştir. Termometreden okunan değerler ile potansiyometreden okunan değerler anlık olarak kaydedilmiştir. -10°C, 100 °C aralığında kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Şekil 5.1



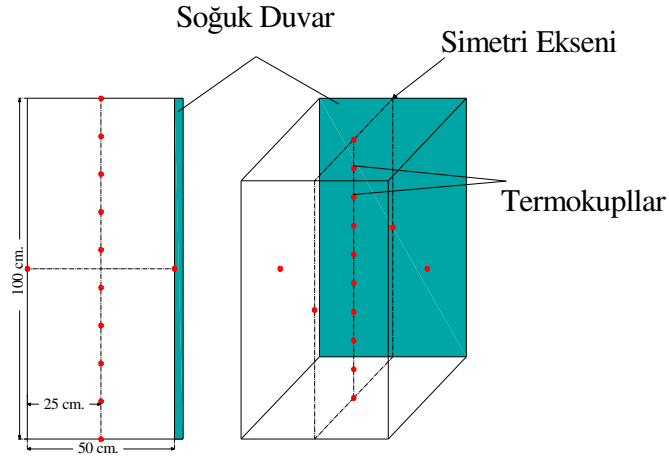
Şekil 5.1. Termal sınır tabakanın deney düzeneğinde ölçülmesi ve kalibrasyon işlemi.

Ortalama bir sıcaklık ölçüm süresi 1,5 saat sürmüştür. Bu sürenin büyük bir çoğunluğu sistemin kalibrasyon sıcaklığına gelmesinin beklenmesi ile geçmiştir. Aynı anda mV ve °C sonuçları okunabilmiştir. Deney sırasında dış ortam sıcaklığı da sürekli ölçülmek suretiyle kontrol altında tutulmuştur. Deney süresince her farklı dizilimde bir adet termokupl dış ortam sıcaklığını ölçmek üzere kullanılmıştır.



Şekil 5.2. Soğutucu Modeli

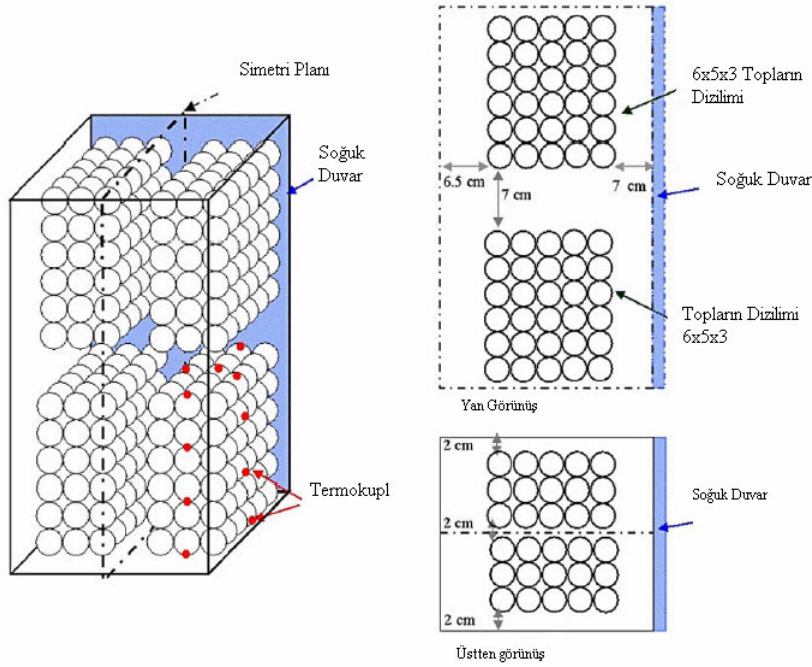
İlk olarak boş soğutucu içine 14 adet termokupl Şekil 5.3.de belirtildiği gibi yerleştirilmiştir. Soğutucunun eksenine yerleştirilen tel etrafına termoeleman çiftleri eşit aralıklarla yerleştirilmiştir. Ayrıca soğutucunun yan cidarları ve ön ve arka yüzeylerine de birer adet olmak üzere termoeleman çiftleri konumlanmıştır. Sürekli olarak dış ortam sıcaklığı da farklı bir termokupl ve termometre ile ölçülmüştür. Okunan sıcaklık değeri potansiyometre üzerindeki hassas ayar düğmeleri sayesinde daha önce belirlenen kalibrasyon değerine getirilerek tüm termokupllardan alınan değerler okunmuştur. Soğuk yüzeyde ise faz değişikliği gerçekleştirmek suretiyle sabit yüzey sıcaklığında deneyimiz yapılmıştır. Soğutucunun içindeki termostat ayar düğmesi sayesinde ortam sıcaklığının sabit bir değerde kalması sağlanmıştır. Soğutucu içinde sıcaklık ortalama 5 °C olarak ayarlanmıştır. Boş olarak alınan ölçümler kaydedilmiştir. Aynı sıcaklıkta ortam değiştirilmeden 3 kere olmak üzere ölçüm alınmıştır sonuçlar grafik halinde düzenlenmiştir.



Şekil 5.3. Termokuplların soğutucu içindeki konumları

432 adet 44,5 mm. çapındaki topların silikon malzeme ile birleştirilmesi ile oluşturulan poroz ortam soğutucu içine termokuplların konumları değiştirilmeden yerleştirilmiştir. Şekil 5.4. Ortam sıcaklığının 5 °C gelmesi için yaklaşık 1 saat kadar beklenmiştir. İç ortam sıcaklığının sabit değer almasının ardından poroz

ortam için sıcaklık değerleri anlık olarak kaydedilmiştir. Deney boyunca alınan ölçümler sonucunda soğutucu dışında sıcaklık ortalama 20 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.4. Topların soğutucu içindeki konumları

324 adet aynı çaptaki toplar birbirine bağlanarak soğutucu içine dört blok halinde montajı gerçekleştirilmiştir. Potansiyometreden alınan sonuçlar kaydedilmiştir.

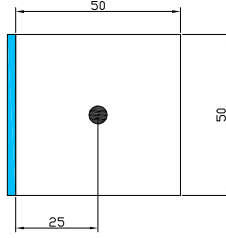
Son olarak soğutucu içinde yatay ekseninde sıcaklık dağılımını ölçmek üzere eşit aralıklarla 10 adet termokupl yatay ekseninde, 4 adet termokupl yan yüzeylerde olmak üzere toplam 14 adet termokupl yerleştirilmiştir. 1 adet termokupl soğutucunun dış yüzeyine yerleştirilmiştir. Boş soğutucu için ölçümlerin alınmasının ardından termokuplların konumları değişmeksizin soğutucu içine 324 adet top yerleştirilerek alınan sonuçlar kaydedilmiştir. Elde edilen değerler

grafikler halinde düzenlenmiştir. Grafiklerdeki sıcaklık değerleri $T^* = \frac{T - T_c}{T_{ortam} - T_c}$

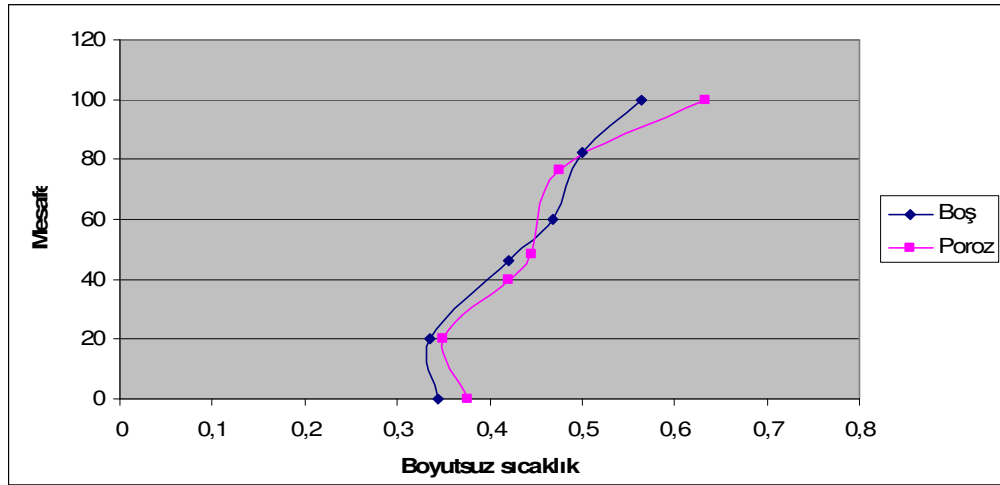
bağıntısı ile boyutsuzlaştırılmıştır.

6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

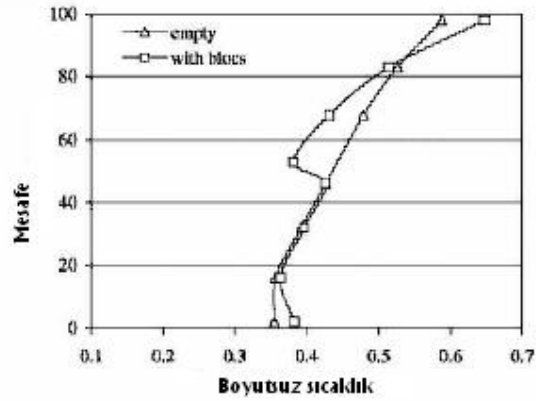
Yapılan deneysel çalışmada anlık olarak alınan sıcaklık değerleri, boyutsuzlaştırılarak grafikler halinde düzenlenmiştir. Deneysel sonuçlar teorik bir gerçek olan soğuk ve sıcak zon bölgelerine uyum göstermektedir. Soğuk zon altta iken sıcak zon üstte oluşmaktadır (Şekil 6.1-6.8).



Üst görünüş

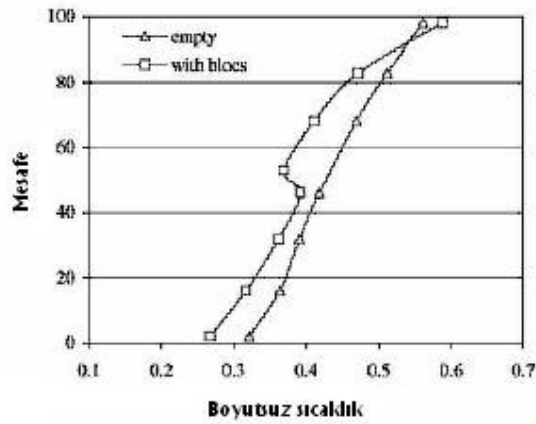
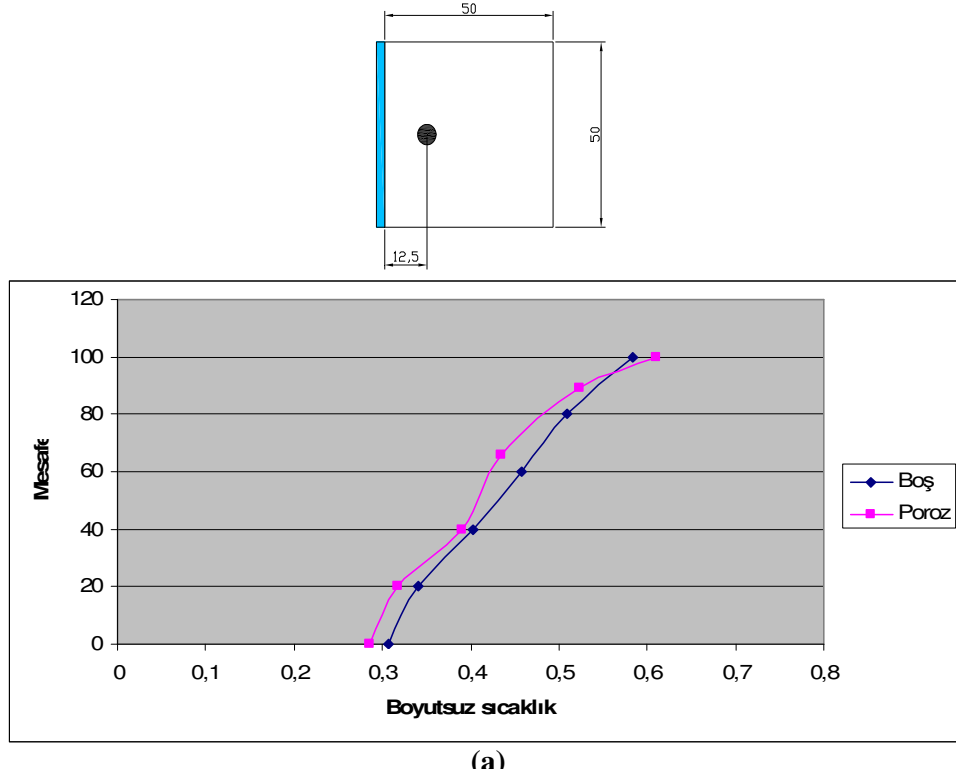


(a)

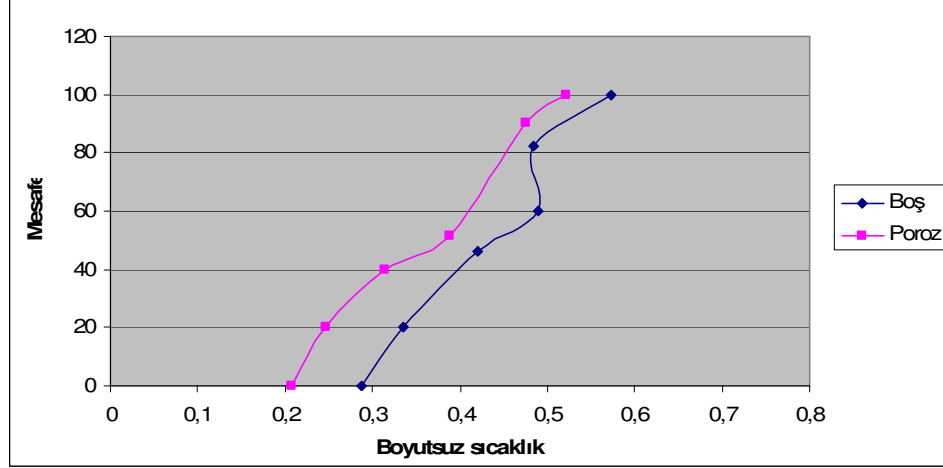
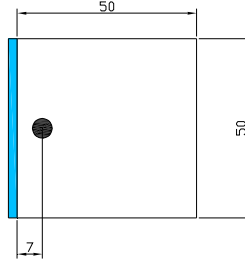


(b)

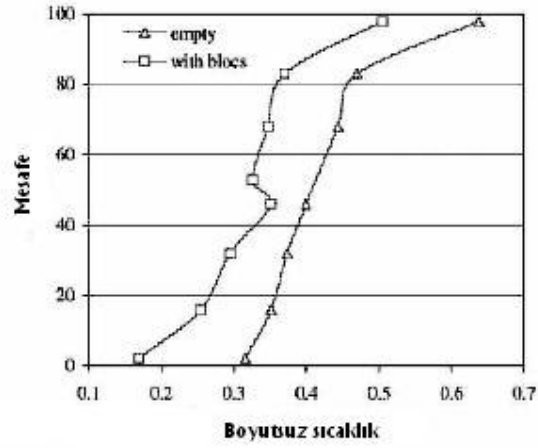
Şekil 6.1. Boş ve porozitesi 0,609 olacak şekilde 432 adet küre ile dolu soğutucu içinde soğuk duvardan 25cm mesafede sıcaklık dağılımı (a) Deneysel Çalışma (b) Laguerre ve Flick (2004) çalışması



Şekil 6.2. Boş ve porozitesi 0,609 olacak şekilde 432 adet küre ile dolu soğutucu içinde soğuk duvardan 12,5cm mesafede sıcaklık dağılımı(a) Deneysel Çalışma (b) Laguerre ve Flick (2004) çalışması

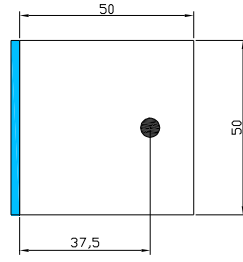


(a)

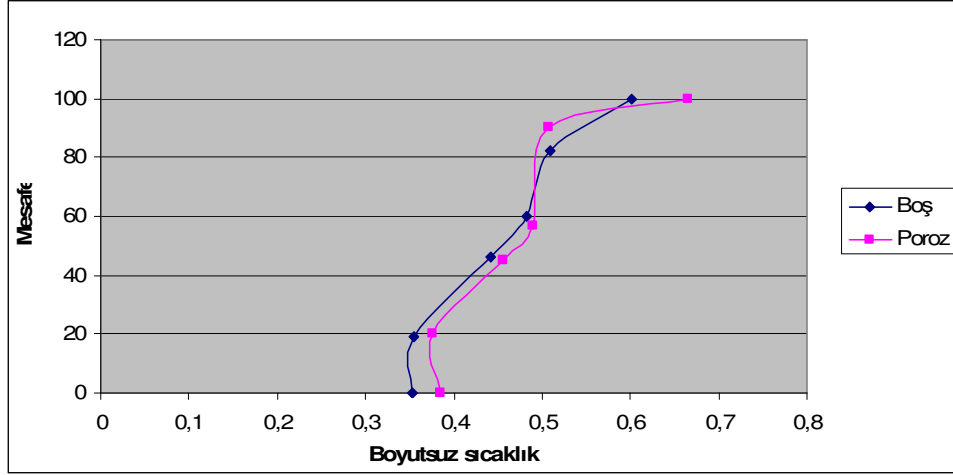


(b)

Şekil 6.3. Boş ve porozitesi 0,609 olacak şekilde 432 adet küre ile dolu soğutucu içinde soğuk duvardan 7cm mesafede sıcaklık dağılımı (a) Deneysel Çalışma (b) Laguerre ve Flick (2004) çalışması

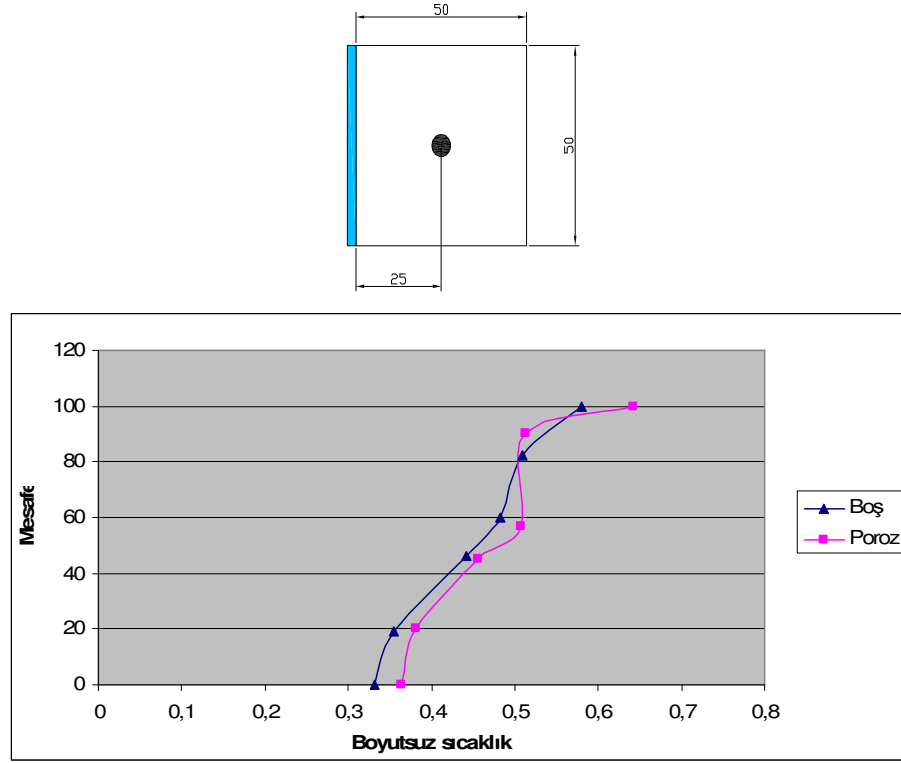


Üst görünüş

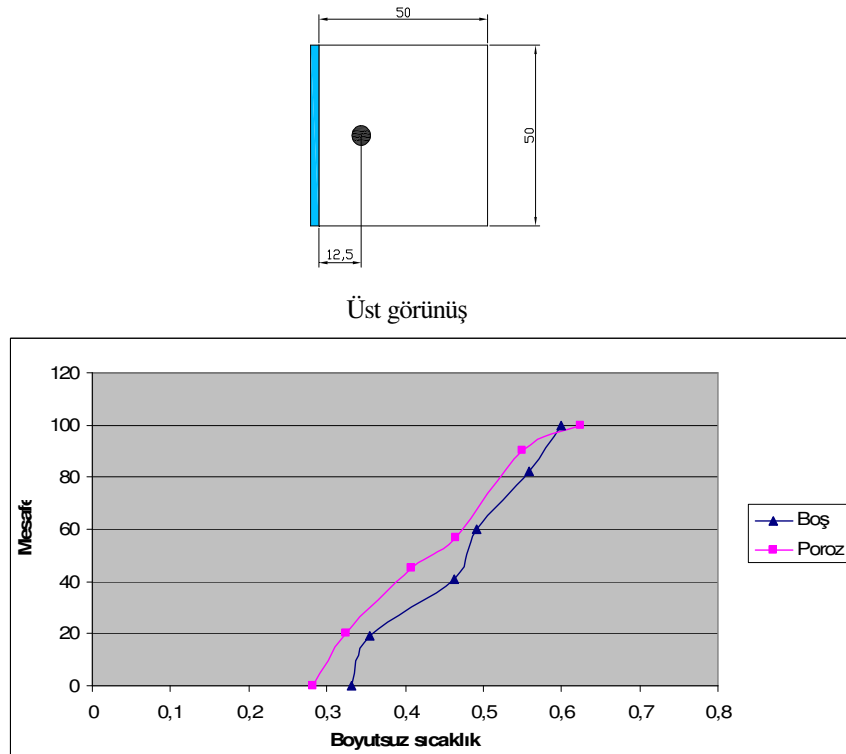


Şekil 6.4. Boş ve porozitesi 0,609 olacak şekilde 432 adet küre ile dolu soğutucu içinde soğuk duvardan 37,5cm mesafede sıcaklık dağılımı

Grafiklerde belirtildiği gibi porozitenin sıcaklık dağılımına etkisi soğuk duvar mesafesine bağlı olarak değişmektedir. Soğuk duvara yakın mesafede sıcaklık dağılımında belirgin bir fark gözlenirken diğer düzlem duvar tarafında aralık kapanmaktadır. Şekil 6.3,6.4 Ayrıca soğuk duvara yakın mesafede limit sıcaklıkların daha düşük olduğu görülmektedir. Boş soğutucuya ait dağılım daha lineer bir artış gösterirken poroz ortam oluşturulan soğutucuda eksene yakın mesafede sıcaklık kırılma göstermektedir. Bu ani değişim kürelerin diziliminden dolayı eksende meydana gelen boşluktan kaynaklanmaktadır.

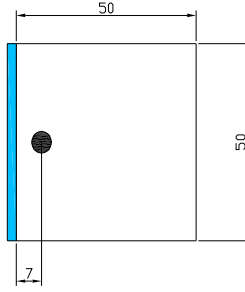


Şekil 6.5. Boş ve porozitesi 0,509 olacak şekilde 324 adet küre ile dolu soğutucu içinde soğuk duvardan 25cm mesafede sıcaklık dağılımı

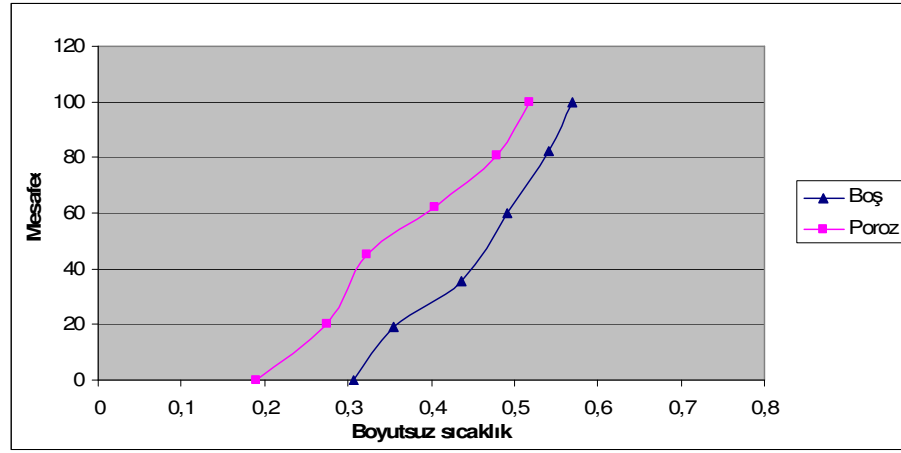


Üst görünüş

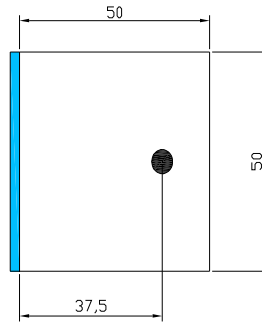
Şekil 6.6. Boş ve porozitesi 0,509 olacak şekilde 324 adet küre ile dolu soğutucu içinde soğuk duvardan 12,5cm mesafede sıcaklık dağılımı



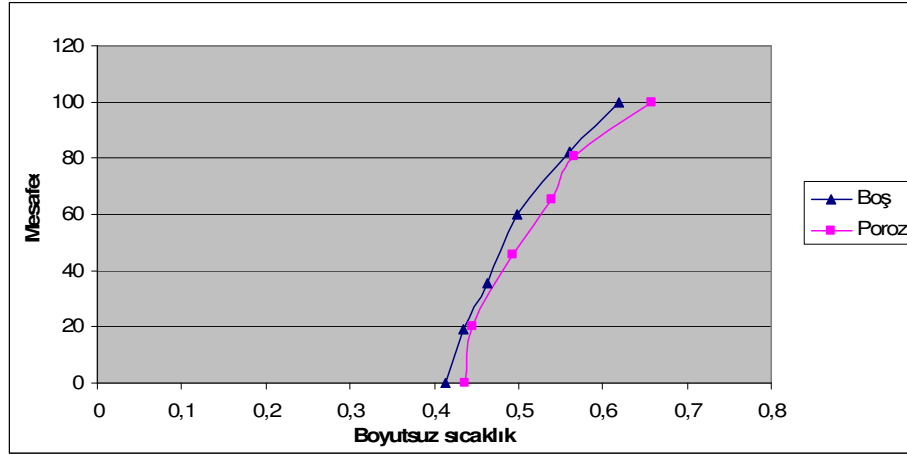
Üst görünüş



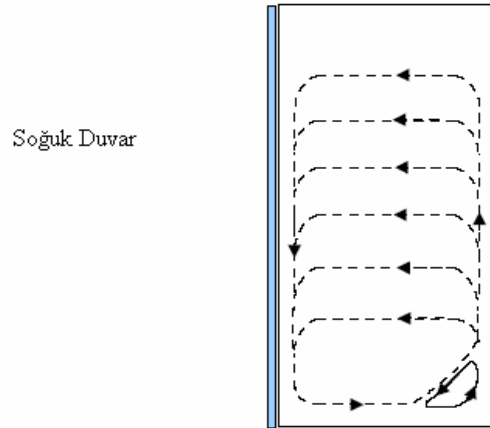
Şekil 6.7. Boş ve porozitesi 0,509 olacak şekilde 324 adet küre ile dolu soğutucu içinde soğuk duvardan 7cm mesafede sıcaklık dağılımı.



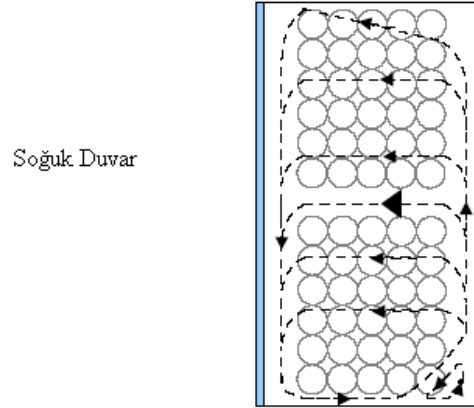
Üst görünüş



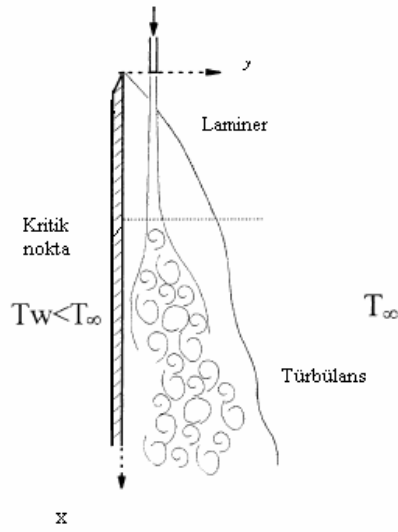
Şekil 6.8. Boş ve porozitesi 0,509 olacak şekilde 324 adet küre ile dolu soğutucu içinde soğuk duvardan 37,5cm mesafede sıcaklık dağılımı.



Şekil 6.9. Teorik olarak havanın boş soğutucu içindeki hareketi (Bejan,1984)



Şekil 6.10. Blok halinde kürelerle şarj edilmiş soğutucu model içindeki teorik hava hareketi. (Bejan,1984)



Şekil 6.11. Soğuk duvar kenarında doğal taşınımında akım şeması (Padet,1997)

Yapılan deneysel çalışmada elde edilen bulgular ışığında porozitenin taşınımına olan ısı transferine etkisi incelenmiştir. Limit sıcaklık değerlerinde fazla

bir fark gözlenmezken sıcaklık dağılımında belirgin bir farklılık gözlenmiştir. Poroz ortam oluşturulduğunda soğutucu içinde sıcaklık akımı farklı şekilde ortaya çıkmıştır. Şekil 6.9., Şekil 6.10. Termal sınır tabaka da poroziteye bağlı olarak değişiklik arz etmektedir. Porozitenin kapalı ortamda doğal taşınım etkisi ısı transferi olayının artması yönünde gözlenmiştir. Artan Re sayısına bağlı olarak ikincil akışlar meydana gelmiştir ki bu etki gerçekleşen ısı transferi olayını pozitif yönde etkilemiştir. Ayrıca porozitenin oranına bağlı olarak da ısı transferi olayının değişimi gözlenmiştir. Aynı sayıda kürelerden oluşan poroz ortamın ısı transferini etkisi değişiklik göstermezken sadece akım alanına etkisi gözlenmiştir (Şekil 6.1-6.6).

Deneysel sonuçlar teorik bir gerçek olan soğuk ve sıcak zon bölgelerine uyum göstermektedir. Soğuk zon altta iken sıcak zon üstte oluşmaktadır. Soğuk duvar yüzeyinde alınan ölçümler sonucunda ortalama 2 cm içerisinde sınır tabaka oluştuğundan donma riski taşıyan besin grubu veya kimyasalların bu bölgede bulundurulmamaları gerçeği ortaya çıkmaktadır. Soğuk düzlem duvar ve diğer duvar arasında ısı akımı yönünden meydana gelen fark soğuk yüzeyde ısı değişimi oranının daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.8, ve Şekil 6.9). Ayrıca benzer şekilde soğuk düzlem duvar deneylerinde elde edilen sıcaklık dağılım grafiklerinde uyumlu sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3).

Deney kabininin merkezine yerleştirilen termoelemanlarda alt ve üst yarıda 0.6°C - 1.3°C sıcaklık farkı ölçülmüştür. En alt ve en üst noktalarda küreler yerleştirildikten sonra alınan sıcaklıklar boş iken alınan sıcaklıklardan 0.4°C - 0.9°C farklı çıkmıştır. Bu da dolu hacimde taşınımın etkisini göstermektedir. Elde edilen grafikler teorik sonuçlarla paralellik arz etmektedir. Aynı sayıda küreden oluşan poroz ortamın farklı geometride yerleştirilmesinin ısı transferine etkisinin oldukça az olduğu, sadece akım alanına etkisi olduğu gözlenmiştir (Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.7).

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elde edilen grafiklerin ve sıcaklık dağılımlarının ışığında aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

1. Limit sıcaklık değerlerinde belirgin bir fark gözlenmezken sıcaklık dağılımında ve akımda boş ve poroz olma durumuna göre yaklaşık olarak %10 sıcaklık farkı gözlenmektedir.
2. Porozitenin kapalı ortamda doğal taşınımına etkisi ısı transferi olayının artması yönünde gözlenmiştir.
3. Teorik zon bölgeleri deneysel olarak da gözlenebilmiştir. Soğuk yüzey yakınında zon bölgelerinde çok belirgin fark ölçülürken diğer yüzeyde aralık kapanmıştır.
4. Aynı sayıda kürelerden oluşan poroz ortam için değişik dizilimlerde farklı sıcaklık dağılımı gözlenmiştir. Ortalama 5 °C ortam sıcaklığı için soğuk yüzey ve diğer yüzeyler arasında boş ve poroz olma durumuna göre. max.0,538 °C fark oluşmuştur..
5. Soğuk düzlem duvar ve diğer duvar arasında ısı akımı yönünden meydana gelen fark soğuk yüzeyde ısı değişimi oranının daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalarda alışlagelmiş bir ısı transferi katsayısı hesaplanması yüzey alanının tam olarak hesaplanamamasından dolayı mümkün olmamaktadır. Bu nedenle numunenin toplam hacmi kullanılarak hacimsel ısı transferi katsayısı hesaplanmalıdır.

Isı transferine birim uzunluk başına düşen gözenek sayısı, gözeneklilik, gözenek büyüklüğü ve şekli etki etmektedir. Bu parametrelerin etkisini açıkça ortaya koyabilmek için bu parametreler sistemli olarak değiştirilerek daha geniş bir aralıkta deneyler yapılmalıdır. Deneysel çalışmaların daha kesin sonuçlar vermesi için gözenek çapı, kanal geometrisi ve birim hacimde mevcut ısı transferine katılan malzeme yüzey alanının kesin olarak ölçülmesi gerekmektedir.

J.P. Caltagirone.1975. Thermocovective instabilities in a horizontal porous layer. *Journal of Fluid Mechanic*72, 269-287.

Kakaç, S., Kilkış, B., Kulacki, F. A., Arinç, F., 1991. *Convective Heat and Mass Transfer in Porous Media*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands

Kaviany, M., 1995. *Principle of Heat Transfer in Prous Media (Second Edition)*, Michigan.

Krischer, O. And Kröll, K., 1957. *Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*, Berlin.

Laguerre,O.,Derens,E.,& Palagos, B. 2002. Study of domestic refrigerator temperature and analysis of factors affecting temperature: a French Survey. *International Journal of Refrigeration*,25,653-659.

Laguerre,O.,& Flick,D. 2004.Heat transfer by natural convection in domestic refrigerators. *Journal of Food Engineering*,62.79-88.

M.F.El- Amin, 2004. Double dispersion effects on natural convection heat and mass transfer in non- Darcy porous medium. *Applied Mathematics and Computation*

Marcelo J.S de Lemos, Luzia A Tofaneli, 2004. Modeling of double- diffusive turbulent natural convection in porous media *International Journal of Heat and Mass Transfer*

Maxwell, C. J., 1904. *A Treatise on Electrical and Magnetismi* Clarendon Pres, Oxford, England, Third Edition

Nasri J. Rabadi and Saed A. Mismar ,2001.Enhancing solar energy collection by using curved flow technology coupled with flow in porous media: an experimental study

Nawaf H. Saeid, I. Pop ,2004 Non-Darcy natural Convection in a square cavity filled with a porous medium. Fluid Dynamics Research

Nield, D.A.,& Bejan, A., 1992. Convection in Porous Media, New York: Springer-Verlag Inc.

Ramesh,N.,& Venkateshan,S.P.2001. Experimental study of natural convection in a square enclosure using differential interferometer. International Journal of Heat and Mass Transfer,44,1107-1117.

Scheidegger, A. E., 1974. The Physics of Flow Through Porous Media, University of Toronto Pres, Toronto

Tian, Y.S.,& Karayiannis,T.G. 2000. Low turbulence natural convection in an air filled square cavity: part 1: the thermal and fluid flow fields. International Journal of Heat and Mass Transfer,43,849-866.

EK1**HESAPLAMALAR**

$$porozite = \frac{GözenekHacmi}{ToplamHacim} \quad (2.1)$$

432 Adet küre ile şarj edilmiş soğutucu için porozite değeri;

$$\varepsilon = \frac{(0,0445^3 \times 432) - (0,014)}{(0,0445^3 \times 432)} = 0,609 \text{ olarak elde edilir.}$$

$$A_o = \frac{A_{fs}}{V_s} = 47,91 / m \text{ [Carman-Koseny]} \quad (2.14)$$

Poroziteye bağlı olarak taşınım problemlerinin çözümünde genellikle hidrolik yarıçap yaklaşımı kullanılmaktadır. Hidrolik yarıçap değeri ;

$$d_h = \frac{4\varepsilon}{A_o(1-\varepsilon)} = \frac{4 \times 0,609}{47,91 \times (1-0,609)} = 0,13 \text{ [Carman-Koseny]} \quad (2.13)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$k_k = 5,11 \text{ (Koseny Katsayısı)} \quad (\text{Tablo2.3})$$

Geçirgenlik olarak tanımlanan K değeri ;

$$K = \frac{\varepsilon d_h^2}{16k_k} = \frac{0,609 \times 0,13^2}{16 \times 5,11} = 1,259 \times 10^{-4} \text{ [Carman-Koseny]} \quad (2.15)$$

ifadesi ile hesaplanır. Geçirgenlik porozitenin ısı transferine etkisinde en temel parametredir.

Ra değerinin bulunabilmesi için gerekli ortalama sıcaklık;

$$T_f = \frac{T_\infty + T_w}{2}$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$T_f = \frac{4,678 + 5}{2} = 4,839^\circ C = 277,989^\circ K$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{277,989} = 3,5 \times 10^{-3} 1/^\circ K$$

$$Ra_y = \frac{Kg\beta y \Delta T}{\alpha \nu} \quad [\text{Darcy}] \quad (3.45)$$

Burada bulunan Ra_y sayısı Darcy düzeltmeli Ra sayısıdır ki, poroziteye bağlı ısı transferi değeri için kullanılan bağıntıdır.

$$Ra_y = \frac{1,259 \times 10^{-4} (9,81) (3,5 \times 10^{-3}) (288)}{19,2 \times 10^{-6} 13,665 \times 10^{-6}} = 1,189 \times 10^7$$

$$Nu_y = 1,03 Ra_y^{1/3} \quad [\text{Nield, Bejan 1992}] \quad (3.50)$$

$$Nu_y = 1,03 (1,189 \times 10^7)^{1/3} = 235,08$$

$$\delta = Ra_y^{-1/3} = 4,381 \times 10^{-3} \text{ m} \quad [\text{Nield, Bejan 1992}] \quad (3.48)$$

$$Pr = 0,7 \quad \text{Ek-1}$$

$$\alpha = 19,2 \times 10^{-6} \quad \text{Ek-1}$$

$$\nu = 13,665 \times 10^{-6} \quad \text{Ek-1}$$

324 Adet küre ile şarj edilmiş soğutucu için porozite değeri;

$$\varepsilon = \frac{(0,0445^3 \times 324) - (0,014)}{(0,0445^3 \times 324)} = 0,509 \text{ olarak elde edilir.}$$

$$A_o = \frac{A_{fs}}{V_s} = 44,91 / m \text{ [Carman-Koseny]} \quad (2.14)$$

$$d_h = \frac{4\varepsilon}{A_o(1-\varepsilon)} = \frac{4 \times 0,509}{44,9 \times (1-0,509)} = 0,0923 \text{ [Carman-Koseny]} \quad (2.13)$$

$$k_k = 4,74 \text{ (Koseny Katsayısı)} \quad (\text{Tablo2.3})$$

$$K = \frac{\varepsilon d_h^2}{16k_k} = \frac{0,509 \times 0,0923^2}{16 \times 4,74} = 5,71 \times 10^{-5} \text{ [Carman-Koseny]} \quad (2.15)$$

$$Ra_y = \frac{Kg\beta y \Delta T}{\alpha \nu} \text{ [Darcy]} \quad (3.45)$$

$$T_f = \frac{T_\infty + T_w}{2}$$

$$T_f = \frac{4,678 + 5}{2} = 4,839^\circ C = 277,989^\circ K$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{277,989} = 3,5 \times 10^{-3} 1/^\circ K$$

$$Ra_y = \frac{5,718 \times 10^{-5} (9,81) (3,5 \times 10^{-3}) (20)}{19,2 \times 10^{-6} 13,665 \times 10^{-6}} = 1,49 \times 10^5$$

$$Nu_y = 1,03 Ra_y^{1/3}$$

$$Nu_y = 1,03(1,49 \times 10^5)^{1/3} = 54,68 \text{ [Nield, Bejan 1992]} \quad (3.50)$$

$$\delta = Ra_y^{-1/3} = 0,018 \text{ m [Nield, Bejan 1992]} \quad (3.48)$$

$$Pr = 0,7 \text{ Ek-1}$$

Soğutucu boş iken taşınım değeri bulunurken Grashof değeri;

$$Gr_L = \frac{\beta g \Delta T L^3}{\nu^2} \quad (\text{Catton, 1978})$$

$$Gr_L = \frac{3,5 \times 10^{-3} (9,81) (20) (0,5^3)}{(13,665 \times 10^{-6})^2} = 6281$$

$$Ra_L = Pr Gr \quad (\text{Catton, 1978})$$

$$Ra_L = 6281 \times 0,7 = 4396,7$$

$Ra_{Lkr} = 1708$ dir. Eğer $Ra_{Lkr} < 1708$ taşınım gerçekleşmez. Yüzeyler arasında iletim meydana gelir. Düzgün yüzeyler için; (Catton, 1978). İki ucu kapalı iki düzlem duvar arasında doğal taşınım ısı transferi modeline uygun olarak soğuk duvar ve diğer düzlem duvar arasında doğal taşınım problemi çözülürken;

$$\overline{Nu}_L = \frac{(0,42 \cdot Ra_L^{0,25} Pr^{0,012})}{(H/L)^{1/3}} \quad [6] (\text{Catton, 1978}) \quad (7.4)$$

eşitliği öngörülmektedir.

$$\overline{Nu}_L = \frac{(0,42 \cdot 4396,7^{0,25} 0,714^{0,012})}{(0,5/1)^{1/3}} = 20,43$$

Sonucu elde edilmektedir ki teorik olarak kabul edilen porozitenin taşınım ısı transferine etkisi deneysel olarak da belirgin bir şekilde gözlenebilmektedir.

EK2 1 Atm BASINÇTA HAVANIN TERMAL ÖZELLİKLERİ

Sıcaklık (K)	Özgül Isı		- k - (c_p/c_v)	Dinamik	Isıl	Prandtl Sayısı	Kinematik	Yoğunluk (ρ)
	- c_p - (kJ/kgK)	- c_v - (kJ/kgK)		Viskozite	Geçirgenlik		Viskozite	
				- μ - 10^{-5} (kg/m s)	10^{-5} (kW/m K)		- ν - (m^2/s)	
175	1.0023	0.7152	1.401	1.182	1.593	0.744	0.586	2.017
200	1.0025	0.7154	1.401	1.329	1.809	0.736	0.753	1.765
225	1.0027	0.7156	1.401	1.467	2.020	0.728	0.935	1.569
250	1.0031	0.7160	1.401	1.599	2.227	0.720	1.132	1.412
275	1.0038	0.7167	1.401	1.725	2.428	0.713	1.343	1.284
300	1.0049	0.7178	1.400	1.846	2.624	0.707	1.568	1.177
325	1.0063	0.7192	1.400	1.962	2.816	0.701	1.807	1.086
350	1.0082	0.7211	1.398	2.075	3.003	0.697	2.056	1.009
375	1.0106	0.7235	1.397	2.181	3.186	0.692	2.317	0.9413
400	1.0135	0.7264	1.395	2.286	3.365	0.688	2.591	0.8824
450	1.0206	0.7335	1.391	2.485	3.710	0.684	3.168	0.7844
500	1.0295	0.7424	1.387	2.670	4.041	0.680	3.782	0.7060
550	1.0398	0.7527	1.381	2.849	4.357	0.680	4.439	0.6418
600	1.0511	0.7640	1.376	3.017	4.661	0.680	5.128	0.5883
650	1.0629	0.7758	1.370	3.178	4.954	0.682	5.853	0.5430
700	1.0750	0.7879	1.364	3.332	5.236	0.684	6.607	0.5043
750	1.0870	0.7999	1.359	3.482	5.509	0.687	7.399	0.4706
800	1.0987	0.8116	1.354	3.624	5.774	0.690	8.214	0.4412
850	1.1101	0.8230	1.349	3.763	6.030	0.693	9.061	0.4153
900	1.1209	0.8338	1.344	3.897	6.276	0.696	9.936	0.3922
950	1.1313	0.8442	1.340	4.026	6.520	0.699	10.83	0.3716
1000	1.1411	0.8540	1.336	4.153	6.754	0.702	11.76	0.3530
1050	1.1502	0.8631	1.333	4.276	6.985	0.704	12.72	0.3362
1100	1.1589	0.8718	1.329	4.396	7.209	0.707	13.70	0.3209
1150	1.1670	0.8799	1.326	4.511	7.427	0.709	14.70	0.3069
1200	1.1746	0.8875	1.323	4.626	7.640	0.711	15.73	0.2941
1250	1.1817	0.8946	1.321	4.736	7.849	0.713	16.77	0.2824
1300	1.1884	0.9013	1.319	4.846	8.054	0.715	17.85	0.2715
1350	1.1946	0.9075	1.316	4.952	8.253	0.717	18.94	0.2615
1400	1.2005	0.9134	1.314	5.057	8.450	0.719	20.06	0.2521
1500	1.2112	0.9241	1.311	5.264	8.831	0.722	22.36	0.2353
1600	1.2207	0.9336	1.308	5.457	9.199	0.724	24.74	0.2206