

۸۷/۱/۱۰۹۰۰۴
۱۸۸/۱/۲۱



دانشگاه شیراز
دانشگده مهندسی

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)

مدل سازی انتقال گرمای جابجایی آرام دانه - سیال دما ثابت در
محیط‌های متخلخل همگن اشباع

توسط:

یاسر حداد

استاد راهنما:

دکتر خسرو جعفرپور

۱۳۸۸ / ۱۱ / ۲۸

مهرماه ۱۳۸۷

۱۱۰۳۲۷

به نام خدا

مدل سازی انتقال گرمای جابجایی آرام دانه- سیال دما ثابت در محیط‌های
متخلخل همگن اشباع

توسط:

یاسر حداد

پایان نامه

ارایه شده به معاونت تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از فعالیت‌های لازم
برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی:

مهندسی مکانیک

از دانشگاه شیراز

شیراز

ایران

ارزیابی شده توسط کمیته‌ی پایان نامه با درجه‌ی عالی

دکتر خسرو جعفرپور، دانشیار مهندسی مکانیک (رییس کمیته)

دکتر محمود یعقوبی، استاد مهندسی مکانیک

دکتر علی اکبر گل‌نشان استادیار مهندسی مکانیک

مهرماه ۱۳۸۷

*There, no lamps are lit
Whatever in that distance lies
that glowing point perhaps
is just the desert wolf's eyes*

*The wine has remained in the cup
How long on the prayer rug will your
forehead recline?
Here is the place he is hidden,
all glowing in the wine
(Feroogh Farokhzad)*

نه هر انجمنست در آه بابا
هر چه از دور نماندست
تا بر آه نقطه‌ی نورانی
به نغمه‌ی گنگاه بیابانست

می فرو مانده به جماع
سر به سجاده نهاده ناکی
از دور این جماعت نهاده
می در بند دور می
(زرغ فرخزاد)

تقدیم به:

پدر و مادر مهربان

و

برادران عزیزم

سپاس‌گزاری

اینک که به یاری آفریدگار مهربان این پژوهش به پایان رسیده است، لازم می‌دانم از زحمات و راهنمایی‌های ارزنده‌ی جناب آقای دکتر خسرو جعفرپور صمیمانه سپاس‌گزاری نمایم. چرا که بدون حضور گرانقدر ایشان انجام این تحقیق میسر نبود.

هم‌چنین از اساتید محترم کمیته‌ی پایان‌نامه جناب آقای دکتر محمود یعقوبی و جناب آقای دکتر علی اکبر گل‌نشان که با راهنمایی‌های سودمند خود اینجانب را یاری کردند کمال قدردانی را دارم.

از دوستان بزرگوادم آقایان یاسر امینی، علی رضا خدام و محمد وهابی که در استفاده از برخی نرم‌افزارها مرا یاری کردند تشکر می‌نمایم.

در پایان از خانواده‌ی عزیزم که در تمام مراحل زندگی مشوق و همراه من بوده‌اند نیز کمال سپاس‌گزاری را دارم.

چکیده

مدل سازی انتقال گرمای جابجایی آرام دانه- سیال دما ثابت در محیط‌های متخلخل همگن اشباع

به وسیله‌ی:

یاسر حداد

انتقال گرما جابجایی آرام (آزاد و اجباری) در محیط‌های متخلخل دما ثابت اشباع و همگن، به ویژه بسترها، همواره از اهمیت ویژه‌ای در علوم مهندسی و صنایع مختلف برخوردار بوده‌است. توجه به این مقوله از اواسط دهه‌ی ۴۰ میلادی شروع شد و در دهه‌ی ۷۰ به اوج رسید. در این بازه‌ی زمانی مطالعات و تحقیقاتی منتشر شده‌است که در اغلب آن‌ها نویسندگان سعی بر ارایه‌ی روابطی برای محاسبه‌ی عدد نوسلت بر حسب پارامترهای موثر، با استفاده از روش‌های تجربی متفاوت، داشته‌اند. هرچند این روابط با موفقیت‌هایی همراه بوده، ولی هم‌چنان در بر دارنده‌ی برخی نقایص و مشکلات نیز بوده‌است. به عنوان مثال بسیاری از این روابط نوسلت حدی (حد هدایت) را به درستی پیش‌بینی نمی‌کنند و یا برخی از آن‌ها نقش ضریب تخلخل را به صورت مناسبی در بر نمی‌گیرند، لذا نیاز به یک رابطه‌ی جامع و مناسب که در بردارنده‌ی پارامترهای مهم و موثر بر انتقال گرما در این محیط‌ها باشد، انگیزه‌ی انجام پژوهش حاضر شد.

در این تحقیق علاوه بر تأثیر عدد رینولدز (یا رایلی) و پرانتل، نقش هندسه‌ی دانه‌ها و ضریب تخلخل نیز در نظر گرفته شده‌است. در این مطالعه محیط متخلخل به عنوان اجتماعی از اجسام مجزای دما ثابت با هندسه‌ی مشخص در نظر گرفته شده‌است بنابراین نخست انتقال گرما جابجایی اجباری آرام از اجسام مجزای دما ثابت در جریان محوری سیال بررسی شد. سپس نقش ضریب تخلخل، که مبین اجتماع مذکور است در قالب توابعی تحت عنوان توابع سهم اعمال شده‌است. تابع سهم تخلخل رسانایی که تأثیر ضریب تخلخل را در نوسلت حدی وارد می‌کند با استفاده از روش عددی پانل قابل محاسبه می‌باشد. تابع سهم تخلخل جابجایی با استفاده از یک سری فعالیت آماری بر داده‌های تجربی معتبر محققان سابق برآورد شده‌است. این تابع نقش ضریب تخلخل را در ترم مربوط به حل لایه مرزی وارد می‌کند. در این پژوهش روابطی برای تخمین عدد نوسلت جابجایی اجباری آرام اجسام مجزای دما ثابت و متعاقب آن برای بسترهایی که از اجتماع این اجسام تشکیل شده‌اند آورده شده‌است. هم‌چنین روابطی، با استفاده از متوسط‌گیری حسابی این روابط، برای انتقال گرمای جابجایی اجباری آرام اجسام دما ثابت با هندسه‌ی دلخواه و بسترهایی که از در کنار هم قرار گرفتن این اجسام تشکیل شده‌اند نیز، آورده شده‌است. با استفاده از این روش، مدل‌هایی نیز برای تخمین جابجایی آزاد در محیط‌های متخلخل، ارایه شده‌است. در پایان نتایج مدل پیشنهادی با برخی روابط معروف محققان سابق مقایسه و اعتبار آن‌ها ارزیابی شده‌است.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل ۱: مقدمه
۱	
۲	۱-۱ معرفی محیط متخلخل و اهمیت آن در پدیده‌های انتقال
۴	۲-۱ معرفی پارامترهای فیزیکی محیط متخلخل
۶	۳-۱ برخی از کاربردهای محیط‌های متخلخل
۷	۴-۱ انواع بسترها
۹	۵-۱ انتقال گرمای جابجایی از اجسام مجزا و کاربردهای آن
۱۰	۶-۱ ایده‌ی اصلی پژوهش
۱۱	۷-۱ اهداف پژوهش حاضر
۱۱	۸-۱ چکیده
	فصل ۲: معادلات و مدل‌ها
۱۳	
۱۴	۱-۲ معادلات حاکم
۱۵	۱-۱-۲ معادله‌ی پیوستگی
۱۵	۲-۱-۲ معادله‌ی ممنتم
۱۹	۳-۱-۲ معادله‌ی انرژی
۲۰	۲-۲ مدل‌های انتقال گرما
۲۱	۱-۲-۲ مدل شومن
۲۱	۲-۲-۲ مدل C-S
۲۲	۳-۲-۲ مدل D-C
۲۴	۳-۲ پارامترهای موثر برانتقال گرما در بسترهای فشرده
۳۰	۴-۲ روش‌های مختلف انجام آزمایش
۳۱	۵-۲ چکیده

صفحه	عنوان
۳۲	فصل ۳: مروری بر تحقیقات گذشته
۳۳	۱-۳ اجسام مجزای هم‌دما
۳۷	۲-۳ جابجایی اجباری در بسترهای فشرده
۴۹	۲-۳ جابجایی آزاد در بسترهای فشرده
۵۰	۳-۳ چکیده
۵۱	فصل ۴: مدل‌سازی
۵۲	۱-۴ جابجایی اجباری از اجسام هم‌دما در جریان سیال با تقارون محوری
۵۵	۲-۴ محاسبه‌ی عددی نوسلت جابجایی اجباری کره هم‌دما
۵۵	۱-۲-۴ تئوری
۵۷	۲-۲-۴ مدل‌سازی ریاضی
۵۸	۳-۲-۴ مدل‌سازی عددی
۵۸	۳-۴ محاسبه‌ی عدد نوسلت جابجایی اجباری مخروط هم‌دما با نسبت منظری یک در جریان محوری
۶۲	۴-۴ محاسبه‌ی عدد نوسلت جابجایی اجباری استوانه‌ی هم‌دما با نسبت منظری یک در جریان محوری
۶۶	۵-۴ محاسبه‌ی عدد نوسلت جابجایی اجباری بسترهای فشرده و مبسوط دما ثابت با دانه‌های کروی
۶۹	۶-۴ تعمیم رابطه‌ی ارایه شده برای جابجایی اجباری بسترها با دانه‌های کروی برای بسترها با دانه‌های مخروطی، استوانه‌ای و هندسه‌ی دلخواه با ضریب منظری یک
۷۰	۷-۴ تعمیم عدد نوسلت برای جابجایی آزاد در بسترهای فشرده
۷۱	۸-۴ چکیده
۷۲	فصل ۵: نتایج مدل پیشنهادی
۷۳	۱-۵ نتایج جابجایی اجباری کره‌ی مجزا
۷۵	۲-۵ نتایج جابجایی اجباری مخروط مجزا با نسبت منظری یک
۷۶	۳-۵ نتایج جابجایی اجباری استوانه‌ی مجزا با نسبت منظری یک

صفحه	عنوان
۷۸	۴-۵ جابجایی اجباری از اجسام با نسبت منظری یک در جریان سیال متقارن محوری
۸۰	۵-۵ جابجایی اجباری از استوانه با نسبت منظری متفاوت در جریان محوری سیال
۸۴	۶-۵ جابجایی اجباری در بسترهای ثابت با دانه‌های کروی یکسان
۹۰	۷-۵ جابجایی اجباری در بسترهای فشرده با دانه‌های استوانه‌ای یکسان با ضریب منظری
۹۳	۸-۵ جابجایی اجباری در بسترهای ثابت با دانه‌های مخروطی یکسان با ضریب منظری یک
۹۳	۹-۵ جابجایی اجباری در بسترهای ثابت با دانه‌های یکسان با ضریب منظری یک و شکل متقارن محوری دلخواه
۹۴	۱۰-۵ جابجایی آزاد در بسترهای ثابت
۹۶	۱۱-۵ چکیده
۹۷	فصل ۶: جمع‌بندی نتایج و پیشنهادات
۹۸	۱-۶ جمع‌بندی نتایج
۱۰۰	۲-۶ پیشنهادات
۱۰۱	فهرست مراجع

فهرست جداول

صفحه	عنوان و شماره
۴۱	جدول (۱-۳) شریط مرزی محوری برای مدل C-S
۷۳	جدول (۱-۵) نتایج مطالعه‌ی شبکه (عدد نوسلت) برای کره
۷۵	جدول (۲-۵) نتایج مطالعه‌ی شبکه (عدد نوسلت) برای مخروط با نسبت منظری یک
۷۶	جدول (۳-۵) مقایسه‌ی ضریب پسا مخروط با تحقیقات پیشین
۷۷	جدول (۴-۵) نتایج مطالعه‌ی شبکه (عدد نوسلت) برای استوانه با نسبت منظری یک
۷۷	جدول (۵-۵) مقایسه‌ی ضریب پسای استوانه با تحقیقات پیشین

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان و شماره
۳	شکل (۱-۱) محیط متخلخل تشکیل شده از حفره‌ها
۳	شکل (۲-۱) محیط متخلخل تشکیل شده از کره‌های متفاوت
۴	شکل (۳-۱) سه محیط متخلخل فرضی با دانه‌ها و ضرایب تخلخل متفاوت
۵	شکل (۴-۱) یک محیط متخلخل همگن
۵	شکل (۵-۱) یک محیط متخلخل ناهمگن
۷	شکل (۶-۱) یک بستر فشرده
۸	شکل (۷-۱) نحوه‌ی اتصال دانه‌های بستر مبسوط (آرایش مکعبی)
۸	شکل (۸-۱) یک بستر سیالی شده
۲۳	شکل (۱-۲) مربوط به مدل Schumann
۲۳	شکل (۲-۲) مربوط به مدل C-S
۲۳	شکل (۳-۲) مربوط به مدل D-S اصلی
۲۳	شکل (۴-۲) مربوط به مدل D-S اصلاح شده
۲۸	شکل (۵-۲) انتقال گرمای جابجایی در لایه‌ی ورودی یک بستر
۲۸	شکل (۶-۲) توزیع شعاعی ضریب تخلخل
۲۹	شکل (۷-۲) حفره‌ها با اتصال گلوگاهی
۲۹	شکل (۸-۲) حفره‌ها با اتصال گردنه‌ای
۲۹	شکل (۹-۲) تشکیل گردابه در حفره
۳۸	شکل (۱-۳) ضرایب به طبع رسیده در تاریخچه
۴۴	شکل (۲-۳) رابطه‌ی تغییرات عدد نوسلت بر حسب $(pr^{1/3} Re^{3/5})^2$
۴۵	شکل (۳-۳) بازه‌ی عدم اطمینان عدد نوسلت

- شکل (۵-۱۲) مقایسه‌ی نتایج تحقیق حاضر با نتایج محققان پیشین برای یک
 ۸۸ بستر دما ثابت کرووی با ضریب تخلخل $0.175 (Nu_{\sqrt{A}} \text{ بر حسب } Re_{\sqrt{A}})$
- شکل (۵-۱۳) مقایسه‌ی نتایج تحقیق حاضر با نتایج محققان پیشین برای یک
 ۹۱ بستر دما ثابت استوانه‌ای با ضریب تخلخل $0.125 (Nu_{\sqrt{A}} \text{ بر حسب } Re_{\sqrt{A}})$
- شکل (۵-۱۴) مقایسه‌ی نتایج تحقیق حاضر با نتایج محققان پیشین برای یک
 ۹۲ بستر دما ثابت استوانه‌ای با ضریب تخلخل $0.15 (Nu_{\sqrt{A}} \text{ بر حسب } Re_{\sqrt{A}})$
- شکل (۵-۱۵) مقایسه‌ی نتایج تحقیق حاضر با نتایج محققان پیشین برای یک
 ۹۲ بستر دما ثابت استوانه‌ای با ضریب تخلخل $0.175 (Nu_{\sqrt{A}} \text{ بر حسب } Re_{\sqrt{A}})$

فهرست نشانه‌های اختصاری

مساحت جانبی سطح جسم یا دانه	A
سطح مقطع جریان	A
مساحت کره هم حجم جسم	A_e
مساحت سطح تر شونده	A_v
مساحت سطح بر واحد حجم بستر	a_v
غلظت	C
ضریب فرچه‌یمر معادله‌ی (۷-۲)	C_F
ظرفیت گرمایی فاز جامد	c
ظرفیت گرمایی فشار ثابت	c_p
ضریب پخش	D
قطر ناحیه‌ی حل (شکل ۴-۴)	D
قطر بستر	D_b
عدد دارسی	Da
قطر جسم یا دانه	d
قطر هیدرولیکی	d_h
ضریب شکل	f
ضریب مربوط به هندسه جریان در معادله‌ی (۴-۱)	G
ضریب مربوط به هندسه جریان در معادله‌ی (۵-۱)	G'
تابع پویای جاذبه جسم	G_{dyn}
ثابت گرانش	g
تابع سهم تخلخل رسانایی	H_{cd}

تابع سهم تخلخل جابجایی	H_{cv}
ضریب انتقال گرمای جابجایی	h
ارتفاع	h
شمارنده	i
نفوذ پذیری	K
رسانایی	k
رسانایی موثر	ke
طول ناحیه‌ی حل (شکل ۴-۴)	L
طول مشخصه (عدد رایلی)	L_c
طول	l
طول مشخصه‌ی ماکروسکوپی (عدد دارسی)	l_c
طول بستر	l
توان عدد رینولدز در معادله‌ی (۴-۱)	m
توان عدد رینولدز در معادله‌ی (۵-۱)	m'
تعداد	N
عدد نوسلت بر مبنای جذر مساحت سطح	$Nu_{\sqrt{A}}$
عدد نوسلت بر مبنای قطر	Nu_d
عدد نوسلت اصلاح شده بر اساس قطر $Nu_m = \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} Nu_d$	$Nu_{d,m}$
شکل (۵-۲)	
توان عدد پرانت در معادله‌ی (۴-۱)	n
توان عدد پرانت در معادله‌ی (۵-۱)	n'
فشار	P
محیط تر شونده‌ی سطح مقطع	P
عدد پرانت	Pr
عدد پکله	Pe
شار گرمایی	q''
شعاع دانه (مدل D-C)	R
فاصله‌ی نقاط سطح جسم تا محور تقارون آن	R
عدد رایلی	Ra

عدد رایلی بر مبنای جذر مساحت سطح	$Ra_{\sqrt{A}}$
عدد دارسی- رایلی	Ra_m
عدد رینولدز	Re
عدد رینولدز بر اساس قطر	Re_d
عدد رینولدز بر اساس جذر مساحت سطح	$Re_{\sqrt{A}}$
عدد رینولدز اصلاح شده بر اساس قطر شکل (۲-۵)	$Re_{d,m}$
عدد رینولدز اصلاح شده بر اساس جذر مساحت سطح	$Re_{\sqrt{A},m}$
عدد رینولدز حفره	Re_p
عدد رینولدز بحرانی بر مبنای قطر	$Re_{d,c}$
فاصله‌ی مرکز تا سطح دانه (مدل D-C)	r
شعاع جسم یا دانه	r
فاصله‌ی شعاعی از مرکز یک بستر با سطح مقطع استوانه- ای (شکل ۲-۶)	r
انحراف از معیار	S
فاصله، شکل (۴-۴)	s
دما	T
زمان	t
سرعت جریان آزاد	U
مولفه‌ی x سرعت دارسی	u
مولفه‌ی x سرعت	u_x
مولفه‌ی y سرعت	u_y
سرعت دارسی	V
سرعت ذاتی	V
حجم بستر	V
حجم دانه	V_p
حجم مهیا برای جریان	V_v
داده آماری معادله‌ی (۴-۶۱) و (۴-۶۲)	x
مختصات مماسی بی بعد معادله‌ی (۴-۱۱)	X

اندیس‌ها

محوری	<i>ax</i>
مخروط	<i>co</i>
بستر با دانه‌های مخروطی	<i>cob</i>
رسانایی	<i>cd</i>
جابجایی	<i>cv</i>
استوانه	<i>cy</i>
بستر با دانه‌های استوانه‌ای	<i>cyb</i>
موثر	<i>e</i>
فاز سیال	<i>f</i>
هیدرولیکی	<i>h</i>
اصلاح شده	<i>m</i>
مربوط به دانه	<i>p</i>
فاز جامد	<i>S</i>
روی سطح	<i>s</i>
کره	<i>sp</i>
بستر با دانه‌های کروی	<i>spb</i>
دیوار	<i>w</i>

حروف یونانی

ضریب نفوذ گرمایی	α
ضریب انبساط حجمی	β
ضریب معادله‌ی (۱-۳)	γ
ضریب تخلخل	ε
چرخش روی سطح	ζ_s
فاصله‌ی بین دانه‌های همسایه	η
زاویه	θ
لزجت دینامیک	μ
لزجت سینماتیک	ν
فاصله‌ی بی‌بعد نقاط روی سطح جسم از محور تقارن	Ξ
آن معادله‌ی (۱۱-۴)	
چگالی	ρ
Tortuosity	τ
زاویه‌ی رأس مخروط	φ

فصل ۱ : مقدمه

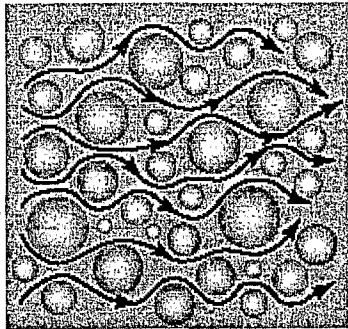
۱- مقدمه

در این پژوهش انتقال گرمای جابجایی اجباری و آزاد آرام دانه - سیال دما ثابت در محیط‌های متخلخل همگن اشباع بررسی خواهد شد. نظر به اهمیت انتقال گرما در این محیط‌ها و کاربردهای فراوان آن، در این فصل ابتدا به معرفی محیط متخلخل^۱ و پارامترهای فیزیکی آن که به طور عمده در مبحث پدیده های انتقال ایفای نقش می کنند پرداخته می‌شود. سپس، برخی از موارد استفاده آن در موارد گوناگون ذکر خواهد شد. هم چنین در این فصل انواع بسترها و کاربرد آن ها در صنایع مختلف معرفی می‌شود. گذری بر انتقال گرما از اشکال هندسی مجزای دما ثابت نیز، به دلیل کارایی آن‌ها در این تحقیق، آورده شده است. در پایان ایده، طرح اصلی و اهداف پژوهش حاضر به اختصار بیان می‌شود.

۱-۱ معرفی محیط متخلخل و اهمیت آن در پدیده‌های انتقال

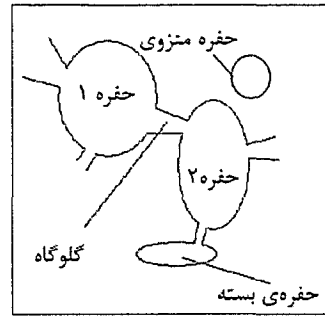
محیط متخلخل شامل یک شبکه جامد و یک فضای همبسته ی خالی می باشد [۱]. برای داشتن تجسمی ساده از محیط متخلخل می توان آن را مجموعه ای از حفره‌های خالی که توسط مجراهایی به هم متصل می شوند (شکل ۱-۱) و یا دانه‌های جامد با هندسه های مشخص، مثلاً همگی کره، که در کنار هم شبکه ی جامدی را همراه با حفره ها تشکیل می دهند (شکل ۱-۲) دانست.

¹ Porous Media



شکل (۲-۱) محیط متخلخل تشکیل

شده از کره‌های متفاوت



شکل (۱-۱) محیط متخلخل

تشکیل شده از حفره‌ها

بعضی از حفره‌های موجود ممکن است تنها دارای یک ورودی باشند بدیهی است که هنگام عبور سیال از محیط، سیال در این حفره‌ها به تله می‌افتد و به حالت سکون در می‌آید به این نوع از حفره‌ها، حفره‌های بسته^۱ می‌گویند (شکل ۱-۱). برخی دیگر از حفره‌ها ممکن است کاملاً توسط فاز جامد محصور شده باشند و فاز سیال نتواند به آن‌ها راه یابد به چنین حفره‌هایی، حفره‌های محصور یا منزوی^۲ می‌گویند (شکل ۱-۱).

پدیده‌های انتقال واژه‌ای است که برای انتقال ممنتم، گرما و جرم به کار می‌رود. در صنایع مختلف می‌توان شاهد نمونه‌های بسیار متنوعی از این پدیده‌ها بود. اهمیت محیط‌های متخلخل در صنعت، بیشتر به علت کاربردهای آن در انتقال گرما و جرم می‌باشد. محیط‌های متخلخل به دو دلیل در انتقال گرما و جرم دارای کاربردهای بسیار می‌باشند. اول به علت زیاد بودن سطح تماس فازهای سیال و جامد بر واحد حجم و اغتشاش ناشی از پیچ و خم جریان، میزان انتقال گرما و جرم بر واحد حجم این محیط‌ها بسیار بالاست. به همین جهت در مواردی محیط‌های متخلخل طراحی و ساخته می‌شوند. دوم در بسیاری موارد در صنعت و طبیعت انتقال جرم و گرما در محیط‌های متخلخل اتفاق می‌افتد و لذا مواجه شدن با این محیط‌ها گریز ناپذیر است. به عنوان مثال کربنی که در فرآیند جذب به عنوان ماده‌ی جاذب در انتقال جرم شرکت می‌کند یک ماده‌ی متخلخل می‌باشد. و یا در سیستم‌های زمین گرمایی که گرما از زمین گرفته یا به آن داده می‌شود خاک به عنوان یک محیط متخلخل که با سیستم تبادل گرما می‌کند در نظر گرفته می‌شود. نظر به اهمیت زیاد و کاربردهای فراوان پدیده‌های انتقال در محیط‌های متخلخل در این پایان نامه به بررسی انتقال گرما جابجایی اجباری و آزاد در این محیط‌ها پرداخته شده است.

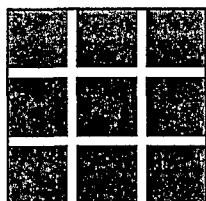
¹ Dead End Pore

² Isolated Pore

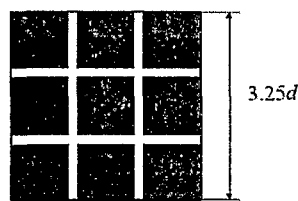
۲-۱ معرفی پارامترهای فیزیکی محیط متخلخل

برخی پارامترهای و مفاهیم مهم مربوط به طبیعت محیط های متخلخل به قرار زیر می باشند:
 حفره^۱: در فضای خالی محیط متخلخل مکان هایی وجود دارند که شعاع هیدرولیکی این فضا کمینه می شود اگر در این مکان ها صفحاتی قرار دهیم آنگاه به قسمتی از فضای خالی که توسط این صفحات و سطوح جامد محصور می شوند حفره می گویند.

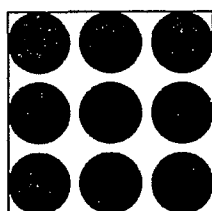
ضریب تخلخل^۲ (ε): به کسری از کل حجم یک محیط متخلخل که توسط فضای خالی اشغال می شود. ضریب تخلخل (یا ضریب تخلخل حجمی^۳) آن محیط می گویند. در شکل (۱-۳) سه محیط متخلخل با دانه ها و ضرایب تخلخل متفاوت که به صورت تحلیلی قابل محاسبه هستند آورده شده است.



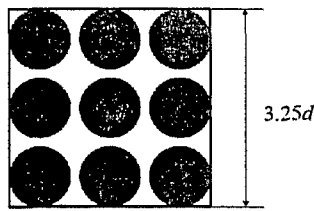
نمای بالا



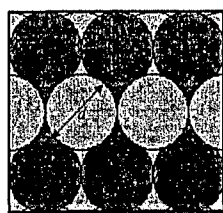
شکل (۱-۳ الف) آرایه مکعبی نمای روبه رو ($\varepsilon = 21.3\%$)



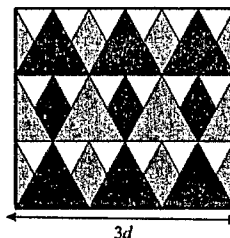
نمای بالا



شکل (۱-۳ ب) آرایه کروی نمای روبه رو ($\varepsilon = 58.8\%$)



نمای بالا



شکل (۱-۳ ج) آرایه مخروطی نمای روبه رو ($\varepsilon = 71.3\%$)

شکل (۱-۳) ضریب تخلخل برای سه محیط متخلخل فرضی

¹ Pore

² Porosity

³ Volume Porosity