**دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز**

**پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته شیمی -شبیه سازی و کنترل فرآیند**

# کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تشخیص مدل مخازن گاز میعانی با استفاده از داده‌های چاه‌آزمایی

به وسیله‌ی

**نجمه غفاریان روح‌پرور**

استاد راهنما

**دکتر رضا اسلاملوئیان**

بهمن ماه ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

**به نام خدا**

**اظهارنامه**

**اینجانب نجمه غفاریان روح‌پرور (۸۸۰۷۲۳) دانشجوی رشته ی شیمی گرایش شبیه سازی و کنترل فرآیند دانشکده ی مهندسی شیمی، نفت و گاز اظهار می کنم که این پایان‌نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده‌ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته‌ام. همچنین اظهار می‌کنم که تحقیق و موضوع پایان‌نامه‌ام تکراری نیست و تعهد می‌نمایم بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آئین نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.**

**نام و نام خانوادگی: نجمه غفاریان روح‌پرور**

**تاریخ و امضاء: ۱۳۹۰/۱۱/۱۵**

**به نام خدا**

# کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تشخیص مدل مخازن گاز میعانی با استفاده از داده‌های چاه‌آزمایی


**به کوشش**

**نجمه غفاریان روح‌پرور**


**پایان نامه**

**ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد**

**در رشته‌ی :**

**مهندسی شیمی(شبیه سازی و کنترل فرآیند)**


**از دانشگاه شیراز**

**شیراز**

**جمهوری اسلامی ایران**


**ارزیابی شده توسط کمیته‌ی پایان نامه با درجه‌ی: عالی**

دکتر رضا اسلاملوئیان، دانشیار دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز (رئیس کمیته).....

دکتر داریوش مولا، استاد دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز.....

دکتر پیمان کشاورز، استادیار دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز.....

**بهمن ماه ۱۳۹۰**

*با سپاس از سه وجود مقدس*

آن‌کس که ناتوان شد تا من به توانایی برسم...

موهایش سپید شد تا من روسفید شوم...

و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجودم و روشنگر راهم باشند...

**پدرم**

**مادرم**

**استادانم**

# سپاسگزاری

**سپاس و آفرین ایزد جهان آفرین راست، آن که اختران رخشان به پرتو روشنی و پاکی او تابنده‌اند و چرخ گردان به خواست و فرمان او پاینده، آفریننده‌ای که پرستیدن اوست سزاوار، دهنده‌ای که خواستن جز از او نیست خوش‌گوار، هست کننده از نیستی، نیست کننده پس از هستی...**

**اینک که به لطف خداوند توانسته‌ام این پژوهش را به اتمام برسانم بر خود واجب می‌دانم که والاترین مراتب سپاس خود را به عزیزانی که مرا در این راه یاری کردند، استاد راهنمای بزرگوارم، جناب آقای دکتر رضا اسلاملوئیان که به حق از ایشان درس بزرگواری و زیبا زیستن را آموختم، اساتید مشاور محترم جناب آقای دکتر مولا و جناب آقای دکتر کشاورز که صمیمانه مرا یاری کردند، تقدیم نمایم. همچنین سپاس فراوان دارم از جناب آقای دکتر وافری که همواره از راهنمایی‌های ایشان بهره‌مند بوده‌ام.**

# چکیده

## کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تشخیص مدل مخازن گاز میعانی با استفاده از داده‌های چاه‌آزمایی

به کوشش

**نجمه غفاریان روح‌پرور**

از سال ۱۹۳۷، از چاه آزمایی به عنوان ابزاری برای شناخت مدل‌های مخازن هیدروکربوری و تشخیص پارامترهای مربوط به آن‌ها استفاده می‌شود. در واقع فرآیند چاه آزمایی به ایجاد یک تغییر جریانی در چاه و جمع آوری داده‌های فشاری در ته چاه اطلاق می‌گردد. آنالیز داده‌های چاه آزمایی مربوط به مخازن گاز میعانی به علت تشکیل میعانات، اصولاً متفاوت با مخازن گاز خشک و نفت می‌باشد و رفتارهای پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهند. اولین مرحله در آنالیز چاه آزمایی مخزن گازی یا نفتی تشخیص مدل مخزن و مرزهای آن است. این مرحله معمولاً توسط فرآیند حدس و خطا انجام می‌شود. تحقیقات گذشته نشان داده‌است که مدل مخزن مختلط شعاعی با مرزهای مختلف برای مخازن گاز میعانی بهترین انتخاب است. مدل مختلط شعاعی به مخازنی اطلاق می‌گردد که شامل دو منطقه مختلف باشند: ۱) منطقه داخلی محدود که چاه در مرکز آن واقع شده‌است و ۲) منطقه بیرونی نامحدود. هم‌چنین می‌توان مدل‌های معمول دیگر از جمله مدل مخازن همگن و تخلخل دوگانه را نیز استفاده کرد.

در این پژوهش، یک شبکه عصبی چندلایه برای تشخیص سه مدل اشاره شده در بالا با ۴ مرز مختلف ارائه شده‌است. داده‌های مورد نیاز برای آموزش، تست و صحه‌گذاری در طراحی شبکه عصبی توسط نرم افزار PanSystem گرفته شده‌است. ساختار بهینه شبکه‌های پیشنهادی با استفاده از روش‌های حدس و خطا و کمینه کردن میانگین خطای نسبی داده‌های آموزش و تست تعیین شده‌است. در این تحقیق، به دلیل رفتار غیر خطی فشار ته چاه در مخازن گاز میعانی و تغییر آن با زمان، از تبدیل فشار به تابع شبه فشار یا پتانسیل حقیقی برای خطی سازی و سپس تبدیل آن‌ها به مشتق فشار استفاده شده‌است، سپس ۴۹ نقطه از هر نمودار مشتق فشار نرمالیزه شده به عنوان الگوی ورودی به شبکه داده می‌شود. دو روش مختلف شبکه عصبی در این پژوهش ارائه شده‌است: ۱) شبکه عصبی واحد و ۲) شبکه‌های ترکیبی که شبکه‌های ترکیبی بر اساس الگوریتم خوشه‌بندی طراحی شده‌است. دقت دسته بندی کلی مربوط به شبکه واحد و ترکیبی به ترتیب ۸۸/۶۵٪ و ۹۳/۳۳٪ به دست آمده‌است.

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**

**فصل اول: مقدمه**


۱-۱- مقدمه‌ای بر مخازن گاز میعانی ..... ۲

۱-۱-۲- تفسیر نواحی سه‌گانه مخازن گاز میعانی ..... ۶

۱-۱-۳- همزیستی سه منطقه ..... ۸

۱-۱-۴- گرفتگی مایعات گازی ..... ۸

۱-۱-۵- نیروهای تأثیرگذار بر رفتار جریانی سیال در مخازن گاز میعانی ..... ۱۰

۱-۱-۶- مشکلات موجود در بهره‌برداری از مخازن گاز میعانی ..... ۱۰

۱-۱-۷- روش دقیق پتانسیل گاز حقیقی (روش **m(P)**) ..... ۱۲

۱-۱-۸- اصل انطباق ..... ۱۵

۱-۱-۸-۱- اثر چاه‌های چندگانه ..... ۱۵

۱-۱-۸-۲- اثر دبی‌های متفاوت ..... ۱۷

۱-۱-۸-۳- اثر مرزهای مخزن ..... ۱۹

۱-۱-۸-۴- اثر تغییر فشار ..... ۲۱

۱-۲- مقدمه‌ای بر چاه‌آزمائی ..... ۲۱

۱-۲-۱- عوامل موثر بر چاه‌آزمائی ..... ۲۴

۱-۲-۱-۱- ضریب پوسته ..... ۲۴

۱-۲-۱-۲- اثر ذخیره درون چاهی ..... ۲۶

**عنوان** **صفحه**


۱-۲-۱-۳- نفوذپذیری یا تراوائی ..... ۲۸
۱-۲-۱-۴- نحوه‌ی حرکت سیال درون محیط متخلخل ..... ۲۸
۱-۲-۱-۵- مرزهای مخزن ..... ۲۸
۱-۲-۲- انواع آزمایشات چاه‌آزمائی ..... ۳۰
۱-۲-۲-۱- تست‌های دوره‌ای تولید (اندازه‌گیری روزانه‌ی دبی و فشار) ..... ۳۰
۱-۲-۲-۲- تست‌های سنجش بهره‌دهی چاه (میزان دبی چاه بر حسب فشار
جریانی چاه) ..... ۳۱
۱-۲-۲-۲-۱- برای مخازن نفتی ..... ۳۱
۱-۲-۲-۲-۲- برای مخازن گازی ..... ۳۱
۱-۲-۲-۳- تست‌های فشار گذرا ( فشار با زمان) ..... ۳۳
۱-۲-۲-۳-۱- آزمایش خیزش فشار ..... ۳۴
۱-۲-۲-۳-۲- آزمایش جریانی ..... ۴۰
۱-۲-۲-۳-۳- آزمایش ساقه مته ..... ۴۲
۱-۲-۲-۳-۴- آزمایش چند جریانی ..... ۴۳
۱-۲-۲-۳-۵- آزمایش چاه تزریقی ..... ۴۴
۱-۲-۲-۳-۶- آزمایش کاهش فشار ..... ۴۴
۱-۲-۲-۳-۷- آزمایش تداخلی ..... ۴۴
۱-۲-۲-۳-۸- چاه‌آزمائی ضربانی ..... ۴۴
۱-۲-۲-۳-۹- چاه‌آزمائی تعیین حدود مخزن ..... ۴۶
۱-۲-۳- کاربرد نمودارهای مشتق در تحلیل آزمایشات چاه‌آزمائی ..... ۴۶
۱-۲-۳-۱- مثال‌هایی از کاربرد منحنی‌های مشتق فشار ..... ۴۷
۱-۳- شبکه‌های عصبی مصنوعی ..... ۵۰
۱-۳-۱- ساختار مغز ..... ۵۰
۱-۳-۲- یادگیری در سیستم‌های بیولوژیک ..... ۵۲

**عنوان** **صفحه**


۱-۳-۳- یادگیری در ماشین‌ها ..... ۵۲

۱-۳-۴- نرون پایه..... ۵۲

۱-۳-۵- مدل سازی نرون تنها..... ۵۳

۱-۳-۶- شبکه های عصبی..... ۵۵

۱-۳-۶-۱- تقسیم بندی بر اساس ساختار..... ۵۶

۱-۳-۶-۲- تقسیم بندی بر اساس الگوریتم یادگیری ..... ۵۶

۱-۳-۷- شبکه پرسپترون چند لایه..... ۵۷

۱-۳-۸- ترتیب ارائه داده ها به شبکه..... ۵۸

۱-۳-۹- تابع انتقال ..... ۵۸

۱-۳-۱۰- پایان آموزش..... ۶۰

۱-۳-۱۱- تعداد نرون در لایه ها..... ۶۰

۱-۳-۱۲- معیارهای نیکویی برازش..... ۶۰


**فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته**


۲-۱- کارهای انجام شده بر روی تابع شبه فشار ..... ۶۴

۲-۲- کارهای انجام شده بر روی شبکه‌های عصبی ..... ۷۱


**فصل سوم: گردآوری داده‌های چاه‌آزمایی**


۳-۱- مقدمه ..... ۷۷

۳-۲- مدل‌های در نظر گرفته شده ..... ۷۷

۳-۳- پارامترهای مورد نیاز برای وارد کردن به نرم افزار..... ۷۹

۳-۴-پارامترهای چاه‌آزمائی مدل‌های مخزنی ..... ۸۰

۳-۴-۱- استفاده از روش طراحی آزمایش برای تولید داده‌های اولیه ..... ۸۱

**عنوان** **صفحه**


۳-۴-۲- تبدیل داده‌های فشار به شبه فشار و مشتق گیری از آن‌ها ۸۲

۳-۵-نرمالیزه‌کردن ۸۴

۳-۶- نمودارهای شبیه‌سازی شده مدل‌های مختلف ۸۵

**فصل چهارم: بحث و نتایج**

۴-۱- مقدمه ۱۰۰

۴-۲- تعیین ساختار بهینه‌ی شبکه پیشرو ۱۰۱

۴-۲-۱- شبکه کلی ۱۰۲

۴-۲-۱-۱- آموزش شبکه ۱۰۴

۴-۲-۲- شبکه‌های دسته بندی شده ۱۰۵

۴-۲-۲-۱- آموزش شبکه ۱۰۶

۴-۳- امتحان شبکه با داده‌های صحه‌گذاری ۱۰۸

۴-۳-۱-شبکه کلی ۱۰۸

۴-۳-۲- شبکه‌های دسته بندی شده ۱۰۸

۴-۳-۳- دقت دسته بندی کلی ۱۱۱

۴-۴- امتحان شبکه با داده‌های واقعی ۱۱۲

۴-۵- نتیجه گیری ۱۱۵

۴-۶- پیشنهادات ۱۱۶

**فهرست منابع و مآخذ** ۱۱۷

**پیوست** ۱۲۱

# فهرست جدول ها

**عنوان** **صفحه**


جدول(۳-۱): شرایط فرض‌شده مخزن، چاه و سیال موجود درآن ..... ۷۹

جدول(۳-۲): محدوده‌ی انتخاب‌شده پارامترهای چاه‌آزمائی ..... ۸۱

جدول(۴-۱): تعیین الگوریتم آموزشی بهینه‌ی شبکه‌ی پیشرو ..... ۱۰۱

جدول(۴-۲): تعیین ساختار بهینه‌ی شبکه‌ی پیشرو برای حالت شبکه کلی ..... ۱۰۳

جدول(۴-۳): تعیین ساختار بهینه‌ی شبکه‌ی پیشرو برای حالت شبکه دسته اول ..... ۱۰۵

جدول(۴-۴): تعیین ساختار بهینه‌ی شبکه‌ی پیشرو برای حالت شبکه دسته دوم ..... ۱۰۵

جدول(۴-۵): تعیین ساختار بهینه‌ی شبکه‌ی پیشرو برای حالت شبکه دسته سوم ..... ۱۰۶

جدول(۴-۶): میزان داده‌های مربوط به هر مدل با ۱۶ نرون (حالت شبکه کلی) ..... ۱۰۹

جدول(۴-۷): توانایی شبکه‌ی پیشرو در شناسائی مدل واقعی مخزن از داده‌های صحه‌گذاری شبیه‌سازی(حالت شبکه کلی) ..... ۱۰۹

جدول(۴-۸): توانایی شبکه‌ی پیشرو در شناسائی مدل واقعی مخزن از داده‌های صحه‌گذاری شبیه‌سازی (حالت شبکه دسته اول) با ۱۳ نرون ..... ۱۱۰

جدول(۴-۹): توانایی شبکه‌ی پیشرو در شناسائی مدل واقعی مخزن از داده‌های صحه‌گذاری شبیه‌سازی (حالت شبکه دسته دوم) با ۱۳ نرون ..... ۱۱۰

جدول(۴-۱۰): توانایی شبکه‌ی پیشرو در شناسائی مدل واقعی مخزن از داده‌های صحه‌گذاری شبیه‌سازی (حالت شبکه دسته سوم) با ۱۳ نرون ..... ۱۱۰

جدول(۴-۱۱): مقایسه‌ی توانایی شبکه‌ی پیشرو در شناسائی مدل واقعی مخزن از داده‌های صحه‌گذاری شبیه‌سازی (در حالت شبکه کلی) ..... ۱۱۱

**عنوان** **صفحه**

جدول(۴-۱۲): مقایسه‌ی توانایی شبکه‌ی پیشرو در شناسائی مدل واقعی مخزن
از داده‌های صحه‌گذاری شبیه‌سازی (در حالت شبکه‌های دسته‌بندی) .....۱۱۲

# فهرست شکل ها

**عنوان** **صفحه**


شکل(۱-۱): نمودار رفتار فازی ..... ۵

شکل(۱-۲): شماتیک رفتار جریانی گاز میعانی ..... ۷

شکل(۱-۳): موقعیت سه چاه مختلف..... ۱۶

شکل(۱-۴): موقعیت فشار و دبی یک چاه ..... ۱۸

شکل(۱-۵): روش چاه مجازی برای حل مشکلات مرزها..... ۲۰

شکل(۱-۶) : نمودار مدل فشاری ..... ۲۲

شکل(۱-۷) : نمودار مدل مشتق فشاری..... ۲۳

شکل(۱-۸): اثر ذخیره درون چاهی با شیب ۱ در اطراف چاه..... ۲۷

شکل(۱-۹): نمودار تغییر فشار نسبت به زمان در آزمایش خیزش فشار ..... ۳۴

شکل(۱-۱۰): برونیابی نمودار هرنر برای به‌دست آوردن $P^*$ ..... ۳۹

شکل(۱-۱۱): نمودار تغییر فشار نسبت به زمان در آزمایش جریانی..... ۴۰

شکل(۱-۱۲): دو برابر شدن شیب نشانگر وجود یک گسل..... ۴۷

شکل(۱-۱۳): تفاوت چاه‌آزمائی خیزش فشار و جریانی..... ۴۷

شکل(۱-۱۴): نمایی از ناحیه نهایی یک مرز با فشار ثابت ..... ۴۸

شکل(۱-۱۵): نمودار چاه آزمائی در حالت افت فشار در یک مخزن

با مرزهای غیرقابل نفوذ ..... ۴۸

شکل(۱-۱۶): نمایی از وجود دو گسل غیرقابل نفوذدر مرز خارجی مخزن..... ۴۹

**عنوان** **صفحه**


شکل(۱-۱۷): نمایی از تغییرات فشار چاه نزدیک به یک گسل نیمه گذرا ..... ۴۹

شکل(۱-۱۸): مشخصات اصلی یک نرون بیولوژیک ..... ۵۰

شکل(۱-۱۹): نمای مدل اصلی نرون ..... ۵۳

شکل(۱-۲۰): ساختار یک **MLP** سه لایه ..... ۵۸

شکل(۱-۲۱): تابع انتقال سیگموئید ..... ۵۹

شکل(۱-۲۲): تابع انتقال تانژانت هایپربولیک ..... ۵۹

شکل(۳- ۱): نمودار شبه فشار بر حسب فشار به دست آمده از نرم افزار ***pansystem*** ..... ۸۴

شکل(۳- ۲) : نمودارهای مشتق شبه فشار شبیه‌سازی شده‌ی مدل یک ..... ۸۶

شکل(۳- ۳): نمودارهای مشتق شبه فشار شبیه‌سازی شده‌ی مدل دو ..... ۸۷

شکل(۳- ۴): نمودارهای مشتق شبه فشار شبیه‌سازی شده‌ی مدل سه ..... ۸۸

شکل(۳- ۵): نمودارهای مشتق شبه فشار شبیه‌سازی شده‌ی مدل چهار ..... ۸۹

شکل(۳- ۶): نمودارهای مشتق شبه فشار شبیه‌سازی شده‌ی مدل پنج ..... ۹۱

شکل(۳- ۷): نمودارهای مشتق شبه فشار شبیه‌سازی شده‌ی مدل شش ..... ۹۲

شکل(۳- ۸): نمودارهای مشتق شبه فشار شبیه‌سازی شده‌ی مدل هفت ..... ۹۳

شکل(۳- ۹): نمودارهای مشتق شبه فشار شبیه‌سازی شده‌ی مدل هشت ..... ۹۴

شکل(۳-۱۰): نمودارهای مشتق شبه فشار شبیه‌سازی شده‌ی مدل نه ..... ۹۵

شکل(۳-۱۱): نمودارهای مشتق شبه فشار شبیه‌سازی شده‌ی مدل ده ..... ۹۶

شکل(۳-۱۲): نمودارهای مشتق شبه فشار شبیه‌سازی شده‌ی مدل یازده ..... ۹۷

شکل(۳-۱۳): نمودارهای مشتق شبه فشار شبیه‌سازی شده‌ی مدل دوازده ..... ۹۸

شکل(۴-۱): ساختار بهینه‌ی شبکه‌ی پیشرو برای حالت شبکه کلی ..... ۱۰۳

شکل(۴-۲): ساختار بهینه‌ی شبکه‌ی پیشرو برای حالت شبکه دسته اول ..... ۱۰۶

شکل(۴ -۳): ساختار بهینه‌ی شبکه‌ی پیشرو برای حالت شبکه دسته دوم ..... ۱۰۷

**عنوان** **صفحه**

شکل(۴-۴): ساختار بهینه‌ی شبکه‌ی پیشرو برای حالت شبکه دسته سوم.....۱۰۷
شکل(۴-۵): نمودار مشتق شبه فشار نرمالیزه‌شده مدل نه به‌دست آمده
از میدان واقعی.....۱۱۳
شکل(۴-۶): خروجی شبکه پیشرو دسته اول به نمودار مشتق شبه فشار
مدل نه میدانی.....۱۱۴
شکل(۴-۷): خروجی شبکه پیشرو دسته دوم به نمودار مشتق شبه فشار
مدل نه میدانی.....۱۱۴
شکل(۴ - ۸): خروجی شبکه پیشرو دسته سوم به نمودار مشتق شبه فشار
مدل نه میدانی.....۱۱۵
شکل(پ۱-۱): ترتیب مراحل انجام‌گرفته برای آنالیز داده‌های چاه‌آزمائی .....۱۲۸
شکل(پ۱-۲): ترتیب مراحل انجام‌گرفته برای تولید داده‌های چاه‌آزمائی .....۱۲۹

## فهرست نشانه‌های اختصاری

| | |
|---|---|
| بایاس | $b$ |
| ضریب تشکیل نفت | $Bo$ |
| ذخیره‌ی درون چاهی بدون بعد | $C_D$ |
| ضریب تراکم‌پذیری نفت | $c_o$ |
| ذخیره‌ی درون چاهی | $C_s$ |
| ضریب تراکم‌پذیری کلی | $c_t$ |
| ضریب تراکم‌پذیری آب | $c_w$ |
| تابع انتگرال نمایی | $Ei$ |
| تابع فعالیت | $f$ |
| عمق مخزن هیدروکربنی | $h$ |
| تراوائی شکاف | $k_f$ |
| تراوائی ماتریس | $k_m$ |
| طول شکاف | $l_f$ |
| شعاع مخزن | $r$ |
| شعاع بدون بعد | $r_D$ |
| مساحت بلوک ماتریس/حجم بلوک ماتریس | $r_m$ |
| شعاع چاه | $r_w$ |
| ضریب پوسته | $s$ |
| ضریب پوسته‌ی شکاف هیدرولیکی | $S_f$ |
| مدت زمان تولید | $t_p$ |
| طول شکاف | $x_f$ |

| | |
|---|---|
| تراوائی | $k$ |
| میزان فشار در زمان یک ساعت | $P(1hr)$ |
| فشار بدون بعد | $P_D$ |
| ورودی‌های شبکه‌ی عصبی | $p_i$ |
| فشار اولیه مخزن | $P_i$ |
| فشار مخزن در حین تولید | $P_{wf}$ |
| فشار مخزن در حین بسته بودن | $P_{ws}$ |
| شدت جریان چاه | $q$ |
| وزن سیناپسی | $w$ |
| خروجی‌های شبکه‌ی عصبی | $y_i$ |
| مقادیر مشاهده شده (واقعی) | $y_{act}$ |
| میانگین مقادیر مشاهده شده (واقعی) | $\bar{y}_{act}$ |
| مقادیر تخمینی (خروجی شبکه) | $y_{est}$ |
| میانگین مقادیر تخمینی (خروجی شبکه) | $\bar{y}_{est}$ |
| ویسکوزیته | $\mu$ |
| تخلخل | $\phi$ |
| تخلخل شکاف | $\phi_f$ |
| تخلخل ماتریس | $\phi_m$ |
| تغییرات زمان | $\Delta t$ |
| تغییرات حجم سیال داخل چاه تحت شرایط چاه | $\Delta v$ |
| تغییرات فشاری اعمال شده به چاه | $\Delta p$ |
| تغییرات فشار | $\Delta P$ |
| نسبت جریان بین دانه‌ای | $\lambda$ |
| ضریب شکل | $\alpha$ |
| نسبت ظرفیت شکاف به ماتریس | $\omega$ |

# فصل اول