



تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

رساله برای دریافت درجه دکتری در رشته

مهندسی عمران-مکانیک خاک و پی

مدلسازی هیدرولیکی-حرارتی مخازن نفت سیاه تغییر شکل پذیر

اساتید راهنما

دکتر سید امیرالدین صدرنژاد

دکتر حسن قاسم‌زاده

مشاور صنعتی

دکتر غلامحسین منتظری

نگارش

سید علی قریشیان امیری

شهریور ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

فهرست مطالب

فصل اول: معرفی تحقیق و هدف از انجام آن	۲
۱-۱- طرح مسئله و اهمیت مطالعه	۳
۱-۲- اهداف مطالعه	۶
۱-۳- روش تحقیق	۶
۱-۴- نوآوریهای تحقیق	۷
۱-۵- ساختار رساله	۹
فصل دوم: مروری بر ادبیات موضوع	۱۱
۲-۱- نظریه‌های محیط متخلخل	۱۲
۲-۲- حل عددی معادلات جریان	۱۸
۲-۲-۱- حل عددی معادلات جریان	۱۸
۲-۲-۲- حل توامان معادلات جریان، انتقال حرارت و ژئومکانیک	۲۱
فصل سوم: استخراج معادلات حاکم	۲۵
۳-۱- مقدمه	۲۶
۳-۲- فرضیات پایه و سینماتیک	۲۷
۳-۳- معادلات توازن	۳۰
۳-۳-۱- توازن جرم	۳۱
۳-۳-۲- توازن مومنتوم خطی	۳۴
۳-۳-۳- توازن مومنتوم زاویه‌ای	۳۵
۳-۳-۴- توازن انرژی	۳۵
۳-۳-۵- قانون دوم ترمودینامیک	۴۱
۳-۴- معادلات ساختاری	۴۱
۳-۴-۱- روابط تنش-کرنش	۴۲

۴۵	 تغییرات تخلخل	۳-۴-۲
۴۶	 تغییرات دانسیته	۳-۴-۳
۴۷	 روابط نسبت حجمی و فشار کاپیلاری	۳-۴-۴
۴۸	 نرخ تبادل جرم	۳-۴-۵
۴۹	 نرخ انتقال مومنتوم	۳-۴-۶
۵۰	 جمع بندی معادلات	۳-۵
۵۱	 توازن مومنتوم	۳-۵-۱
۵۲	 توازن جرم	۳-۵-۲
۵۳	 توازن انرژی	۳-۵-۳
۵۳	 خلاصه فصل	۳-۶
۵۵	فصل چهارم: حل عددی معادلات	
۵۶	 مقدمه	۴-۱
۵۷	 معادلات حاکم	۴-۲
۶۰	 شرایط مرزی و شرایط اولیه	۴-۳
۶۱	 حل عددی در پهنه مکان	۴-۴
۶۲	 حل عددی معادلات توازن مومنتوم	۴-۴-۱
۶۷	 حل عددی معادلات توازن جرم	۴-۴-۲
۷۵	 حل عددی معادله توازن انرژی	۴-۴-۳
۷۶	 دستگاه معادلات حاصل از حل عددی در پهنه مکان	۴-۴-۴
۷۷	 حل عددی در پهنه زمان	۴-۵
۷۸	 خطی سازی معادلات	۴-۶
۷۹	 خلاصه فصل	۴-۷
۸۱	فصل پنجم: صحت سنجی و ارائه نتایج	
۸۲	 مقدمه	۵-۱

۵-۲- تزریق آب در حالت یک بعدی	۸۲
۵-۳- تزریق آب در حالت سه بعدی	۸۶
۵-۴- تزریق گاز	۸۸
۵-۵- حرکت شعاعی	۹۶
۵-۶- حرکت آب در محیط ناهمگن	۹۸
۵-۷- حرکت سیال از میان دو دیواره نفوذناپذیر	۹۹
۵-۸- تزریق آب با الگوی پنج نقطه‌ای و منطقه مرکزی ناهمگن	۱۰۰
۵-۹- تحکیم ستون خاک اشباع	۱۰۴
۵-۱۰- تحکیم ستون خاک دو فازه	۱۰۶
۵-۱۱- همرفت طبیعی در محیط متخلخل	۱۰۸
۵-۱۲- تزریق آب داغ	۱۰۹
۵-۱۳- مسئله مندل غیر هم دما	۱۱۲
۵-۱۴- تحکیم غیر هم دمای ستون خاک دو فازه	۱۱۷
۵-۱۵- عملکرد مدل در هندسه نامنظم	۱۲۰
۵-۱۶- بررسی تاثیر تزریق حرارتی	۱۲۵
۵-۱۷- بررسی تاثیر شرایط مرزی مکانیکی	۱۲۹
۵-۱۸- خلاصه فصل	۱۳۴
فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات	۱۳۶
۶-۱- جمع بندی	۱۳۷
۶-۲- نتایج حاصله	۱۳۸
۶-۳- پیشنهادات جهت ادامه تحقیق	۱۴۰
فهرست منابع و مراجع	۱۴۲
پیوست الف- خواص سیالات	۱۵۳
پیوست ب- فشار کاپیلاری و نفوذپذیری نسبی	۱۵۹

پیوست ج- جزئیات حل عددی ۱۶۰

پیوست د- دستگاه معادلات کل ۱۷۰

علائم و اختصارات

A	انرژی آزاد هلم هولتز
B_o	ضریب تشکیل حجمی فاز نفت
b_α	چشمه و چاهک آنتروپی
C	ظرفیت گرمائی ویژه
D	ماتریس نرخ تغییر شکل
D_T	ماتریس رفتار فاز جامد
E_α	انرژی داخلی ویژه فاز α
$\dot{m}_{og}$	نرخ تبادل جرم بین دو فاز α و β
g	بردار شتاب گرانش
H	آنتالپی ویژه
h	چشمه و چاهک انرژی
I	ماتریس واحد
K	ماتریس معرف نفوذپذیری ذاتی
$k_{r\alpha}$	نفوذپذیری نسبی فاز α
L	تانسور چرخش
$\dot{M}_\alpha$	چشمه و چاهک جرم فاز α
N	بردار توابع شکل
n	بردار عمود بر سطح
n	تخلخل
n_α	نسبت حجمی فاز α
p_α	فشار فاز α
$\hat{p}_\alpha$	بردار فشارهای گره‌ای فاز α

$p_{\alpha\beta}$	فشار کاپیلاری بین دو فاز α و β
$Q_{\alpha\beta}^{\alpha}$	نرخ انتقال انرژی بین دو فاز α و β
q_{α}	بردار شار حرارتی
$\bar{q}_{\alpha}$	بردار شار جرمی
R_{so}	نسبت مخلوط نفت و گاز
S_{α}	درجه اشباع فاز α
$S_{e\alpha}$	درجه اشباع موثر فاز α
T	درجه حرارت
$\hat{T}$	بردار درجه حرارت‌های گره‌ای
$T_{\alpha\beta}^{\alpha}$	نرخ تبادل مومنتوم بین دو فاز مورد نظر α و β
t_{α}	ماتریس تنش فاز α
$\bar{t}$	بردار نیروهای سطحی
u	بردار تغییر شکل
v_{α}	سرعت فاز α
W	بردار ضرایب وزنه در روش کنترل حجم اجزاء محدود
W_u	بردار ضرایب وزنه در روش اجزاء محدود
w_{α}	سرعت فاز α نسبت به فاز جامد
x	مختصات در دیدگاه اوپلری
X	مختصات در دیدگاه لاگرانژی
β_m	ضریب انبساط گرمائی دانه‌های جامد (ماتریس خاک)
β_s	ضریب انبساط گرمائی اسکلت خاک
ε	ماتریس یا بردار کرنش
ε_0	ماتریس یا بردار کرنش حرارتی (قطری)
ε_0^v	کرنش حجمی حرارتی
σ	ماتریس یا بردار تنش کل

σ'	ماتریس یا بردار تنش موثر
η_α	آنتروپی ویژه
ρ_α	دانسیته فاز α
$\rho_{\alpha s}$	حجم فاز α در شرایط استاندارد
Φ	بردار شار آنتروپی
χ	تانسور قابلیت هدایت گرمایی
$\omega_{\alpha\beta}^\alpha$	نرخ انتقال آنتروپی بین دو فاز α و β
Λ	نرخ تولید آنتروپی
μ_α	لزجت فاز α

چکیده:

در تحقیق حاضر به مدل سازی هیدرولیکی-حرارتی مخازن هیدروکربنی تغییرشکل پذیر پرداخته شده است. تغییر شکل های مخزن که در اثر تغییرات فشار حفره ای و تغییرات تنش موثر منتج از آن اتفاق می افتد، میزان دبی تولید مخزن را تحت تأثیر قرار می دهد. از آنجا که این دو پدیده به صورت دوطرفه در اندرکنش با یکدیگر قرار دارند، لحاظ کردن تأثیر تغییرشکل ها بر تولید مخزن در برنامه های شبیه سازی مخزن نیازمند حل همزمان معادلات ژئومکانیک و جریان می باشد. از طرفی با توجه به توسعه روش های استخراج حرارتی، یک مدل جامع باید بتواند اثرات انتقال حرارت سیستم را هم شبیه سازی نماید. تغییر حرارت بر روی رفتار مکانیکی و همچنین هیدرولیکی مخزن بسیار اثر گذار است. بنابراین، سیستم مورد توجه در این تحقیق، شامل یک محیط متخلخل تغییرشکل پذیر غیر هم دما که توسط سه فاز سیال آب، نفت و گاز اشباع شده است، می باشد. معادلات حاکم بر سیستم مذکور شامل سه دسته معادلات توازن جرم، توازن مومنتوم و توازن انرژی است. این معادلات بر اساس تئوری مخلوط ها استخراج شده اند. حل عددی معادلات نیز بر پایه ترکیبی از روش اجزاء محدود و روش کنترل حجم اجزاء محدود بنا شده که ضمن تضمین بقاء جرم و انرژی در حالت کلی و محلی، تمام قابلیت های روش اجزاء محدود را در مدل سازی محیط های با هندسه نامنظم و ناهمگن دارا است. صحت عملکرد مدل مذکور با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود و نتایج عددی ارایه شده در مراجع معتبر بررسی شده و تطابق خوبی بدست آمده است. نکته مهم دیگری که در این تحقیق مورد دقت قرار گرفته است در نظر گرفتن آثار مکانیکی محیط اطراف مخزن بر میزان بازدهی مخزن می باشد. اثر مذکور در تحقیق حاضر با استفاده از تعریف سختی های معادل گره ای در مرزهای مخزن به مدل اعمال شده است.

فصل اول

معرفی تحقیق و هدف از انجام آن

۱-۱- طرح مسئله و اهمیت مطالعه

ارزیابی رفتار مکانیکی محیط‌های متخلخل (ژئومکانیک) در مهندسی مخزن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای مثال می‌توان به اهمیت تحلیل‌های ژئومکانیکی در طراحی سیستم‌های شکست هیدرولیکی، تحلیل پایداری چاه‌ها و تحلیل سیستم‌های استخراج در مخازن تغییرشکل‌پذیر اشاره کرد. در این‌گونه مخازن، تغییرشکل‌های به وقوع پیوسته در سنگ مخزن، به عنوان یک پدیده موثر در میزان تولید بشمار می‌آید. این تغییرشکل‌ها در اثر تغییرات فشار حفره‌ای و پیرو آن تغییر تنش موثر سنگ مخزن به وجود می‌آید.

به طور کلی استخراج نفت از یک مخزن در بلند مدت باعث کاهش فشار حفره‌ای در مخزن می‌شود. این کاهش فشار به نوبه خود، میزان تنش موثر موجود در لایه‌های مخزن را افزایش داده و باعث کاهش حجم مخزن می‌گردد. از سوی دیگر، در طول استخراج ثانویه که به کمک تزریق فشار حفره‌ای درون مخزن افزایش می‌یابد، شاهد کاهش تنش موثر و در نتیجه تورم مخزن خواهیم بود. این تغییرشکل‌ها با اثر گذاشتن بر میزان تخلخل و نفوذپذیری سنگ و همچنین ایجاد تغییر در فشار مخزن، می‌توانند بر میزان بازدهی مخزن تأثیر گذار باشند. باید متذکر شد که با توجه به عمق مخزن و لایه بندی‌های مختلف زمین، ممکن است تغییرشکل‌های مخزن در سطح زمین تأثیر چندانی نداشته باشد. اگرچه در مواردی (مانند میدان ویلمینگتن^۱) حتی ۹ متر نشست سطح زمین نیز گزارش شده است.

میدان هیدروکربنی زیادی در سراسر دنیا به علت عدم توجه به خصوصیات ژئومکانیکی آن‌ها در هنگام طراحی، در زمان بهره برداری با مشکلاتی مواجه شده‌اند. از جمله این موارد می‌توان به میدان ویلمینگتن، والهال^۲، اکوفیسک^۳، بلریج جنوبی^۴ و میدان آگاجاری اشاره کرد.

¹ Wilmington

² Valhall

³ Ekofisk

⁴ South Belridge

از میادین فوق، میدان آغاچاری در ایران واقع است. این میدان شامل سه مخزن مهم آسماری، بنگستان و خامی می‌باشد که مهم‌ترین آن‌ها آسماری است که در فرو افتادگی دزفول و در ۹۰ کیلومتری جنوب شرقی اهواز قرار دارد. سنگ شناسی کلی این مخزن، شامل سنگ آهک و دولومیت است و در بخش‌هایی از آن ماسه سنگ، مارل و شیل نیز دیده شده است. تخلخل اصلی در مخزن آسماری شامل تخلخل‌های بین دانه‌ای و شکاف‌های سنگ می‌باشد [۱]. البته در مناطق شامل ماسه سنگ، مخزن تقریباً بدون شکاف است. میزان نشست سطح زمین در این مخزن توسط فولادی مقدم [۲] بررسی و گزارش شده است. ایشان در این بررسی، در فاصله زمانی ۷ ماه میزان نشست حداکثر ۱۹ میلی متر را ثبت کرده‌اند و علت این نشست را افزایش میزان برداشت از مخزن گزارش نمودند.

در مهندسی نفت قبل از اینکه ضرورت و امکان مدل‌سازی توأمان معادلات جریان و ژئومکانیک شناسائی شود، مدل‌سازی عددی مخازن تغییرشکل‌پذیر، در دو مرحله مجزا انجام می‌شده است: (۱) مدل‌سازی جریان در سیستم مخزن و محاسبه تغییرات فشار؛ (۲) محاسبه تغییرشکل‌های زمین با استفاده از نتایج فشار. به عبارت دیگر در این نوع مدل‌سازی، میزان بازدهی مخزن بطور کاملاً مستقل از تغییرشکل‌ها و تنش‌های بوجود آمده در محیط بررسی می‌شده است. محاسبه تغییرشکل‌ها نیز تنها جهت ایمن‌سازی تاسیسات مستقر در سطح زمین در برابر نشست‌ها و تورم‌های احتمالی انجام می‌پذیرفته است. درحالی‌که تغییرشکل مخزن، تغییرات تخلخل و نفوذپذیری سنگ مخزن را به‌مراه داشته و بنابراین الگوی توزیع فشار سیالات مخزن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تغییر الگوی توزیع فشار مخزن نیز به نوبه خود، میزان تولید مخزن را تحت تاثیر قرار خواهد داد.

امروزه نیز در مهندسی مخزن معمولاً با تعریف یک ضریب تراکم‌پذیری برای محیط سنگی، از حل توأمان معادلات ژئومکانیک و جریان اجتناب می‌شود. این رویکرد اگرچه می‌تواند به صورت نسبی، پیش‌بینی مناسبی از میزان بازدهی مخزن ارائه نماید، اما از دقت کافی برخوردار نبوده و تأثیر شرایط مرزی بر رفتار مکانیکی مخزن، در این مدل‌ها به طور کلی نادیده گرفته می‌شود. در حالی‌که

یک شرایط مرزی غیر واقعی می‌تواند تغییر شکل‌های مخزن و پیرو آن توزیع تنش موثر و فشار سیالات را به صورت کاملاً دور از واقعیت مدل‌سازی نماید.

محققین بسیاری دقت مدل‌های غیر توأمان مرسوم در مهندسی مخازن را مورد تردید قرار داده‌اند (برای مثال مراجع [۳ الی ۵]). باید توجه کرد که عامل اصلی بوجود آمدن تغییر شکل در محیط‌های متخلخل، تغییر در تنش موثر می‌باشد در حالیکه در مدل‌های غیر توأمان چنین شاخصی اصلاً در نظر گرفته نمی‌شود. افزایش فشار حفره‌ای مخزن باعث کاهش تنش موثر و تورم مخزن می‌شود. تورم مخزن بر میزان تولید اثر منفی دارد، یعنی میزان تولید را کاهش می‌دهد. اما با گذشت زمان، فشار حفره‌ای مخزن مستهلک شده و به تنش موثر تبدیل می‌شود. افزایش تنش موثر باعث کاهش حجم مخزن می‌شود و کاهش حجم مخزن، به ازدیاد برداشت کمک خواهد نمود. مدل‌سازی این فرآیند دوگانه و پیچیده بدون حل توأمان معادلات ژئومکانیک و جریان، می‌تواند با خطای زیاد همراه باشد.

با توجه به دلایل فوق، در یک رویکرد جدید، محققین بر حل توأمان معادلات جریان و ژئومکانیک در مخازن تمرکز یافته‌اند [۴ الی ۱۴]. البته باید متذکر شد که اکثریت قریب به اتفاق این مدل‌ها نیز توجه چندانی به مدل‌سازی شرایط مرزی مکانیکی نداشته‌اند. روتنبرگ^۱ در سال ۱۹۹۴ [۱۵] با استفاده از مدل تحلیلی خود اهمیت مدل‌سازی محیط اطراف مخزن را در دقت جواب‌های مدل گوشزد نمود. اما مدل‌سازی همزمان یک مخزن با گستره بزرگی از محیط اطراف، با توجه به افزایش تعداد المان‌ها و تعداد درجات آزادی موجود در هر المان، حجم محاسبات و هزینه مدل‌سازی را به شدت افزایش می‌دهد. با این حال عده‌ای از محققین اقدام به این نوع مدل‌سازی نموده و اهمیت آن را نشان داده‌اند [۱۲؛ ۱۶؛ ۱۷].

از طرفی با توجه به پیشرفت روش‌های استخراج حرارتی و رواج یافتن این روش استخراج در مخازن نفتی، نیاز به تحلیل حرارتی مخازن نیز گریز ناپذیر می‌نماید. افزایش درجه حرارت مخزن

¹ Rothenburg

باعث کاهش گرانروی سیالات شده و استحصال آن‌ها را آسان‌تر می‌نماید. تغییر درجه حرارت مخزن با دو نوع عملکرد مهم باعث تغییر الگوی فشار حفره‌ای مخزن نیز می‌گردد. عملکرد اول از طریق تغییر در خواص سیالات مثل گرانروی و تغییر حجم، توزیع فشار را در محیط تحت تاثیر قرار می‌دهد. اما در عملکرد دوم تغییر شکل‌های حرارتی و تغییر حجم مخزن باعث باز توزیع فشار در محیط می‌گردند. عملکرد اول با حل معادلات جریان و انتقال حرارت در محیط قابل مدل‌سازی است. اما جهت مدل‌سازی عملکرد دوم لازم است تا معادلات ژئومکانیک نیز با معادلات فوق حل گردد.

با توجه به توصیفات فوق، تولید یک مدل عددی برای حل توأمان معادلات جریان، انتقال حرارت و ژئومکانیک، جهت تحلیل دقیق‌تر مخازن هیدروکربنی، در هدف کار این رساله قرار گرفت.

۲-۱- اهداف مطالعه

با توجه به اهمیت تأثیرات ژئومکانیکی زمین بر پیش‌بینی میزان تولید مخازن هیدروکربنی و توسعه روزافزون روش‌های استخراج حرارتی، هدف از انجام این مطالعه، ارائه یک الگوی عددی جهت شبیه‌سازی هیدرولیکی-حرارتی مخازن هیدروکربنی می‌باشد که توانایی در نظر گرفتن تأثیرات ژئومکانیکی سنگ مخزن و محیط اطراف را دارا باشد. شایان ذکر است بسیاری از مسائل مرتبط با مهندسی مخازن در این تحقیق گنجانده نشده است. برای مثال مدل‌سازی مخازن شکاف دار و یا استخراج به کمک تزریق بخار در اهداف تعریف شده این رساله قرار ندارد.

۳-۱- روش تحقیق

جهت نیل به اهداف تعریف شده فوق، ابتدا لازم است تا معادلات حاکم بر محیط‌های متخلخل شامل ۳ فاز سیال (آب، نفت و گاز) استخراج گردند. با توجه به اهداف مطروحه، این معادلات شامل معادلات جریان، معادلات تعادل محیط و معادلات انتقال حرارت می‌باشد. نظریه‌های محیط‌های متخلخل می‌توانند در راستای استخراج معادلات پایه مدل به خدمت گرفته شوند.

پس از استخراج معادلات حاکم بر سیستم، یک حل عددی مناسب جهت تبدیل معادلات دیفرانسیل به معادلات جبری ارائه می‌گردد. معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم، شامل چند دسته معادله می‌باشد که رفتاری به شدت توأمان و غیر خطی دارند. بنابراین جهت دستیابی به یک مدل کارآمد و پایدار، حل همزمان دستگاه معادلات فوق مورد توجه این تحقیق قرار گرفته است. شایان ذکر است با توجه به ماهیت متفاوت هر دسته از معادلات مورد حل، بهتر است برای حل هر دسته از این معادلات، روشی متناسب با ماهیت معادلات مورد نظر ارائه گردد. این روش‌ها همچنین باید بتوانند به طور همساز و در کنار یکدیگر در یک دستگاه معادلات کل قرار گیرند. اکثر روش‌های موجود از یک روش حل (معمولاً اجزاء محدود یا اختلاف محدود) جهت حل همه معادلات استفاده می‌کنند که مشکلات استفاده از این روش‌ها در فصل دو تشریح شده است.

پس از تکمیل سیستم معادلات و روش حل، یک برنامه رایانه‌ای جهت عملی سازی نظریه مشروحه تهیه شده است. در گام بعدی طرح، صحت عملکرد مدل و برنامه نگارش شده با کمک مطالعات کتابخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و نتایج تحقیق ارائه شده است.

۴-۱- نوآوری‌های تحقیق

- مطالعات کتابخانه‌ای نشان می‌دهد که معادلات پایه مدل‌های موجود در شبیه سازی هیدرولیکی-حرارتی مخازن هیدروکربنی تغییر شکل پذیر بر نظریه بیوت^۱ [۱۸] استوار است. اما معادلات پایه مدل حاضر بر اساس نظریه مخلوط‌های ارائه شده توسط حسنی‌زاده و گری^۲ [۱۹ الی ۲۱] استخراج شده است. در این نظریه سطوح تماس بین فازهای مختلف به عنوان فازهای جداگانه‌ای در سیستم تعریف می‌شوند که تبادل خواص مادی بین فازهای مختلف تنها از طریق آن‌ها انجام می‌گیرد. این گونه مدل‌ها نسبت به مدل‌های بیوتی، تطابق فیزیکی بهتری با پدیده‌های مختلف موجود در سیستم، دارا می‌باشند. ضمناً با استفاده از این رویکرد،

¹ Biot

² Hassanizadeh & Gray

معادلات توازن جرم بجای آنکه برای اجزاء مادی مختلف نوشته شوند، برای فازهای مختلف مادی نوشته شده‌اند. در نتیجه در مخازن زیر اشباع که تمام گاز سیستم، در نفت موجود در مخزن حل شده است، می‌توان معادله فاز گاز را از سیستم معادلات حذف نموده و سرعت اجرای برنامه را افزایش داد. اما در مدل‌های موجود جرم گاز محلول در نفت در معادله توازن جرم جزء گاز منظور می‌گردد. بنابراین در مورد مخازن زیر اشباع نیز باید معادله جرم گاز را همزمان با سایر معادلات حل نمود تا جرم گاز موجود در نفت از معادلات حذف نگردد. شایان ذکر است، در این تحقیق، در مورد مخازن اشباع که در آنها فاز گاز به دو صورت آزاد و محلول در نفت وجود دارد، معادلات توازن جرم فازهای آب، نفت و گاز بطور کامل حل می‌گردند.

- روش حل عددی ارائه شده در گسسته سازی معادلات یک روش ترکیبی از روش‌های اجزاء محدود و کنترل حجم اجزاء محدود¹ می‌باشد که در یک دستگاه معادلات کل به طور همساز با یکدیگر قرار می‌گیرند. روش کنترل حجم اجزاء محدود ارائه شده در این تحقیق بر خلاف روش‌های مشابه موجود در تحلیل جریان‌ات چند فاز، گسسته سازی معادلات را در سطح المان‌ها انجام می‌دهد و بنابراین بصورت کاملاً همسان با روش اجزاء محدود عمل می‌کند. این رویکرد ضمن افزایش کارایی مدل در مواجهه با محیط‌های ناهمگن، توسعه برنامه‌های اجزاء محدود موجود را بسیار آسان می‌نماید. باید متذکر شد اگرچه مدل ارائه شده معادلات را در سطح المان‌ها گسسته سازی می‌کند، اما حل معادلات را در سطح احجام کنترل انجام می‌دهد و در نتیجه بقاء جرم را به صورت محلی و کلی تضمین می‌کند.

- با توجه به تأثیر محیط اطراف مخزن بر تغییر شکل‌های احتمالی مخزن، لازم می‌نماید تا سیستم مخزن و سنگ‌های اطراف آن در یک مدل کامل شبیه سازی شوند. اما مدلسازی این پهنه وسیع، تعداد المان‌ها و مجهولات مسئله را به شدت زیاد کرده و هزینه مدل‌سازی را

¹ Control Volume Finite Element Method

بسیار بالا خواهد برد، بنابراین در این تحقیق با اعمال سختی‌های معادل گره ای ضمن حذف فیزیکی محیط اطراف مخزن، تأثیرات وجود آن بر روی مرزهای مخزن در نظر گرفته شده است.

۵-۱- ساختار رساله

تحقیق انجام شده در این رساله در قالب ساختاری که در زیر تشریح می‌شود ارائه می‌گردد:

- **فصل دوم رساله** به مروری بر تحقیقات پیشین انجام شده در راستای اهداف تعریف شده رساله و تبیین شاخص‌های مثبت و منفی آن‌ها اختصاص دارد. در این فصل ابتدا نظریه‌های مختلف محیط‌های متخلخل بررسی شده است. سپس در قسمت دوم روش‌های موجود جهت حل عددی معادلات جریان مورد کنکاش قرار گرفته و در قسمت آخر تأثیر حل همزمان معادلات ژئومکانیک در کنار معادلات جریان و انتقال حرارت بررسی شده و تحقیقات انجام شده پیشین مورد ارزیابی قرار گرفته است.
- **فصل سوم رساله** به استخراج معادلات حاکم بر رفتار هیدرولیکی-حرارتی سیستم‌های چند فازه در محیط‌های متخلخل تغییرشکل‌پذیر اختصاص دارد. این معادلات به طور کلی شامل معادلات توازن جرم، مومنتوم و انرژی می‌باشند. ضمن اینکه جهت کامل شدن دستگاه معادلات و برابری تعداد معادلات و مجهولات، معادلات ساختاری لازم نیز ارائه شده است.
- **فصل چهارم رساله** حاضر به گسسته سازی معادلات استخراج شده اختصاص دارد. در این فصل، ابتدا معادلات حاکم دسته بندی و بازنویسی شده است. سپس هر دسته از معادلات با روش متناسب خود در پهنه مکان گسسته سازی شده و نحوه تشکیل دستگاه معادلات تشریح شده است. سیستم گسسته سازی دستگاه معادلات حاصل در پهنه زمان و روش خطی سازی معادلات نیز در بخش آخر این فصل تشریح گردیده است.

- فصل پنجم رساله پیش رو به صحت سنجی مدل ارائه شده و بررسی کارآمدی آن اختصاص دارد. همچنین تأثیر حل همزمان معادلات ژئومکانیک و جریان بر جواب‌های حاصله، طی مدل‌سازی یک مخزن فرضی مورد بررسی قرار گرفته است.
- فصل ششم رساله نیز به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد جهت تحقیقات آتی اختصاص داده شده است.

فصل دوم

مروری بر ادبیات موضوع

۱-۲- نظریه‌های محیط متخلخل

شاید بتوان اولین نظریه جامع محیط‌های متخلخل را به کارهای بیوت^۱ [۱۸؛ ۲۲ الی ۲۵] نسبت داد که به تشریح رفتار کشسان و هم دمای محیط‌های متخلخل اشباع از آب پرداخت. نظریه بیوت از دو بخش اساسی تشکیل شده است. بخش اول مربوط به مفهوم تنش موثر است که بر پایه کارهای انجام شده توسط ترزاقی^۲ [۲۶] استوار است و بخش دوم مربوط به معادله جریان و خروج سیال از سیستم می‌باشد. ایشان بعدها نظریه خود را برای مدل‌سازی تغییر شکل‌های بزرگ نیز توسعه بخشید [۲۷]. نظریه بیوت بزودی به صورت وسیع مورد استفاده محققین مختلف قرار گرفت (برای مثال [۲۸ الی ۳۰]). چیفمان و همکارانش^۳ [۳۱]، کریستین و بوهمر^۴ [۳۲] و یوکو و همکارانش^۵ [۳۳] با استفاده از روش اجزاء محدود به حل عددی نظریه بیوت و شبیه‌سازی پروسه‌های تحکیم پرداختند. سپس قابوسی و ویلسون^۶ [۳۴] اثرات مربوط به تراکم‌پذیری سیال را در محاسبات وارد نمودند. لوییز و همکارانش^۷ [۳۵] به بررسی اثر تغییرات نفوذپذیری در تحلیل مسائل تحکیم پرداختند. شرفلر و همکارانش^۸ [۳۶] نیز از نظریه بیوت در محاسبه نشست زمین استفاده کردند. بعدها کوسی^۹ با استفاده از مفاهیم جامع ترمودینامیک به توسعه نظریه بیوت برای در نظر گرفتن جامع‌تر رفتار کشسان-خمیری محیط‌های متخلخل پرداخت [۳۷ الی ۳۹]. کوسی علاوه بر در نظر گرفتن تغییر شکل کشسان-خمیری برای فضای خالی بین دانه‌ها، خود دانه‌های جامد را نیز دارای خاصیت کشسان-خمیری معرفی کرد.

¹ Biot

² Terzaghi

³ Schiffman et al.

⁴ Christian & Boehmer

⁵ Yokoo et al.

⁶ Ghaboussi & Wilson

⁷ Lewis et al.

⁸ Schrefler et al.

⁹ Coussy

علاوه بر نظریه بیوت که جواب‌های مناسبی هم ارائه نموده است، نظریه مخلوط‌ها^۱ نیز یک گزینه مطلوب برای مدل‌سازی محیط‌های متخلخل می‌باشد. نظریه بیوت در توجیه ترمودینامیکی برخی از پدیده‌ها با مشکلاتی مواجه بوده است [۴۰]. ضمن اینکه، این مدل بر پایه تنش موثر استوار است و چنانچه بنا باشد از فرم‌های دیگر تنش در محیط‌های چند فازه استفاده نمود (برای نمونه مراجع [۴۱ الی ۴۳])، استفاده از این مدل با دشواری‌های بسیار همراه است. به طور کلی، استفاده از نظریه مخلوط‌ها در محیط‌های چند فازه می‌تواند توجیه بهتر معادلات و انعطاف پذیری بیشتر آن‌ها را فراهم نماید. تاریخچه جامع نظریه مخلوط‌ها در مراجع [۴۴؛ ۴۵] در دسترس می‌باشد.

فرض اساسی انجام شده در نظریه مخلوط‌ها مربوط به پیوسته بودن هر یک از فازهای موجود در محیط است. در حقیقت فرض شده است که هر نقطه فرضی از فضای مادی، به طور همزمان توسط تمام فازهای موجود اشغال شده‌اند. البته درصد مشارکت هر یک از فازها در نقاط مختلف می‌تواند متفاوت باشد. این فرض کمک می‌کند تا معادلات یک محیط مخلوط از روی هم گذاری معادلات چند محیط پیوسته قابل استخراج باشد.

گودمن و کوین^۲ در سال ۱۹۷۲ [۴۶] نظریه مخلوط‌ها را در محیط متخلخل بکار بردند. ایشان در بیان روابط خود از متغیر جدیدی به نام نسبت حجمی^۳ اجزا متشکله مخلوط استفاده کرده و دانسیته اجزاء مخلوط را به دو بخش نسبت حجمی و دانسیته محلی^۴ تقسیم کردند. در نتیجه در این نظریه درجه آزادی مستقلی به نام نسبت حجمی تعریف شد و ترم‌های مربوط به تغییرات ناشی از این درجه آزادی به معادلات حاکم اضافه گردید.

نانزیاتو و والش^۵ در سال ۱۹۸۰ [۴۷] نظریه دیگری را بر اساس نظریه مخلوط‌ها برای محیط‌های متخلخل ارائه نمودند. ایشان نیز دانسیته اجزاء مخلوط را به دو بخش نسبت حجمی و دانسیته محلی تقسیم کردند و معادلات حاکم بر محیط را بر این اساس بنا نمودند. آن‌ها ترم‌های

¹ Continuum Theory of Mixtures

² Goodman & Cowin

³ Volume Fraction

⁴ Local Density

⁵ Nunziato & Walsh

مربوط به نسبت حجمی را به معادلات تعادل نیرو اضافه کردند تا اثرات دینامیکی ناشی از تغییرات این متغیر نیز در نظر گرفته شود. تفاوت معادلات ارائه شده در این نظریه نسبت به معادلات گودمن و کوین، در نظر گرفتن اثرات مربوط به اندرکنش میان نسبت‌های حجمی فازهای مختلف است. تفاوت دیگری که در معادلات نانزیاتو - والش و گودمن - کوین می‌توان یافت این نکته است که نانزیاتو و والش از گرادیان تغییر شکل در نظریه خود استفاده کرده‌اند در حالیکه گودمن و کوین از گرادیان سرعت به جای گرادیان تغییر شکل استفاده نموده‌اند. در حقیقت گودمن و کوین از خواص اجزاء سیال به عنوان جزء اصلی مخلوط استفاده کردند در حالیکه نانزیاتو و والش از جزء جامد به عنوان جزء اصلی مخلوط استفاده کرده‌اند.

نانزیاتو و والش همچنین در فرضیات خود تاکید کردند که پاسخ مکانیکی و حرارتی هر یک از اجزاء متشکله مخلوط فقط به خواص مکانیکی و حرارتی همان جزء بستگی دارد و مستقل از خواص دیگر اجزاء می‌باشد. البته ایشان برای در نظر گرفتن اندرکنش میان اجزاء مختلف از ترم‌هایی به عنوان منابع خارجی جرم، انرژی، مومنتوم و غیره در معادلات حاکم استفاده نمودند. این فرض با کمی تفاوت و تحت عنوان اصل جدائی فازها^۱ توسط درو و سگل^۲ در سال ۱۹۷۱ [۴۸] نیز مطرح شده بود. بوون^۳ نیز در سال ۱۹۸۲ [۴۹] مدل چند فازه خود را در قالب نظریه مخلوط‌ها ارائه نمود. او همچنین نشان داد که نظریه بیوت حالت خاصی از مدل جامع‌تر وی بوده و امکان توسعه آن را برای بررسی رفتار هیدرولیکی محیط‌های متخلخل تغییرشکل‌پذیر شامل چند فاز سیال مورد بررسی قرار داد.

از دیگر نظریه‌های مهم ارائه شده می‌توان به تحقیقات دی بوئر و همکارانش^۴ [۵۰] اشاره نمود. در این نظریه کوشیده شده است تا برخی اثرات ریزبینانه^۵ اندرکنشی بین فازهای سیال و جامد در معادلات حاکم دخالت داده شوند. بدین منظور ایشان ماتریس گرادیان تغییرشکل را به دو قسمت

¹ The principal of Phase Separation

² Drew & Segel

³ Bowen

⁴ de Boer et al.

⁵ Microscopic

تقسیم کرده و گرادیان تغییر شکل‌های مربوط به فاز جامد را در یک ماتریس و گرادیان تغییر شکل-های مربوط به تخلخل محیط را در یک ماتریس جداگانه جای دادند. شایان ذکر است که این مدل برای محیط‌های متخلخل اشباع ارائه شد و به دلیل خاص نگری در ارائه معادلات، توسعه آن برای محیط‌های متخلخل شامل چند فاز سیال با دشواری همراه است [۴۰].

نظریه‌های اشاره شده فوق، در واقع با یک نگاه صرفاً درشت‌بینانه^۱ به استخراج معادلات پرداخته‌اند. اما امروزه با توجه به توسعه علوم، محققین بسیاری سعی کرده‌اند تا به مدل‌سازی پدیده‌ها در مقیاس ریز پردازند (برای مثال مراجع [۵۱ الی ۵۳]). اگرچه مدل‌سازی پدیده‌های با مقیاس درشت با استفاده از مدل‌های ریزمقیاس همچنان ممکن نیست، اما سعی محققین بر آن است تا فراسنج‌های ریزمقیاسی که بر مدل‌سازی‌های بزرگ‌مقیاس تأثیر گذار هستند را به نوعی در معادلات درشت‌بینانه اثر دهند. اما عملی سازی این رویکرد جدید، در نظریه‌هایی که صرفاً با نگاه درشت‌بینانه به استخراج معادلات می‌پردازند با دشواری همراه است.

حسنی‌زاده و گری^۲ [۱۹ الی ۲۱؛ ۵۴] از جمله مهم‌ترین محققینی هستند که به برقراری ارتباط بین دو رویکرد ریز مقیاس و درشت مقیاس در نظریه مخلوط‌ها پرداخته‌اند. ایشان معادلات را ابتدا در سطح ریزمقیاس نوشته و با میانگین‌گیری از آن‌ها بر روی یک حجم پایه معرف^۳، معادلات سطح درشت مقیاس را بدست آوردند. البته باید اشاره کرد، استفاده از تکنیک میانگین‌گیری جهت توصیف سیستم‌ها و پدیده‌های پیچیده دارای قدمتی نسبتاً طولانی می‌باشد. کاربرد این روش در محیط‌های متخلخل برای اولین بار توسط ماندل^۴ در سال ۱۹۶۴ [۵۵] انجام گرفته است. اما قبل از حسنی‌زاده و گری، این مدل‌ها [۵۶ الی ۵۹] چندان منظم نبوده و بعضاً اشکالات ریاضی نیز بر آن‌ها وارد بوده است. از جمله اینکه در این مدل‌ها معمولاً از یک عملگر واحد میانگین‌گیری برای بدست آوردن میانگین کمیت‌های گوناگون که از لحاظ فیزیکی دارای مفاهیم کاملاً متفاوت هستند استفاده

¹ Macroscopic

² Hassanizadeh & Gray

³ Representative Elementary Volume (REV)

⁴ Mandl

شده است. برای مثال در بسیاری از آن‌ها از یک عملگر میانگین گیری حجمی به صورت واحد برای بدست آوردن دانسیته جرمی میانگین و تانسور تنش میانگین استفاده شده است، در حالیکه این دو کمیت دارای ماهیتی کاملاً متفاوت هستند. برای مثال دانسیته در واحد حجم تعریف می‌شود در حالیکه تنش بر روی واحد سطح تعریف می‌شود. عدم وجود یک روند منظم و مشخص در فرآیند میانگین گیری نیز یکی دیگر از کاستی‌های قابل اشاره است و بنابراین محققین مختلف از روش‌های مختلف برای این منظور استفاده می‌کرده‌اند. اما حسنی‌زاده و گری به بیان و تبیین یک فرآیند منظم میانگین گیری برای بدست آوردن معادلات درشت‌بینانه و شرایط ناپیوستگی در سطوح مرزی پرداختند. ایشان با تعریف این فرآیند مشکلات مربوط به این نظریه‌ها را تا حدود زیادی مرتفع نمودند. امروزه مدل ارائه شده توسط حسنی‌زاده و گری به شدت توسعه یافته است [۶۰ الی ۶۴] و بسیاری از پدیده‌های پیچیده ترمودینامیکی با این مدل‌ها توجیه پذیر می‌باشد.

کاربرد و عملی سازی نظریه مخلوط‌ها در تحلیل محیط‌های متخلخل که در پاراگراف‌های فوق به طور اجمالی به آن‌ها اشاره شد، توسط محققین بسیاری انجام پذیرفته و نتایج مناسبی نیز بدست آمده است. شرفلر [۶۵] و شرفلر و اسکوتا^۱ [۶۶] بر اساس نظریه مخلوط‌ها، یک مدل کاملاً توانمند برای محیط‌های متخلخل تغییرشکل‌پذیر نیمه اشباع ارائه نمودند. این مدل در حالت نظری بسیاری از پدیده‌های ریز مقیاس مانند سطوح تماس بین فازهای مختلف را در خود جای داد. اما نگارندگان آن به هنگام عملی سازی از این پدیده‌ها صرف‌نظر نموده و با شبیه سازی یک محیط بتنی چند فازه مدل ساده شده خود را صحت سنجی کردند.

لو و همکارانش^۲ [۶۷] معادلات دیفرانسیل توازن جرم و مومنتوم در محیط‌های متخلخل تغییرشکل‌پذیر دو فازه (دو فاز سیال) را بر اساس نظریه مخلوط‌ها ارائه نمودند. نکته مهم این مدل، ارائه روابط ساختاری جدید بر اساس قانون دوم ترمودینامیک است. روابط ساختاری ارائه شده در این مدل، باعث ظهور ترم‌های اندرکنشی جدید (بین سیال و جامد) در معادله توازن مومنتوم شده است.

¹ Schrefler & Scotta

² Lo et al.