



پایان نامه کارشناسی ارشد عمران – گرایش مکانیک خاک و پی

عنوان پایان نامه

**بررسی تاثیر ناهمگنی سنگ غیر اشباع در انتشار موج با استفاده از تئوری
محیط‌های متخلخل**

دانشجو: امیر علی ابونوری

شماره دانشجویی: ۸۸۰۱۲۹۴

استاد راهنما

دکتر حسن قاسم زاده

بهمن ۱۳۹۰



تقدیم به مادر مهربان و پدر فداکارم.

به مصداق «من لم يشكر المخلوق لم يشكر الخالق» بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر حسن قاسم زاده به جهت راهنمایی‌های بی‌دریغ ایشان تقدیر و تشکر نمایم.

چکیده

در طی سال‌های اخیر استفاده از امواج تنش به منظور بدست آوردن خصوصیات مواد متخلخل تشکیل دهنده زمین از جمله سنگ و خاک، افزایش روز افزونی داشته است. از اهداف مهم محققان درک ارتباط میان خصوصیات فیزیکی محیط متخلخل و پارامترهای با اهمیت انتشار موج مانند سرعت و استهلاک امواج است. سیال‌های موجود در حفرات محیط متخلخل و همچنین ناهمگنی ایجاد شده بسبب نحوه توزیع سیال‌های اشباع کننده محیط از جمله موارد تاثیر گذار بر سرعت و استهلاک امواج می‌باشد که مطالعات کمتری در مقایسه با ناهمگنی‌های ایجاد شده توسط اسکلت محیط متخلخل در مورد آن انجام گرفته است. تکه‌ای بودن الگوی اشباع‌شدگی از جمله مواردی که سبب بوجود آمدن ناهمگنی در توزیع سیال درون محیط متخلخل می‌شود که در تحقیق حاضر اثر آن بر روی تغییرات سرعت و استهلاک موج مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بعلاوه، وجود دو سیال متفاوت بصورت همزمان در حفرات محیط متخلخل از جمله موارد بسیار رایج از ناهمگنی‌های بوجود آمده است. بررسی تاثیر ناهمگنی ذکر شده با استفاده از نوشتن معادلات انتشار موج در محیط اشباع از دو سیال و حل این معادلات در فضای فرکانس-عدد موج حاصل می‌گردد. لازم به ذکر است که معادلات بدست آمده در محدوده فرکانس‌های پایین و محدوده فرکانس‌های بالا که بترتیب اثرات ویسکوز و اینرسی بر سیال حاکم است، معتبر است. در نتیجه می‌توان بدون محدودیت در فرکانس اعمالی به بررسی خصوصیات انتشار امواج پرداخت.

فصل اول - پیشگفتار

۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- ادبیات موضوع	۲
۱-۳- اهداف تحقیق	۷
۱-۴- ضرورت تحقیق	۸
۱-۵- سؤالات تحقیق	۸
۱-۶- ساختار تحقیق	۹
۱-۷- روش تحقیق	۱۰

فصل دوم - بررسی انتشار موج در محیط متخلخل اشباع

۲-۱- مقدمه	۱۲
۲-۲- تعاریف	۱۲
۲-۳- فرضیات اساسی	۱۳
۲-۴- روابط تنش کرنش	۱۴
۲-۵- معادلات بقای مومنتوم	۱۷
۲-۶- معادلات موج در محیط متخلخل اشباع	۱۹
۲-۷- حل معادلات موج در محیط متخلخل اشباع	۲۰
۲-۸- تاثیر پارامترهای حاکم بر سرعت و استهلاک امواج	۲۴
۲-۸-۱- وابستگی سرعت امواج به فرکانس	۲۵
۲-۸-۲- وابستگی استهلاک امواج به فرکانس	۲۹
۲-۸-۳- تاثیر نفوذپذیری بر سرعت امواج	۳۳
۲-۹- مدول‌های الاستیک در محیط متخلخل	۳۷
۲-۱۰- سرعت و استهلاک در محیط متخلخل اشباع از هوا	۴۱
۲-۱۱- نحوه تغییرات طول موج و اثر آن بر خصوصیات امواج	۴۴

۴۴.....	۱-۱۱-۲ تغییرات طول موج نسبت به فرکانس
۴۶.....	۲-۱۱-۲ تغییرات سرعت و استهلاک امواج نسبت به طول موج ۱
۴۹.....	۲-۱۲- نتیجه گیری

فصل سوم - بررسی انتشار موج در محیط متخلخل با اشباع تکه‌ای

۵۲.....	۳-۱- مقدمه
۵۳.....	۳-۲- معادلات حاکم
۵۴.....	۳-۳- سرعت و استهلاک در محیط متخلخل با اشباع تکه‌ای
۵۹.....	۳-۴- بررسی تغییرات سرعت و استهلاک موثر
۶۳.....	۳-۵- نتیجه گیری

فصل چهارم - انتشار موج در محیط متخلخل اشباع از دو سیال

۶۶.....	۴-۱- مقدمه
۶۷.....	۴-۲- معادلات حاکم
۶۹.....	۴-۳- معادلات موج
۷۰.....	۴-۵- حل معادلات موج در محیط متخلخل غیر اشباع
۷۵.....	۴-۶- حالت خاص اشباع از یک سیال
۷۷.....	۴-۷- پارامترهای مدل
۷۹.....	۴-۸- بررسی تاثیر درجه اشباع بروی انتشار امواج
۸۲.....	۴-۸-۱- سرعت موج فشاری نوع اول در ماسه سنگ اشباع از آب و هوا
۸۴.....	۴-۸-۲- سرعت موج فشاری نوع دوم در ماسه سنگ اشباع از آب و هوا
۸۶.....	۴-۸-۳- سرعت موج فشاری نوع سوم در ماسه سنگ اشباع از آب و هوا
۸۷.....	۴-۸-۴- سرعت موج برشی در ماسه سنگ اشباع از آب و هوا
۸۹.....	۴-۸-۵- استهلاک ذاتی موج فشاری نوع اول در ماسه سنگ اشباع از آب و هوا
۹۱.....	۴-۸-۶- استهلاک ذاتی موج فشاری نوع دوم در ماسه سنگ اشباع از آب و هوا
۹۳.....	۴-۸-۷- استهلاک ذاتی موج فشاری نوع سوم در ماسه سنگ اشباع از آب و هوا

- ۴-۸-۸- استهلاک ذاتی موج برشی در ماسه سنگ اشباع از آب و هوا..... ۹۴
- ۴-۹- تاثیر درجه اشباع ماسه بر سرعت امواج فشاری نوع اول و دوم..... ۹۶
- ۴-۱۰- نتیجه گیری..... ۹۹

فصل پنجم - جمع بندی و نتیجه گیری

- ۵-۱- خلاصه کارها و نتایج تحقیق حاضر..... ۱۰۲
- ۵-۲- پیشنهادها برای ادامه کار..... ۱۰۴
- منابع و مراجع..... ۱۰۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ آزمایش ذهنی فشردگی غلاف دار..... ۱۵
- شکل ۲-۲ آزمایش ذهنی فشردگی بدون غلاف..... ۱۶
- شکل ۳-۲ وابستگی سرعت موج فشاری نوع اول به فرکانس در ماسه سنگ..... ۲۶
- شکل ۴-۲ وابستگی سرعت موج فشاری نوع اول به فرکانس در ماسه ۲۷
- شکل ۵-۲ وابستگی سرعت موج فشاری نوع دوم به فرکانس در ماسه سنگ..... ۲۷
- شکل ۶-۲ وابستگی سرعت موج فشاری نوع دوم به فرکانس در ماسه ۲۸
- شکل ۷-۲ وابستگی سرعت موج برشی به فرکانس در ماسه سنگ..... ۲۸
- شکل ۸-۲ وابستگی سرعت موج برشی به فرکانس در ماسه ۲۹
- شکل ۹-۲ وابستگی استهلاک موج فشاری نوع اول به فرکانس در ماسه سنگ..... ۳۰
- شکل ۱۰-۲ وابستگی استهلاک موج فشاری نوع اول به فرکانس در ماسه ۳۱
- شکل ۱۱-۲ وابستگی استهلاک موج فشاری نوع دوم به فرکانس در ماسه سنگ..... ۳۱
- شکل ۱۲-۲ وابستگی استهلاک موج فشاری نوع دوم به فرکانس در ماسه ۳۲
- شکل ۱۳-۲ وابستگی استهلاک موج برشی به فرکانس در ماسه سنگ..... ۳۲
- شکل ۱۴-۲ وابستگی استهلاک موج برشی به فرکانس در ماسه ۳۲
- شکل ۱۵-۲ تاثیر نفوذپذیری بر سرعت موج فشاری نوع اول در ماسه سنگ..... ۳۴
- شکل ۱۶-۲ تاثیر نفوذپذیری بر سرعت موج فشاری نوع دوم در ماسه سنگ..... ۳۴
- شکل ۱۷-۲ تاثیر نفوذپذیری بر سرعت موج برشی در ماسه سنگ..... ۳۵
- شکل ۱۸-۲ تاثیر نفوذپذیری بر استهلاک ذاتی موج فشاری نوع اول در ماسه سنگ..... ۳۶
- شکل ۱۹-۲ تاثیر نفوذپذیری بر استهلاک موج فشاری نوع دوم در ماسه سنگ..... ۳۶
- شکل ۲۰-۲ تاثیر نفوذپذیری بر استهلاک موج برشی در ماسه سنگ..... ۳۷
- شکل ۲۱-۲ تاثیر زبری تماس بین دانه‌ای بر سرعت موج فشاری نوع اول..... ۳۹
- شکل ۲۲-۲ تاثیر زبری تماس بین دانه‌ای بر سرعت موج فشاری نوع دوم..... ۴۰
- شکل ۲۳-۲ تاثیر زبری تماس بین دانه‌ای بر استهلاک موج فشاری نوع اول..... ۴۰
- شکل ۲۴-۲ تاثیر نفوذپذیری بر استهلاک موج فشاری نوع دوم..... ۴۱
- شکل ۲۵-۲ سرعت امواج در ماسه سنگ اشباع از هوا..... ۴۲
- شکل ۲۶-۲ استهلاک موج فشاری نوع اول در ماسه سنگ اشباع از هوا..... ۴۲

- شکل ۲-۲۷ استهلاك موج فشاری نوع دوم در ماسه سنگ اشباع از هوا..... ۴۳
- شکل ۲-۲۸ استهلاك موج برشی در ماسه سنگ اشباع از هوا..... ۴۳
- شکل ۲-۲۹ تاثیر فرکانس بر سرعت طول موج فشاری نوع اول..... ۴۴
- شکل ۲-۳۰ تاثیر فرکانس بر طول موج فشاری نوع دوم..... ۴۵
- شکل ۲-۳۱ تاثیر فرکانس بر طول موج برشی..... ۴۵
- شکل ۲-۳۲ تغییرات سرعت موج فشاری نوع اول با توجه به طول موج..... ۴۶
- شکل ۲-۳۳ تغییرات سرعت موج فشاری نوع دوم با توجه به طول موج..... ۴۷
- شکل ۲-۳۴ تغییرات سرعت موج برشی با توجه به طول موج..... ۴۷
- شکل ۲-۳۵ تغییرات استهلاك ذاتی موج فشاری نوع اول با توجه به طول موج..... ۴۸
- شکل ۲-۳۶ تغییرات استهلاك ذاتی موج فشاری نوع دوم با توجه به طول موج..... ۴۸
- شکل ۲-۳۷ تغییرات استهلاك ذاتی موج برشی با توجه به طول موج..... ۴۹
- شکل ۳-۱ هندسه مدل اشباع تکه‌ای..... ۵۵
- شکل ۳-۲ سرعت c_e در سیستم آب-گاز تابعی از فرکانس..... ۶۱
- شکل ۳-۳ استهلاك ذاتی Q_e^{-1} در سیستم آب-گاز تابعی از فرکانس..... ۶۲
- شکل ۳-۴ سرعت c_e در سیستم آب-نفت تابعی از فرکانس..... ۶۲
- شکل ۳-۵ استهلاك ذاتی Q_e^{-1} در سیستم آب-نفت تابعی از فرکانس..... ۶۳
- شکل ۴-۱ تغییرات درجه اشباع آب و هوا با توجه به مکش..... ۸۱
- شکل ۴-۲ تاثیر تغییرات درجه اشباع بر نفوذپذیری نسبی آب و هوا..... ۸۱
- شکل ۴-۳ تاثیر درجه اشباع بر سرعت موج فشاری نوع اول تحت فرکانس‌های مختلف..... ۸۳
- شکل ۴-۴ تاثیر فرکانس بر سرعت موج فشاری نوع اول برای درجه اشباع‌های مختلف..... ۸۴
- شکل ۴-۵ تاثیر درجه اشباع بر سرعت موج فشاری نوع دوم تحت فرکانس‌های مختلف..... ۸۵
- شکل ۴-۶ تاثیر فرکانس بر سرعت موج فشاری نوع دوم برای درجه اشباع‌های مختلف..... ۸۵
- شکل ۴-۷ تاثیر درجه اشباع بر سرعت موج فشاری نوع سوم تحت فرکانس‌های مختلف..... ۸۶
- شکل ۴-۸ تاثیر فرکانس بر سرعت موج فشاری نوع سوم برای درجه اشباع‌های مختلف..... ۸۷
- شکل ۴-۹ تاثیر درجه اشباع بر سرعت موج برشی تحت فرکانس‌های مختلف..... ۸۸
- شکل ۴-۱۰ تاثیر فرکانس بر سرعت موج برشی برای درجه اشباع‌های مختلف..... ۸۸
- شکل ۴-۱۱ تاثیر درجه اشباع بر استهلاك ذاتی موج فشاری نوع اول تحت فرکانس‌های مختلف..... ۹۰
- شکل ۴-۱۲ تاثیر فرکانس بر استهلاك ذاتی موج فشاری نوع اول برای درجه اشباع مختلف..... ۹۱

- شکل ۴-۱۳ تاثیر درجه اشباع بر استهلاک ذاتی موج فشاری نوع دوم تحت فرکانس های مختلف ۹۲
- شکل ۴-۱۴ تاثیر فرکانس بر استهلاک ذاتی موج فشاری نوع دوم برای درجه اشباع مختلف ۹۲
- شکل ۴-۱۵ تاثیر درجه اشباع بر استهلاک ذاتی موج فشاری نوع سوم تحت فرکانس های مختلف ۹۳
- شکل ۴-۱۶ تاثیر فرکانس بر استهلاک ذاتی موج فشاری نوع سوم برای درجه اشباع های مختلف ۹۴
- شکل ۴-۱۷ تاثیر درجه اشباع بر استهلاک ذاتی موج برشی تحت فرکانس های مختلف ۹۵
- شکل ۴-۱۸ تاثیر فرکانس بر سرعت موج برشی برای درجه اشباع های مختلف ۹۶
- شکل ۴-۱۹ تاثیر درجه اشباع بر سرعت موج فشاری نوع اول منتشر شده در ماسه تحت فرکانس ۵۰۰Hz ۹۸
- شکل ۴-۲۰ تاثیر درجه اشباع بر سرعت موج فشاری نوع دوم منتشر شده در ماسه تحت فرکانس ۵۰۰Hz ۹۹

فهرست جداول

جدول ۱-۲ روابطی برای محاسبه پارامتر انحنا.....	۱۹
جدول ۲-۲ خصوصیات ماسه سنگ و ماسه.....	۲۴
جدول ۳-۲ خصوصیات آب	۲۵
جدول ۱-۳ خصوصیات گاز و نفت	۶۰
جدول ۱-۴ خصوصیات هوا	۸۰
جدول ۲-۴ مقادیر پارامترهای لازم برای توصیف محیط غیراشباع.....	۸۰
جدول ۳-۴ خصوصیات ماسه [۸۵].....	۹۷
جدول ۴-۴ خصوصیات سیال‌های آب و هوا [۸۵].....	۹۷

فهرست علائم

Q^{-1} = استهلاک ذاتی موج	ρ_f = چگالی سیال
c = سرعت موج	ρ_s = چگالی دانه‌های جامد
H = مدول مختلط موج	ϕ = تخلخل
ν = مکش	K_m = مدول بالک اسکلت
ν_r = مکش پسماند	K_f = مدول بالک سیال
S_f = درجه اشباع سیال	K_s = مدول بالک دانه‌های جامد
S_r = درجه اشباع پسماند	μ_m = مدول برشی اسکلت
S_e = درجه اشباع موثر	ν_s = نسبت پواسون دانه‌های جامد
k_e = نفوذپذیری موثر	η = ویسکوزیته دینامیکی سیال
k_r = نفوذپذیری نسبی	k_0 = نفوذپذیری ذاتی
λ = نشانه توزیع اندازه حفرات	k_f = نفوذپذیری هیدرولیکی
	τ = پارامتر انحنا
	g = شتاب جاذبه
	n = تعداد تماس بین دانه‌ها
	σ_{ij} = تنش بین دانه‌ای
	p = فشار سیال
	σ_{tot} = تنش کل
	w = سرعت متوسط ذرات سیال
	v = سرعت متوسط ذرات جامد
	u_s = بردار جابجایی فاز جامد
	u_f = بردار جابجایی فاز سیال
	ω = فرکانس

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱- مقدمه

درک فیزیک انتشار موج در محیط‌های متخلخل مانند سنگ و خاک از اهمیت ویژه‌ای در بسیاری از شاخه‌های علم برخوردار است. شناسایی لایه‌های نفت و گاز با استفاده از امواج لرزه‌ای، حفرگمانه و چاه‌نگاری^۱ توسط امواج لرزه‌ای بمنظور کسب اطلاعات در مورد نفوذپذیری و تخلخل، شناسایی‌های گوناگون تحت الارضی جهت پی بردن به خصوصیات فیزیکی سنگ و خاک، اکتشاف مخازن زیرزمینی، شناسایی ساختار بستر اقیانوس‌ها، مدل‌سازی لرزه‌ای، تحلیل دامنه امواج زلزله‌ها، از دست رفتن مقاومت خاک اشباع در بارگذاری‌های متناوب و پدیده روانگرایی و طراحی مواد جاذب و منعکس‌کننده امواج صوتی در صنایع مختلف از جمله نمونه‌های فراوان کاربرد انتشار امواج در شاخه‌های مختلف علوم است. از ابهامات مطرح در انتشار امواج در محیط متخلخل، برقراری ارتباط صحیح بین ویژگی‌های لرزه‌ای امواج نظیر سرعت و استهلاک با خصوصیات اسکلت محیط متخلخل و سیال‌های اشباع‌کننده حفرات است. خصوصیات سیال حفره‌ای و ناهمگنی در الگوی اشباع شدگی حفرات توسط سیال‌های موجود در محیط متخلخل از جمله مواردی است که بر ابهامات می‌افزاید که در تحقیق حاضر به آن پرداخته می‌شود.

۱-۲- ادبیات موضوع

از جمله مهمترین ویژگی‌های انتشار امواج لرزه‌ای در محیط متخلخل سرعت و استهلاک آن می‌باشد. زیرا با استفاده از آنها می‌توان اطلاعات بسیار مفیدی راجع به خصوصیات مواد متخلخل تشکیل دهنده زمین و سیال موجود در حفرات آن بدست آورد. سرعت موج بیشتر اطلاعاتی که راجب زیر سطح زمین موجود است را فراهم کرده است [۱] اما استهلاک موج مورد کاربرد کمتری قرار گرفته است که دلایل آن علاوه بر مشکل بودن بدست آوردن استهلاک امواج بصورت عملی، عمدتاً بدلیل دشواری در تفسیر نتایج با توجه به خصوصیات ماده متخلخل مورد نظر مانند سنگ یا خاک است. به همین سبب درک

^۱ Well logging

رفتار فیزیکی انتشار موج از اهمیت بالایی برخوردار است و از موضوعات چالش‌انگیز برای محققان است.

منظور از استهلاک از دست رفتن انرژی موج در امتداد انتشار آن می‌باشد. استهلاک موج می‌تواند شامل مواردی از جمله پراکش موج^۱، استهلاک هندسی^۲ و تبدیل انرژی موج به گرما باشد. آخرین مورد نامبرده شده که به آن استهلاک ذاتی^۳ نیز اطلاق می‌شود در متن پیشرو بررسی خواهد شد. استهلاک ذاتی موج ناشی از اصطکاک بین دانه‌های جامد و اتلاف ناشی از حرکت نسبی میان فازهای جریان سیال موجود در حفرات و قسمت جامد محیط متخلخل است. وجود سیال حفره‌ای و حرکت نسبی آن با ذرات جامد قسمتی از انرژی موج را اتلاف می‌کند و سبب استهلاک وابسته به فرکانس انرژی موج می‌شود.

می‌توان نشان داد که استهلاک ذاتی موج در محیط متخلخل ناشی از سیال حفره‌ای در سه نوع مقیاس فضایی متفاوت رخ می‌دهد. اولین نوع استهلاک ذاتی در مقیاسی بزرگتر از طول موج اتفاق می‌افتد که این اندازه از مقیاس با نام ماکروسکوپی^۴ شناخته می‌شود. این نوع از استهلاک ذاتی را استهلاک بایوت نیز می‌نامند. برای اولین بار بایوت در طی چند سری مقاله [۲]، [۳]، [۴] و [۵] یک قالب کلی بمنظور بررسی انتشار موج در محیط متخلخل اشباع را فراهم کرد. وی با استفاده از دیدگاه لاگرانژی و قانون کار حداقل همیلتون^۵ معادلاتی را بدست آورد که حل آن حکایت از وجود دو نوع موج فشاری و یک موج برشی می‌داد که سرعت و استهلاک همگی وابسته به فرکانس هستند. امواج فشاری به دو نوع موج مستقل از هم شامل موج فشاری نوع اول و موج فشاری نوع دوم تقسیم‌بندی می‌شوند. در موج نوع اول اسکلت جامد و سیال هم فاز هستند ولی در موج نوع دوم اسکلت جامد با سیال در یک فاز نیست. برخلاف موج فشاری نوع اول، موج فشاری نوع دوم بشدت مستهلک می‌شود و در مقایسه با موج نوع اول سرعت انتشار کمتری دارد. در نتیجه موج نوع دوم بسرعت با فاصله گرفتن از منبع لرزه از بین می‌رود و تنها با موج نوع اول می‌توان مطالعات لرزه‌ای را به آسانی انجام داد اما لازم به ذکر است که وجود موج نوع دوم بر انعکاس و جذب در سطح مشترک لایه‌ها با دو سیال مختلف تاثیرگذار است. بایوت تئوری خود را به دو قسمت مشتمل بر محدوده فرکانس پایین^۶ و محدوده فرکانس بالا^۱ تقسیم کرد. در محدوده

¹ Wave Scattering

² Geometrical Attenuation

³ Intrinsic attenuation

⁴ Macroscopic

⁵ Hamiltonian Principle of Least Action

⁶ Low frequency range

فرکانس پایین، حرکت نسبی سیال در حفرات از نوع پوآزی^۲ است و ضریب موجود در قانون داریسی ثابت است اما در محدوده فرکانس بالا این ضریب وابسته به فرکانس می‌باشد و پارامتر انحنای محیط^۳ دارای اهمیت زیادی می‌گردد. مجموع کارهای انجام شده توسط بایوت زیربنا و اساس بسیاری از مقالات و کتب علمی در طول سالیان متمادی می‌باشد. گیتسما و اسمیت [۶] به بررسی و تحلیل انتشار امواج فشاری در محیط متخلخل اشباع در محدوده فرکانس پایین بدست آمده از تئوری بایوت پرداختند. هدف آنها بررسی کاربرد این تئوری در تحقیقات ژئوفیزیکی بود. آنان ثوابت تغییر شکل سیستم برحسب تخلخل و فشردگی را بدست آوردند و روابط تقریبی نسبتاً ساده و مناسبی را برای محاسبه کردن سرعت امواج فشاری نوع اول و نوع دوم ارائه دادند. دی جوسلین دی جونگ [۷] نیز با انجام مطالعات مستقلى به بررسی انتشار موج در محیط متخلخل پرداخت. مطالعات او محدود به یک بعد بود. اسکلت جامد و سیال توسط او بصورت الاستیک خطی در نظر گرفته شدند. وی دو معادله تعادل مومنتوم، یکی برای اسکلت و دیگری برای سیال بدست آورد. مطالعات وی نیز حاکی از آن بود که در محیط متخلخل اشباع دو نوع موج فشاری وجود دارد. جواب هارمونیک بدست آمده در محدوده فرکانس پایین و برای مقادیر عرف در ماسه مرطوب بود. یو و جوگی [۸] با استفاده از تئوری بایوت به مطالعه حرکت امواج درون سنگ اشباع از سیال پرداختند. هدف مطالعه آنها بررسی نتایج تجربی انتشار موج در سنگ اشباع و مقایسه آن با نتایج پیش‌بینی شده توسط تئوری بایوت بود. پلونا [۹] نیز اولین کسی بود که در سال ۱۹۸۰ توانست موج فشاری نوع دوم را بصورت عملی در آزمایشگاه و با استفاده از امواج فراصوتی مشاهده کند. موج فشاری نوع دوم در طبیعت و تحت شرایط اتمسفریک برای اولین بار در سال ۱۹۹۷ و در ماسه سنگ مشاهده شد [۱۰]. بری من [۱۱] توانست تاثیر نواحی با نفوذپذیری کم و زیاد را بروی استهلاک امواج فشاری ببیند. ویلکنز و همکاران [۱۲] به صورت تجربی سرعت موج فشاری نوع اول بایوت را در بیست ماسه سنگ دارای رس تحت فشار هم‌جانبه حداکثر ۵۰ مگاپاسکال بدست آوردند. بمنظور صحت‌سنجی، با استفاده از روش‌های ریاضی گوناگونی همچون روش میانگین‌گیری حجمی^۴ [۱۳] و روش همگن‌سازی^۵ [۱۴] نیز معادلات بایوت دوباره بدست آورده شد. آلبرس [۱۵] به بررسی سرعت و استهلاک امواج سطحی در محیط الاستیک متخلخل اشباع با استفاده از تئوری مدل مخلوط ساده پرداخت. نتایج بدست آمده از

¹ High frequency range

² Poiseuille flow

³ Tortuosity

⁴ Volume averaging method

⁵ Homogenization technique

مدل مخلوط ساده^۱ با تئوری بایوت مقایسه گردید و نشان داده شد که مدل مخلوط ساده، در اصل ساده سازی مدل بایوت است که استفاده از آن به مراتب ساده تر است.

بررسی سرعت و استهلاك موج در محیط متخلخل اشباع از دو سیال (بعنوان مثال آب و هوا) بعلت پیچیدگی و ناهمگنی ایجاد شده توسط سیالها مورد بررسی بسیار کمتری قرار گرفته است. معمولاً هنگامی که محیط متخلخل دارای شرایطی نزدیک به اشباع از یک سیال باشد، با یک فرض ساده کننده سیال دوم را همانند یک حباب محبوس شده در سیال اول در نظر می گیرند. در نتیجه می توان همچنان از تئوری بایوت استفاده کرد اما به شرطی که مدول بالک برای سیال حاوی حباب بدرستی محاسبه و اعمال شود. برای آگاهی بیشتر می توان به مراجع [۱۶] و [۱۷] رجوع کرد. مطالعه انتشار موج در محیط متخلخل اشباع از دو سیال مخلوط نشدنی تنها در سالهای اخیر مورد توجه محسوسی قرار گرفته است. در کل ذکر این نکته ضروری است که به علت ناهمگنی بوجود آمده ناشی از وجود دو سیال در محیط متخلخل غیراشباع، استهلاك و سرعت امواج بشدت تحت تاثیر درجه اشباع سیالها خواهد بود. براتسارت [۱۸] اولین کسی بود که توانست با استفاده از معادلات لاگرانژی به مطالعه انتشار موج در محیط متخلخل اشباع از دو سیال ویسکوز، تراکم پذیر و مخلوط نشدنی^۲ بپردازد. اما وی کوپل اینرسی بوجود آمده بعلت شتاب نسبی فازهای سیال و جامد را در معادلات خود در نظر نگرفت. برای اولین بار در سال ۱۹۸۸ بری من و همکاران [۱۹] توانستند تاثیر کوپل اینرسی ذکر شده را در معادلات لحاظ کنند. با این وجود آنها تفاوت فشار بین دو سیال را ثابت فرض کردند و در نتیجه از تاثیر تغییرات فشار کاپیلاری^۳ صرف نظر شد. در نتیجه این مدل همانند تئوری محیط متخلخل بایوت تنها دو نوع موج فشاری را پیش بینی می کند. سانتوس و همکاران [۲۰]، [۲۱] و [۲۲] برای اولین بار موفق شدند که علاوه بر تاثیر کوپل اینرسی، تغییرات فشار کاپیلاری را نیز در معادلات در نظر بگیرند که این امر باعث می شود سه نوع موج فشاری تولید شود که موج نوع سوم به علت نوسانات^۴ فشار کاپیلاری پدید می آید. لازم به ذکر است که موج فشاری نوع سوم از سرعت بسیار کمی برخوردار است و دارای استهلاك بسیار بالایی است. با استفاده از مدل مخلوط ساده نیز مطالعاتی با نتایج مشابه با آنچه بیان شد، حاصل شده است که برای اطلاع بیشتر

¹ Simple mixture model

² Immiscible

³ Capillary pressure

⁴ Fluctuations

می‌توان به [۲۳] مراجعه کرد. در تمامی مطالعات ذکر شده، اثر پارامتر انحنای^۱ حفرات لحاظ نشده است که سبب می‌شود در فرکانس‌های لرزه‌ای بالای جواب‌های مناسب حاصل نشود و مطالعات بروی استهلاك و سرعت امواج محدود به فرکانس‌های پایین گردد.

دومین نوع استهلاك در مقیاسی کوچکتر از دانه‌ها که مقیاس میکروسکوپی^۲ نیز نام دارد، رخ می‌دهد. مکانیزم استهلاك در این حالت با نام جریان محلی^۳ سیال یا جریان جهشی^۴ شناخته می‌شود که توسط دانشمندان مختلفی به آن پرداخته شده است [۲۴]، [۲۵] و [۲۶]. هنگامی که فشار سیال حفره‌ای بدلیل عبور موج افزایش می‌یابد، یک تعادل فشار بین حفرات و ترک‌های میکروسکوپی موجود بروی دانه‌ها رخ می‌دهد. در این نوع مکانیزم استهلاك، سیال موجود در ترک‌های میکروسکوپی دارای تغییرات فشار بیشتری از سیال موجود در حفرات خواهد شد. در نتیجه سیال به داخل و خارج این ترک‌ها رانده می‌شود و این نوع جریان سبب از دست رفتن انرژی موج و در نهایت استهلاك آن می‌شود. عکس برداری‌های میکروتوموگرافی^۵ نیز در سال‌های اخیر جهت تعیین هندسه این نوع ناهمگنی‌ها و در نتیجه بهبود مدل‌سازی جریان سیال صورت گرفته است [۲۷].

سومین نوع استهلاك در مقیاسی بزرگتر از دانه‌ها اما کوچکتر از اندازه طول موج اتفاق می‌افتد که به آن مقیاس مزوسکوپی^۶ نیز اطلاق می‌گردد. در چنین مقیاسی ناهمگنی‌ها هم در اسکلت محیط متخلخل و هم در سیال حفره‌ای ممکن است وجود داشته باشد. ناهمگنی در اسکلت از قبیل سنگ رسی بین لایه‌ای یا مناطقی شامل دانه‌هایی با سمانتاسیون ضعیف رامی‌توان با استفاده از تئوری‌های تخلخل دوگانه مطالعه کرد [۲۸]، [۲۹] و [۳۰]. ناهمگنی در سیال مانند لنزها یا پاکت‌های گازی می‌باشد که از دانه‌ها بزرگتر است و درون سیال میزبان دیگری گرفتار شده است. تکه‌های غیریکنواخت اشباع‌شدگی ممکن است در تماس‌های بین گاز-نفت یا گاز-آب درون مخازن هیدروکربن رخ دهد. این تغییرات می‌تواند به این صورت باشد که بعنوان مثال یک سیال توسط سیال دیگری احاطه شده باشد و یا یک لنز از سیال بصورت لایه‌های متناوب درون سیال دیگری وجود داشته باشد. این نوع الگوی اشباع‌شدگی را اشباع

¹ Tortosity

² Microscopic

³ Local flow

⁴ Squirt flow

⁵ Microtomographic

⁶ Mesoscopic

تکه‌ای^۱ می‌نامند. در این حالت استهلاک و سرعت موج تحت تاثیر وجود سیالی قرار می‌گیرد که سبب بوجود آمدن الگوی اشباع‌شدگی تکه‌ای است. مقدار سرعت و استهلاک وابسته به اندازه گاز یا هر سیال میزبان دیگری خواهد بود.

برای اولین بار وایت [۳۱] با ارائه مدلی در محدوده فرکانس‌های پایین (برقراری جریان آرام درون حفرات) به بررسی تاثیر اشباع‌شدگی تکه‌ای بر انتشار امواج درون محیط متخلخل پرداخت. این مدل در سال‌های بعد مورد توجه و مطالعه بیشتری از سوی محققان مانند [۳۲]، [۳۳] و [۳۴] قرار گرفت. بعنوان مثال، گی و همکاران [۳۵] سرعت و استهلاک موج را در رسوبات شامل گاز-هیدرات با استفاده از تئوری وایت بدست آوردند. براجانوسکی و همکاران [۳۶] با استفاده از مفاهیم تئوری وایت به بررسی وجود تاثیر شکاف‌های موازی و نازک که بصورت لایه‌ای در سنگ اتفاق می‌افتد، پرداختند. وگلار و اسمولدرز [۳۷] نیز توانستند برای اولین بار تئوری وایت را به حالتی بسط دهند که برای تمامی فرکانس‌های لرزه‌ای اعمالی معتبر باشد. لازم به ذکر است که آنها نشان دادند امکان رخ دادن پدیده تشدید در چنین سیستمی در فرکانس‌های بالا وجود دارد.

۱-۳- اهداف تحقیق

هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی تاثیر ناهمگنی سیال بر خصوصیات انتشار امواج در محیط متخلخل است. در ابتدا بدون محدودیت در مقدار فرکانس اعمالی به بررسی تغییرات سرعت و استهلاک ذاتی امواج منتشر شده در محیط متخلخل اشباع و محیط متخلخل با الگوی اشباع تکه‌ای خواهیم پرداخت. در نهایت نیز با استفاده از روابط تنش-کرنش در محیط متخلخل اشباع از دو سیال، معادلات انتشار موجی را بدست می‌آوریم که برای تمامی فرکانس‌ها معتبر باشند. حل این معادلات امکان مطالعه خصوصیات سرعت و استهلاک ذاتی امواج فشاری نوع اول، نوع دوم و نوع سوم و امواج برشی را که در محیط اشباع از دو سیال منتشر می‌شود را خواهد داد.

¹ Patchy saturation

۱-۴- ضرورت تحقیق

بر خلاف زلزله‌ها و کارهای معمول عمرانی، بسیاری از آزمایش‌های ژئوفیزیک انجام شده بمنظور بدست آوردن اطلاعات در مورد خصوصیات محیط متخلخل دارای فرکانس اعمالی بسیار بالایی است. همچنین وجود ناهمگنی در سیال‌های اشباع‌کننده محیط متخلخل موجود در طبیعت بر پیچیدگی تفسیر نتایج لرزه‌ای و آزمایش‌های ژئوفیزیک می‌افزاید. بهره بردن از روابطی که همزمان برای تمامی فرکانس‌ها معتبر باشد و بتواند تاثیر ناهمگنی‌های بوجود آمده ناشی از سیال را لحاظ کند به درک مکانیزم انتشار امواج و تفسیر نتایج آزمایش‌ها کمک شایانی خواهد کرد که در تحقیق پیشرو به آن پرداخته خواهد شد.

۱-۵- سؤالات تحقیق

در راستای هدف اصلی پژوهش حاضر به سؤالات زیر پاسخ داده خواهد شد:

- ۱- چگونه سرعت و استهلاک ذاتی امواج فشاری و برشی در محیط متخلخل به فرکانس وابسته است؟ آیا الگوهای گوناگون اشباع‌شدگی محیط متخلخل بر این وابستگی تاثیرگذار هستند؟ آیا چگونگی وابستگی امواج به فرکانس در سنگ و خاک از هم متفاوت است؟
۲. آیا وابستگی سرعت و استهلاک ذاتی به فرکانس در محدوده فرکانس‌های بالا (حاکم بودن اثرات اینرسی) و محدوده پایین (حاکم بودن اثرات ویسکوز) از یکدیگر متفاوت است؟ اثرات ناهمگنی سیال در هر کدام از این محدوده‌ها چگونه است؟
۳. چگونه رفتار امواج فشاری نوع اول، نوع دوم و نوع سوم که در محیط متخلخل اشباع از دو سیال تولید می‌شود از یکدیگر تمیز داده می‌شوند؟
۴. چگونه کاهش یا افزایش درجه اشباع می‌تواند بر سرعت و استهلاک ذاتی امواج فشاری و برشی تاثیر بگذارد؟ این تاثیر در محدوده فرکانس‌های بالا و پایین چگونه است؟ آیا تاثیر درجه اشباع بر سرعت امواج برشی به اندازه تاثیر آن بر امواج فشاری است؟

۱-۶- ساختار تحقیق

در فصل دوم با استفاده از روابط بازنویسی شده تنش- کرنش بایوت [۳۸] و همچنین با بکار بردن معادلات مومنتوم فازهای جامد و سیال [۳۹] بنحوی که معادلات بصورت همزمان برای محدوده فرکانس بالا و فرکانس پایین برقرار باشد، معادلات انتشار امواج فشاری و برشی در محیط متخلخل اشباع را بدست می‌آوریم. این نوع رویکرد بر مطالعاتی که تنها به محدوده فرکانس‌های پایین یا تنها به محدوده فرکانس‌های بالا محدود هستند، ارجحیت دارد. با حل این معادلات به مقایسه رفتار وابسته به فرکانس سرعت و استهلاک ذاتی امواج فشاری نوع اول، فشاری نوع دوم و امواج برشی برای دو نمونه ماسه سنگ و ماسه خواهیم پرداخت. سپس به بررسی تاثیر نفوذپذیری ذاتی محیط متخلخل بروی سرعت و استهلاک ذاتی امواج فشاری و برشی خواهیم پرداخت. در انتهای فصل دوم نیز با استفاده از تئوری محیط موثر به مطالعه تاثیر تماس اصطکاکی بین دانه‌ای بروی مدول‌های الاستیک محیط متخلخل و در نهایت تاثیر آن بروی سرعت و استهلاک ذاتی امواج پرداخته می‌شود. در فصل سوم با رویکردی یکسان با تئوری وایت که برای اولین بار توسط وگلار و اسمولدرز [۳۷] به حالت تمام فرکانس بسط داده شد و با توجه به معادلات ارائه شده در فصل دوم، روابطی برای محاسبه تاثیر اشباع تکه‌ای بر سرعت و استهلاک امواج فشاری بدست می‌آوریم. سپس با استفاده از روابط حاصل شده به بررسی تغییرات سرعت و استهلاک ذاتی امواج فشاری ناشی از تکه سیال میهمان که بصورت لایه‌ای درون سیال دیگری قرار گرفته پرداخته می‌شود. از جمله بررسی‌ها تاثیر اندازه و نوع سیال میهمان بروی سرعت و استهلاک امواج فشاری است. در نهایت در فصل چهارم با استفاده از روابط تنش- کرنش بدست آمده توسط کنته و همکاران [۴۰]، معادلات انتشار امواج در محیط متخلخل ۳ بعدی اشباع از دو سیال متفاوت در حالتی که معادلات برای تمامی فرکانس‌های اعمالی معتبر باشد بسط خواهیم داد. سپس با حل معادلات انتشار امواج، روابط پراکنش امواج فشاری نوع اول، نوع دوم، نوع سوم و امواج برشی را بدست می‌آوریم. با استفاده از روابط پراکنش می‌توان سرعت و استهلاک ذاتی امواج فشاری و برشی در محیط متخلخل اشباع از دو سیال را بدست آورد. با استفاده از روابط بدست آمده به بررسی تاثیر درجه اشباع و فرکانس بروی سرعت و استهلاک ذاتی امواج فشاری نوع اول، نوع دوم، نوع سوم و امواج برشی پرداخته می‌شود.

۱-۷- روش تحقیق

تمامی معادلات بدست آمده یا ارائه شده در تحقیق حاضر بصورت کاملاً تحلیلی حل گردیده‌اند. ابتدا با استفاده از معادلات تنش-کرنش در محیط متخلخل اشباع و معادلات مومنتوم برای فازهای سیال و جامد، معادلات توأم انتشار امواج را در محیط ۳ بعدی اشباع بدست می‌آوریم. سپس بردارهای جابه‌جایی فازهای جامد و سیال را تجزیه کرده و آنها را بر حسب پتانسیل موج فشاری و پتانسیل موج برشی می‌نویسیم. حال با اعمال تبدیل انتگرالی فوریه معادلات را به فضای عدد موج-فرکانس منتقل می‌کنیم تا در نهایت روابط پراکنش برای امواج فشاری و برشی بدست آید که سرعت و استهلاک امواج فشاری و برشی با توجه به آن قابل استخراج است. برای بدست آوردن سرعت و استهلاک ذاتی در حالت اشباع تکه‌ای با توجه به روابط بدست آمده برای حالت محیط اشباع، تعریف هندسه مدل با الگوی اشباع تکه‌ای با لایه‌های متناوب و اعمال شرایط مرزی لازم روابطی برای محاسبه سرعت و استهلاک ذاتی محاسبه می‌شود. در نهایت با استفاده از روابط تنش-کرنش در محیط اشباع از دو سیال متفاوت و همچنین معادلات مومنتوم فازهای سیال و جامد، معادلات انتشار امواج در محیط اشباع از دو سیال را بدست می‌آوریم. نحوه بدست آوردن سرعت و استهلاک امواج مشابه با حالت اشباع است اما با این تفاوت که ابتدا لازم است بردارهای جابه‌جایی فازهای جامد، سیال اول و سیال دوم تفکیک شوند.

فصل دوم

بررسی انتشار موج در محیط متخلخل اشباع

۲-۱- مقدمه

در این فصل با استفاده از روابط تنش-کرنش ارائه شده توسط کارسیونه [۳۸] که مشابه معادلات تنش-کرنش بایوت [۲]، [۳] و [۵] می‌باشند و همچنین با استفاده از معادلات مومنوم ارائه شده توسط اسمولدرز [۳۹] که بطور همزمان برای جریان داری و حرکت سیال در حال نوسان معتبر است، معادلات توأم انتشارا موج در محیط متخلخل ۳ بعدی را بدست می‌آوریم. سپس با استفاده از روش تجزیه هلمهولتز^۱ بردار جابه‌جایی سیال و بردار جابه‌جایی جامد را از هم تفکیک کرده و با تبدیل روابط بدست آمده به فضای فرکانس-عدد موج، روابطی بمنظور محاسبه سرعت و استهلاک ذاتی امواج فشاری و برشی ارائه می‌شود.

با استفاده از روابط بدست آمده به بررسی تاثیر فرکانس بروی سرعت و استهلاک ذاتی موج فشاری نوع اول (جابه‌جایی‌ها هم‌فاز)، موج فشاری نوع دوم (جابه‌جایی‌ها غیرهم‌فاز) و موج برشی در دو نمونه متفاوت متخلخل یعنی ماسه سنگ و ماسه پرداخته می‌شود. در ادامه به بررسی تاثیر نفوذپذیری ذاتی محیط متخلخل بروی انتشار امواج اشاره شده می‌پردازیم و یک نتیجه بسیار جالب نتیجه می‌شود که بیان می‌کند با وجود آنکه سرعت و استهلاک ذاتی امواج به نفوذپذیری امواج وابسته است اما مقدار حداکثر این خصوصیات مستقل از نفوذپذیری ذاتی محیط متخلخل است. در نهایت نیز تاثیر چگونی تماس بین دانه‌ها بروی سرعت و استهلاک امواج را با استفاده از مدل توسعه یافته والتون [۴۱] و [۴۲] بدست می‌آوریم. این مدل قادر است که مدول‌های الاستیک محیط متخلخل را به خصوصیات میکروسکوپی محیط متخلخل از جمله مدول بالک دانه‌ها، مدول برشی دانه‌ها و تعداد تماس بین دانه‌ها مرتبط سازد.

۲-۲- تعاریف

در ابتدا به تعریف تبدیل انتگرالی مورد استفاده در متن پیشرو می‌پردازیم. برای انجام تحلیل در بعد فرکانس از تعریف تبدیل فوریه زیر روی زمان t استفاده می‌شود:

$$\tilde{u}(x, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, t) \exp(-i\omega t) dt \quad (۱-۲)$$

^۱ Helmholtz decomposition